

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**



**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE LOS  
GRANOS DE CAFÉ (*Coffea arábica*) VARIEDADES BOURBON Y CATIMOR A  
DIFERENTES TEMPERATURAS**

**Tesis**

**Para optar el título de:**

**INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

**PRESENTADO POR:**

**HUAMANI RAMIREZ, AURELIO REYMUNDO**

**ASESOR: Ing<sup>o</sup> M. Sc. Williams V. ROLDAN CARBAJAL**

**Tingo María – Perú  
2021**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
Tingo María  
**FACULTAD DE INGENIERIA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**  
Carretera Central Km. 1.21. Teléfono (062) 561385  
Apartado Postal 156 Tingo María E.mail; [fiia@unas.edu.pe](mailto:fiia@unas.edu.pe)

---

"Año del Bicentenario del Perú: 200 años de Independencia".

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 003-2021**

Los Miembros del Jurado que suscriben la presenta Acta, reunidos en acto público en forma virtual a las 10:00 horas del día 18 de junio del 2021, en el equipo: Sustentación de Tesis de Pregrado FIIA UNAS, en la Plataforma Microsoft Teams, para calificar la tesis presentado por el Bach. **HUAMANÍ RAMÍREZ AURELIO REYMUNDO**, titulada:

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE LOS GRANOS DE CAFÉ (*Coffea arabica*) VARIEDADES BOURBON Y CATIMOR A DIFERENTES TEMPERATURAS**

Después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las preguntas formuladas, lo declaran **APROBADO** con el calificativo de **MUY BUENO**; en consecuencia, el sustentante, queda apto para obtener el título de **Ingeniero en Industrias Alimentarias**, de conformidad con el artículo 45º numeral 45.2, de la Ley Universitaria 30220; los artículos 132 inciso "k" y 135 inciso "f" del Estatuto de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Tingo María, 18 de junio del 2021

.....  
Ing. M. Sc. Alfredo Abelardo Carmona Ruíz  
Presidente

.....  
Dr. Jaime Eduardo Basilio Atencio  
Miembro

.....  
Ing. M. Sc. Yolanda Jesús Ramírez Trujillo  
Miembro

.....  
Ing. M. Sc. Williams Vicente Roldán Carbajal  
Asesor



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
DIRECCIÓN DE GESTIÓN DE INVESTIGACIÓN - DGI  
REPOSITORIO INSTITUCIONAL - UNAS  
Correo: [repositorio@unas.edu.pe](mailto:repositorio@unas.edu.pe)



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

## CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 126 - 2025 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

### CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Ingeniería en Industrias Alimentarias

Tipo de documento:

|       |   |                                    |  |
|-------|---|------------------------------------|--|
| Tesis | X | Trabajo de Suficiencia Profesional |  |
|-------|---|------------------------------------|--|

| TÍTULO  | AUTOR                             | PORCENTAJE DE SIMILITUD          |
|---|-----------------------------------|----------------------------------|
| DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE LOS GRANOS DE CAFÉ (Coffea arábica) VARIEDADES BOURBON Y CATIMOR A DIFERENTES TEMPERATURAS | HUAMANI RAMIREZ, AURELIO REYMUNDO | <b>23 %</b><br><b>Veintitrés</b> |

Tingo María, 05 de mayo de 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
UNIDAD DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

**Dr. Tomas Menacho Mallqui**  
JEFE

VICERRECTORADO DE INVESTIGACION  
OFICINA DE INVESTIGACION



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCION DEL  
TITULO UNIVERSITARIO, INVESTIGACIÓN DOCENTE  
Y TESISISTA

(Resol. N° 113-2019-CU-R-UNAS)

I. Datos Generales de Pregrado

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| <b>Universidad</b>               | : Universidad Nacional Agraria de la Selva.   |
| <b>Facultad</b>                  | : Ingeniería en Industrias Alimentarias.  |
| <b>Título de tesis</b>           | : Determinación de las propiedades termofísicas de los granos de café ( <i>coffea arábica</i> ) variedades Bourbon y Catimor a diferentes temperaturas. |
| <b>Autor</b>                     | : Huamani Ramírez, Aurelio Reymundo.  |
| <b>Asesor de tesis</b>           | : Roldan Carbajal, Williams   |
| <b>Escuela Profesional</b>       | : Industrias Alimentarias   |
| <b>Programa de investigación</b> | : Ingeniería de Alimentos.  |
| <b>Línea(s) de investigación</b> | : Procesos en Ingeniería de Alimentos.  |
| <b>Eje Temático</b>              | : Propiedades termofísicas de Alimentos.  |
| <b>Lugar de ejecución</b>        | : Universidad Nacional Agraria de la Selva.   |
| <b>Duración</b>                  | : Inicio : Marzo 2019<br>Término : Julio 2019   |
| <b>Financiamiento</b>            | : Propio : S/5,170.00   |

Tingo María, Perú, Abril 2023

A blue ink signature of Aurelio R. Huamani Ramírez, written in a cursive style.

Aurelio R. Huamani Ramírez  
Tesisista

A blue ink signature of Williams Roldan Carbajal, written in a cursive style.

Williams Roldan Carbajal  
Asesor

## **DEDICADO**

A Dios por darme la vida y las fuerzas de llegar a esta etapa y haberme dado la salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis hijos Iker Huamaní Torres y Cattaleya Huamaní Torres, por ser la razón de mi existencia y motor para continuar luchando por ser cada día mejor.

Con inmenso amor y cariño a mis padres María y Gualberto, así como a mis hermanos por ser el pilar fundamental de todo lo que soy, les agradezco por las palabras de motivación para llegar hasta donde estoy, brindándome siempre el amor y comprensión necesaria para lograr cada uno de los objetivos y metas trazadas.

## **AGRADECIMIENTO**

No hay en el mundo sentimiento mas sublime que el de la gratitud, por esa razón quiero expresar mi agradecimiento sincero y profundo a Dios todo poderoso, ser supremo y creador de todas las cosas, por haber puesto en mi toda la perseverancia y la sabiduría necesaria para llegar a esta etapa tan importante en mi vida.

Un agradecimiento especial a mi madre María Ramírez Copa y mi padre Gualberto Huamaní Mollo, que siempre me guían por el sendero correcto y su incomparable humildad, me demuestran amor y confianza para triunfar.

A mis hermanos Rosa, Elvira, Magdalena, Luz María, Esther, Josefina, Ramon , Luis y Héctor. Por ser mis compañeros de vida, mi apoyo y la inspiración de muchas de mis metas, pero sobre todo por velar por el bienestar de la familia.

A mi esposa Ruby Elizabeth torres Arcos, por ser la persona que esta a mi lado con su apoyo incondicional.

Al ing. Willians Carbajal Roldan, por el apoyo incondicional como asesor de tesis.

## ÍNDICE

|  | Página |
|--|--------|
| I. INTRODUCCIÓN .....  | 1      |
| II. REVISIÓN DE LITERATURA .....   | 4      |
| 2.1. Antecedentes .....  | 4      |
| 2.2. El café .....   | 6      |
| 2.2.1. Generalidades del café .....  | 6      |
| 2.2.2. Clasificación comercial del café .....  | 7      |
| 2.2.3. Denominaciones comerciales de los granos de café .....                              | 8      |
| 2.2.4. Torrefacción del café .....   | 9      |
| 2.3. Propiedades térmicas de los alimentos .....   | 10     |
| 2.3.1. Importancia .....   | 10     |
| 2.3.2. Principales propiedades térmicas o termofísicas .....                               | 11     |
| 2.3.3. Factores que afectan su medición .....  | 14     |
| III. MATERIALES Y MÉTODOS .....  | 16     |
| 3.1. Lugar de ejecución .....  | 16     |
| 3.2. Materia prima, materiales, reactivos y equipos .....                                  | 16     |
| 3.2.1. Materia prima .....   | 16     |
| 3.2.2. Materiales y reactivos .....  | 16     |
| 3.2.3. Equipos .....   | 17     |
| 3.3. Métodos de análisis .....   | 17     |
| 3.3.1. Determinación de las propiedades termofísicas .....                                 | 18     |
| 3.4. Metodología experimental .....  | 19     |
| 3.4.1. Característica de los granos de café pulido .....                                   | 19     |
| 3.4.2. Determinación de las propiedades termofísicas de los de<br>café .....               | 19     |
| 3.4.3. Característica fisicoquímica de los granos de café .....                            | 22     |
| 3.4.4. Acondicionamiento de la materia prima .....   | 22     |
| 3.4.5. Determinación de las propiedades termofísicas de los<br>granos de café .....        | 23     |
| 3.4.6. Validación del cilindro utilizado para hallar las<br>propiedades termofísicas ..... | 27     |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 3.5.   | Diseño experimental .....   | 29 |
| 3.6.   | Análisis estadístico .....  | 30 |
| IV.    | RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....  | 32 |
| 4.1.   | Características fisicoquímicas de los granos de café Bourbon y Catimor .....  | 32 |
| 4.1.1. | Características fisicoquímicas de los granos de café verde de las variedades Bourbon y Catimor .....  | 32 |
| 4.1.2. | Características fisicoquímicas de los granos de café tostado y molido de las variedades Bourbon y Catimor ..                                      | 35 |
| 4.2.   | Relación de las propiedades termofísicas de las variedades de granos de café tostado con la temperatura .....                                     | 37 |
| 4.2.1. | Difusividad térmica del café de las variedades Bourbon y Catimor .....  | 37 |
| 4.2.2. | Calor específico del café de las variedades Bourbon y Catimor .....   | 51 |
| 4.2.3. | Densidad del café de las variedades Bourbon y Catimor   | 56 |
| 4.2.4. | Conductividad térmica del café de las variedades Bourbon y Catimor .....  | 61 |
| 4.3.   | Ecuaciones que permitirán encontrar las propiedades termofísicas de las variedades de café en función a la temperatura y porcentaje de agua ..... | 71 |
| 4.3.1. | Ecuaciones de difusividad térmica .....   | 71 |
| 4.3.2. | Ecuación de calor específico .....  | 73 |
| 4.3.3. | Ecuación de densidad .....  | 73 |
| 4.3.4. | Ecuaciones de conductividad térmica .....   | 74 |
| V.     | CONCLUSIONES .....  | 75 |
| VI.    | PROPUESTAS A FUTURO .....   | 78 |
| VIII.  | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 79 |

## ÍNDICE DE TABLAS

| Tablas |  | Página |
|--------|--|--------|
| 1.     | Referencias de los métodos utilizados en los análisis químicos ....  | 15     |
| 2.     | Diseño experimental para la estimación de las propiedades termofísicas en granos de café .....   | 18     |
| 3.     | Característica fisicoquímica del café verde de las variedades Bourbon y Catimor .....  | 26     |
| 4.     | Característica fisicoquímica del café tostado y molido de las variedades Bourbon y Catimor .....                                       | 30     |
| 5.     | Difusividad térmica de la variedad Bourbon y Catimor con respecto a la temperatura con 50% agua y 50% café .....                       | 31     |
| 6.     | Difusividad térmica de la variedad Bourbon y Catimor con respecto a la temperatura con 60% agua y 40% café .....                       | 33     |
| 7.     | Difusividad térmica de la variedad Bourbon y Catimor con respecto a la temperatura con 70% agua y 30% café .....                       | 34     |
| 8.     | Difusividad térmica de la variedad Bourbon y Catimor con respecto a la temperatura con 80% agua y 20% café .....                       | 36     |
| 9.     | Valores de difusividad térmica de café de las variedades Bourbon y Catimor a diferentes temperaturas y contenido de agua .....         | 38     |
| 10.    | Análisis de varianza de difusividad térmica de café molido y tostado en función de la variedad, temperatura y porcentaje de agua ..... | 39     |
| 11.    | Comparaciones múltiples de difusividad térmica por variedad, temperatura y porcentaje de humedad mediante Tukey .....                  | 40     |
| 12.    | Coefficiente de regresión de difusividad térmica .....   | 42     |
| 13.    | Promedios de calor específico encontrado en función a la variedad de café, las temperaturas y cantidad de agua .....                   | 44     |
| 14.    | Análisis de varianza de calor específico de café molido y tostado en función de la variedad, temperatura y porcentaje de agua .....    | 44     |
| 15.    | Comparaciones múltiples de calor específico por variedad, temperatura y porcentaje de humedad mediante Tukey .....                     | 45     |
| 16.    | Coefficiente de regresión de calor específico .....  | 47     |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 17. | Promedios de densidad encontrado en función a la variedad de café, las temperaturas y cantidad de agua .....   | 48 |
| 18. | Análisis de varianza de densidad de café molido y tostado en función de la variedad, temperatura y porcentaje de agua .....  | 49 |
| 19. | Comparaciones múltiples de densidad por variedad, temperatura y porcentaje de humedad mediante Tukey .....   | 50 |
| 20. | Coefficiente de regresión de densidad .....  | 52 |
| 21. | Promedios de conductividad térmica encontrado en función a la variedad de café, las temperaturas y cantidad de agua .....  | 53 |
| 22. | Análisis de varianza de conductividad térmica de café molido y tostado en función de la variedad, temperatura y porcentaje de agua .....   | 58 |
| 23. | Comparaciones múltiples de conductividad térmica por variedad, temperatura y porcentaje de humedad mediante Tukey .....  | 59 |
| 24. | Coefficiente de regresión de conductividad térmica .....   | 61 |
| 25. | Ecuaciones que gobiernan la difusividad térmica de la variedad Bourbon en función a la temperatura .....   | 62 |
| 26. | Ecuaciones que gobiernan la difusividad térmica de la variedad Catimor en función a la temperatura .....   | 63 |
| 27. | Ecuación que gobierna la conductividad térmica (k) en función a la temperatura (T) en diferentes proporciones de agua y café de la variedad Bourbon (T se considera desde 60°C a 90°C) ..... | 64 |
| 28. | Ecuación que gobierna la conductividad térmica (k) en función a la temperatura (T) en diferentes proporciones de agua y café de la variedad Catimor (T se considera desde 60°C a 90°C) ..... | 65 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

| Figuras |   | Página |
|---------|---|--------|
| 1.      | Dimensiones del tubo de cobre utilizado para el experimento .....   | 16     |
| 2.      | Equipo que se utilizara para la obtención del perfil térmico .....  | 17     |
| 3.      | Esquema del cilindro material acero inoxidable AISI 304, cotas en mm .....  | 20     |
| 4.      | Esquema del equipo usado para determinar las propiedades termofísicas .....                                       | 20     |
| 5.      | Diseño experimental para determinar las difusividades térmicas de los granos de café .....                        | 24     |
| 6.      | Difusividad térmica de la variedad Bourbon con respecto a la temperatura con 50% agua y 50% café .....            | 32     |
| 7.      | Difusividad térmica de la variedad Catimor con respecto a la temperatura con 50% agua y 50% café .....            | 32     |
| 8.      | Difusividad térmica de la variedad Bourbon con respecto a la temperatura con 60% agua y 40% café .....            | 33     |
| 9.      | Difusividad térmica de la variedad Catimor con respecto a la temperatura con 60% agua y 40% café .....            | 34     |
| 10.     | Difusividad térmica de la variedad Bourbon con respecto a la temperatura con 70% agua y 30% café .....            | 35     |
| 11.     | Difusividad térmica de la variedad Catimor con respecto a la temperatura con 70% agua y 30% café .....            | 35     |
| 12.     | Difusividad térmica de la variedad Bourbon con respecto a la temperatura con 80% agua y 20% café .....            | 36     |
| 13.     | Difusividad térmica de la variedad Catimor con respecto a la temperatura con 80% agua y 20% café .....            | 37     |
| 14.     | Valores de difusividad térmica de café de la variedad Bourbon a diferentes temperaturas y contenido de agua ..... | 38     |
| 15.     | Valores de difusividad térmica de café de la variedad Catimor a diferentes temperaturas y contenido de agua ..... | 39     |
| 16.     | Gráfica de los efectos principales de difusividad térmica .....   | 41     |
| 17.     | Superficie de respuesta estimada de difusividad térmica .....   | 41     |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 18. | Contornos de la superficie de respuesta estimada de difusividad térmica .....                            | 42 |
| 19. | Gráfica de los efectos principales de calor específico .....   | 46 |
| 20. | Superficie de respuesta estimada de calor específico .....   | 46 |
| 21. | Contornos de la superficie de respuesta estimada de calor específico .....                               | 47 |
| 22. | Gráfica de los efectos principales de densidad .....   | 50 |
| 23. | Superficie de respuesta estimada de densidad .....   | 51 |
| 24. | Contornos de la superficie de respuesta estimada de densidad .....                                       | 51 |
| 25. | Conductividad térmica de la variedad Bourbon con respecto a la temperatura con 50% agua y 50% café ..... | 54 |
| 26. | Conductividad térmica de la variedad Bourbon con respecto a la temperatura con 60% agua y 40% café ..... | 54 |
| 27. | Conductividad térmica de la variedad Bourbon con respecto a la temperatura con 70% agua y 30% café ..... | 55 |
| 28. | Conductividad térmica de la variedad Bourbon con respecto a la temperatura con 80% agua y 20% café ..... | 55 |
| 29. | Conductividad térmica de la variedad Catimor con respecto a la temperatura con 50% agua y 50% café ..... | 56 |
| 30. | Conductividad térmica de la variedad Catimor con respecto a la temperatura con 60% agua y 40% café ..... | 56 |
| 31. | Conductividad térmica de la variedad Catimor con respecto a la temperatura con 70% agua y 30% café ..... | 57 |
| 32. | Conductividad térmica de la variedad Catimor con respecto a la temperatura con 80% agua y 20% café ..... | 57 |
| 33. | Gráfica de los efectos principales de conductividad térmica .....  | 60 |
| 34. | Superficie de respuesta estimada de conductividad térmica .....  | 60 |
| 35. | Contornos de la superficie de respuesta estimada de conductividad térmica .....                          | 61 |

## RESUMEN

Este estudio se centró en la evaluación de las propiedades termo físicas de los granos de café tostado y molido, considerando tres variables fundamentales: las variedades Bourbon y Catimor, un rango térmico comprendido entre 60 °C y 90 °C, y proporciones de agua del 50%, 60%, 70% y 80%. El objetivo general consistió en analizar el comportamiento termo físico de dichas variedades bajo condiciones controladas, con el propósito de establecer relaciones funcionales entre las propiedades térmicas y los factores experimentales evaluados. Como parte de los objetivos específicos, se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica tanto del café verde como del tostado, con el fin de comprender cómo sus atributos internos influyen en la respuesta térmica del sistema. Además, se examinó la incidencia de la temperatura y el contenido de humedad sobre las propiedades termo físicas, identificando patrones de variabilidad y tendencias significativas. Finalmente, se desarrollaron ecuaciones predictivas que permiten estimar dichas propiedades en función de las variables controladas, contribuyendo así al modelado matemático del proceso térmico.

Para la recolección de datos experimentales, se empleó el equipo DATA TRACE junto con sus accesorios y el software especializado, garantizando precisión y repetibilidad en las mediciones realizadas sobre muestras de café molido previamente acondicionadas según la metodología establecida. Los parámetros termo físicos determinados incluyeron la difusividad térmica, el calor específico, la densidad aparente y la conductividad térmica, todos ellos esenciales para comprender la dinámica de transferencia de calor durante el procesamiento industrial del café.

Los resultados obtenidos de estas propiedades evidencian su dependencia respecto de la temperatura y la humedad, más allá de la identidad varietal. Este trabajo representa un aporte relevante para el diseño de operaciones agroindustriales más eficientes, particularmente en los procesos de secado y tostado, donde la gestión térmica precisa es clave para asegurar la calidad del producto final.

**Palabras clave:** Coffea arábica, Cafeto, Conductividad térmica, Calor específico, Propiedad.

## **A Determination of the Thermophysical Properties of the Bourbon and Catimor Varieties of Coffee Beans (*Coffea arabica*) at Different Temperatures**

### **Abstract**

The thermophysical properties of roasted and ground coffee beans were researched. They were studied as a function of three variables, with the first being the varieties, [which were] Bourbon and Catimor; the second variable was the temperatures, [which were] 60°C, 70°C, 80°C, and 90°C ; and the third was the percentages of water [which were] 50%, 60%, 70%, and 80%. The general motive was to determine the thermophysical properties of the Bourbon and Catimor varieties of the coffee beans, and the specific motives were to determine the physicochemical characteristics of the green and roasted coffee beans; to determine the relationship between the thermophysical properties of the coffee beans and the temperature and moisture; and to determine the equations which allowed for the thermophysical properties of the coffee beans to be found as a function of the temperature.

DATA TRACE was used with all of its accessories, and with the software for collecting the data from the ground coffee; correctly conditioned according to the methodology and the experimental design.

The thermal diffusivity, specific heat, density, and thermal conductivity were able to be determined, but previously, the physicochemical characterization of the green and roasted coffee beans was done. The relationships that existed between the thermophysical properties and the varieties, temperature, and proportion of water were established; establishing the equations which allowed for the determination of these properties.

**Keywords:** *Coffea arabica*, coffee plant, thermal conductivity, specific heat, property

## I. INTRODUCCIÓN

Para gestionar de manera sistemática y controlada los procesos de transferencia de calor durante la transformación agroindustrial de alimentos, resulta esencial el conocimiento detallado de sus propiedades termofísicas. Términos como conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico no son solo conceptos técnicos, sino herramientas fundamentales que posibilitan tanto el diseño como la simulación de operaciones térmicas en el ámbito de la ingeniería de alimentos (Fellows, 1988). Estas propiedades constituyen parámetros críticos para modelar fenómenos como el enfriamiento, el calentamiento, el secado y la congelación —procesos que, aunque aparentemente mecánicos, están profundamente mediados por las características fisicoquímicas del material sometido a tratamiento.

En el caso particular de la industrialización del café, este tipo de conocimiento cobra una relevancia aún mayor. La comprensión precisa de las propiedades termofísicas permite realizar balances energéticos adecuados, diseñar procesos eficientes y seleccionar equipos con capacidad conductiva óptima, todo ello con el propósito explícito de preservar y potenciar la calidad final del producto. Dicha calidad constituye un factor diferenciador en el mercado internacional, condicionada por múltiples variables: entre ellas, la variedad del grano, el tipo de suelo, el clima, las prácticas agrícolas y de poscosecha, así como el método de torrefacción aplicado. No obstante, más allá de estos factores convencionales, el proceso de beneficiado adquiere un rol central en la conformación de perfiles específicos del café verde. Así, por ejemplo, se ha observado que los cafés obtenidos mediante procesamiento seco tienden a desarrollar un cuerpo más denso y consistente, mientras que aquellos preparados bajo métodos húmedos destacan generalmente por su perfil aromático y mayor aceptación sensorial, según reportan Alvis et al. (2012).

El secado del café, etapa crítica dentro del proceso poscosecha, tiene como finalidad principal la reducción del contenido de humedad del grano (~12% en base seca), con el objeto de evitar procesos degenerativos y facilitar su manejo comercial e industrial. Esta operación puede realizarse mediante fuentes de energía solar o sistemas mecánicos basados en convección forzada. Aunque el secado solar es ampliamente predominante en

unidades productivas pequeñas, persiste una laguna significativa en cuanto al conocimiento de las propiedades termofísicas del sistema durante esta fase (Alvis et al., 2012). Esta brecha limita la posibilidad de optimizar el proceso desde una perspectiva teórica y operativa, afectando potencialmente la uniformidad de la temperatura y la distribución interna del agua en el grano.

Una vez concluidas las etapas iniciales de beneficiado, los granos de café entran en una fase de transformación donde las propiedades termofísicas adquieren un papel protagónico. El tostado, en especial, exige condiciones térmicas precisas y un monitoreo constante del comportamiento del grano frente al intercambio de calor. En este contexto, dichas propiedades permiten evaluar la dinámica de transferencia de energía en régimen transitorio, lo cual es fundamental para la regulación de tiempos y temperaturas ideales. Factores como el contenido de humedad, la composición química del grano y la variedad cultivada inciden directamente en la eficiencia de estas operaciones, y por ende, en la calidad del café tostado (González y Vargas, 1987).

La agroindustria cafetalera, al diversificar formas de presentación del producto, contribuye al aumento de su valor agregado. No obstante, este valor no se genera únicamente en la fase de comercialización, sino que está profundamente ligado a las operaciones intermedias de procesamiento térmico. El secado y el tostado, en este sentido, no pueden entenderse de forma aislada, sino como procesos guiados por las propiedades termofísicas del café, las cuales reflejan variaciones en la textura, la humedad intrínseca y la composición química del grano. Por ello, resulta imperativo avanzar hacia estudios específicos capaces de medir y modelar estas propiedades de manera precisa y en función de la temperatura, tal como proponen Rodríguez y López (2009).

Estas propiedades —la difusividad térmica, la conductividad térmica y el calor específico— son, además, esenciales para calcular cargas y flujos térmicos, identificar puntos críticos en los distintos procesos, así como evaluar y comparar la eficiencia energética de equipos e instalaciones industriales. Más allá de su utilidad operativa, también funcionan como indicadores de calidad de la materia prima y del producto terminado, revelando su estado estructural, su respuesta térmica y su potencial rendimiento sensorial (Alvarado, 2006).

En función de lo anterior, esta tesis se planteó los siguientes objetivos:

- Determinar las características fisicoquímicas de los granos de café Bourbon y

Catimor.

- Determinar las propiedades termofísicas de granos de café de las variedades Bourbon y Catimor.
- Determinar la relación de las propiedades termofísicas de los granos de café con la temperatura y la humedad.
- Determinar las ecuaciones que permitirán encontrar las propiedades termofísicas de los granos de café en función a la temperatura.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Antecedentes

Huaman et al. (2016) abordaron empíricamente la relación entre variables térmicas y características físicas del grano en su estudio sobre la difusividad térmica en cultivos andinos. La investigación, centrada en la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) y la cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen), propuso un procedimiento metodológicamente accesible para determinar el comportamiento de esta propiedad térmica fundamental. A través de un diseño experimental que consideró temperaturas controladas entre 25 y 35 °C y contenidos de humedad del 10 al 20 % en base húmeda, los autores observaron que la difusividad térmica ( $\alpha$ ) presentó valores que variaron de 7,5 a  $8,9 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s. Este rango evidenció no solo la sensibilidad de esta propiedad a las condiciones de temperatura y humedad, sino también la influencia intrínseca del tipo de grano. Dichos hallazgos resultan significativos, ya que permiten comprender cómo pequeñas variaciones en el contenido de agua o en la temperatura ambiente pueden modificar la eficiencia con la que los granos conducen el calor, lo que tiene implicaciones directas en los procesos de secado y almacenamiento.

En esa misma línea de análisis termofísico, Fernando y Guevara (2012) realizaron un estudio experimental enfocado en caracterizar tres propiedades térmicas —la difusividad térmica, el calor específico y la conductividad térmica— en jugos de fique de las variedades Uña de Águila y Negra Común. El enfoque comparativo reveló que, en el caso de la difusividad térmica, los valores oscilaron entre  $1,426 \times 10^{-7}$  y  $1,609 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s para la variedad Uña de Águila, y entre  $1,429 \times 10^{-7}$  y  $1,612 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s para la variedad Negra Común, dentro de un rango térmico de 20 a 65 °C. En cuanto al calor específico —una propiedad crítica para el diseño de procesos térmicos debido a su relación con la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura del material— se obtuvieron valores entre 4079,1 y 4149,5 J/kg·°C para la Uña de Águila y entre 4091,1 y 4157,6 J/kg·°C para la Negra Común, en un intervalo de 10 a 80 °C. La conductividad térmica, a su vez, mostró variaciones entre 0,587 y 0,718 W/m·°C para Uña de Águila, y de 0,589 a 0,719 W/m·°C para Negra Común, abarcando un amplio rango térmico de 5 a 80 °C. El tratamiento analítico de estos datos permitió a los autores desarrollar modelos

matemáticos que predican con fiabilidad el comportamiento térmico del jugo de fique según la temperatura.

Vásquez (2018) llevó a cabo un estudio enfocado en la difusividad térmica de la pulpa de aguaje (*Mauritia flexuosa* L. F.), con el objetivo de evaluar cómo esta propiedad varía en función de la temperatura y del contenido de agua. El trabajo experimental se desarrolló en los laboratorios de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, donde se analizaron muestras de pulpa bajo diferentes condiciones de dilución acuosa y rangos térmicos comprendidos entre 40 °C y 80 °C. Los resultados del estudio permitieron derivar una expresión matemática que modela la relación entre la difusividad térmica, la temperatura y el porcentaje de agua añadida. Esta ecuación ofrece una herramienta útil para predecir el comportamiento térmico de la pulpa de aguaje durante procesos de calentamiento o enfriamiento, lo cual es crucial para optimizar operaciones como la pasteurización, deshidratación o congelación de este fruto amazónico. Desde un punto de vista técnico, el estudio contribuye al conocimiento de las propiedades termo-físicas de alimentos tropicales poco estudiados, y resalta cómo pequeñas variaciones en el contenido de humedad pueden alterar significativamente la capacidad del alimento para conducir calor:  $\alpha (T, P) = -8,173 * 10^{-8} + 4,413 * 10^{-9}T + 3,41 * 10^{-9}P$   
 Dónde: T es la temperatura en °C y P es el porcentaje de agua diluida en la pulpa del aguaje.

Bairi et al. (2007) propusieron un método práctico para determinar la difusividad térmica efectiva en alimentos, basado en el seguimiento de los cambios de temperatura en el centro geométrico de las muestras durante los procesos térmicos de calentamiento y enfriamiento. Su enfoque se fundamenta en el uso de funciones de transferencia, una herramienta matemática que simplifica el comportamiento dinámico del sistema al suponer que la conducción es el único mecanismo relevante de transferencia de calor. Para ello, las muestras se conceptualizaron como sistemas de primer orden caracterizados por una ganancia unitaria, un tiempo muerto (L) y una constante de tiempo (T), parámetros obtenidos siguiendo el modelo descrito por Glavina et al. (2006). Este tratamiento permite ajustar el modelo a datos reales, facilitando una estimación indirecta de la difusividad térmica en función del comportamiento térmico observable.

Erdogdu et al. (2014), en un intento por optimizar la exactitud de este tipo de mediciones, desarrollaron una técnica experimental más robusta, respaldada por métodos

numéricos. El procedimiento mostró mejoras notables en la estimación de la difusividad térmica, alcanzando un margen de error de apenas 1 % y una precisión del 0,7 %, lo que lo hace altamente confiable, especialmente a un nivel de confianza del 95 %. Un hallazgo destacado del estudio fue que el uso de muestras cilíndricas con radios mayores mejora la precisión cuando se trata de materiales con difusividades térmicas elevadas, ya que se incrementa la sensibilidad del sistema al calor transferido.

Por su parte, Domeneghini et al. (2011) llevaron a cabo un análisis integral de las propiedades físicas de las pulpas de acerola y arándano, con especial énfasis en características relevantes para la ingeniería de alimentos. La densidad fue medida mediante el método del picnómetro, la conductividad eléctrica con un conductímetro, y la difusividad térmica se calculó a partir de una solución analítica de la ecuación de difusión del calor, lo que implica un enfoque teórico basado en condiciones ideales. Asimismo, el calor específico se determinó con un método de mezclas modificado, y la conductividad térmica se obtuvo a partir de la combinación de las propiedades anteriores, destacando la interrelación entre estas variables. Los resultados revelaron que la densidad de la pulpa de acerola varió entre 0,97 y 1,03 kg/m<sup>3</sup>, y la del arándano entre 0,98 y 1,05 kg/m<sup>3</sup>, dentro de un rango de temperatura de 303 K a 353 K. Estas variaciones, aunque pequeñas, son relevantes para los procesos térmicos, ya que afectan la forma en que el calor se distribuye dentro del producto durante su procesamiento.

## **2.2. El café**

### **2.2.1. Generalidades del café**

Gonzales y Vargas (1987) señalan que el café, además de ser una de las bebidas con mayor consumo global, destaca por su extraordinaria complejidad como producto natural. Esta complejidad no solo se refleja en su historia y comercio internacional, sino también en su rica y variada composición química, que incluye compuestos como ácidos orgánicos, cetonas, aldehídos, ésteres, lípidos, cafeína, aminoácidos, carbohidratos, proteínas, minerales y otros elementos como la trigonelina y los glucósidos. Estos componentes influyen directamente en las propiedades sensoriales del café: su sabor se compone de más de 400 compuestos distintos, mientras que su aroma característico se forma a partir de más de 600 sustancias, muchas de ellas presentes en cantidades extremadamente pequeñas. Esta diversidad química explica por qué el café puede ofrecer

una gama tan amplia de perfiles de sabor y aroma, lo que lo convierte en un producto particularmente valorado por consumidores y expertos catadores.

Por otro lado, Gonzales y Rugeles (1988) destacan que, para que el café alcance su máximo potencial como bebida aromática y estimulante, es necesario cumplir con seis pasos fundamentales en su procesamiento: torrefacción, enfriamiento, desgasificación, molienda, almacenamiento y la correcta preparación de la infusión. Cada una de estas etapas influye significativamente en la conservación de los compuestos volátiles y en el desarrollo del sabor, por lo que un manejo inadecuado podría comprometer la calidad final del producto. Por ejemplo, una mala torrefacción podría degradar componentes clave del aroma o generar sabores indeseables.

Lingle (2015) agrega que el valor del café no radica tanto en su contenido nutricional, sino en sus propiedades sensoriales (organolépticas), sus efectos estimulantes debido a la cafeína y ciertos beneficios medicinales. A nivel económico, se trata de una industria global de gran impacto, ocupando el tercer lugar entre los cultivos vegetales más comercializados, solo por detrás de los aceites vegetales y los cereales como el trigo. Se estima que la actividad cafetera genera ingresos superiores a los 55 mil millones de dólares anuales y emplea a más de 20 millones de personas en el mundo. No obstante, una paradoja relevante es que los productores, quienes se enfrentan a los mayores riesgos del cultivo, reciben solo una pequeña parte de este volumen económico, alrededor de 7 mil millones de dólares, lo cual pone en evidencia la desigualdad en la cadena de valor del café.

### **2.2.2. Clasificación comercial del café**

Según Lingle (2015), en el ámbito comercial, los cafés se agrupan principalmente en dos grandes categorías: Arábicos y Robustos. Esta clasificación se basa tanto en características botánicas como en los métodos de procesamiento utilizados, lo que influye directamente en la calidad sensorial del café.

Dentro del grupo de los Arábicos, se distinguen dos subcategorías importantes:

- **Arábicos suaves-lavados:** Estos cafés son procesados mediante un método húmedo, en el que se utiliza agua para eliminar la pulpa o mucílago del grano. Este proceso incluye varias etapas: descerezado, despulpado, fermentación, lavado y secado, dando como resultado un producto conocido como café pergamino. Este tipo de café se caracteriza por tener un sabor más limpio y una

acidez brillante. Países como Colombia, Kenia y Tanzania son reconocidos por producir este tipo de café de alta calidad. También se encuentran en otros países de América Latina, el Caribe, África, Asia y Oceanía, como México, Guatemala, Perú, Ruanda, India y Australia, entre otros.

- **Arábicos no lavados:** También llamados cafés naturales, estos no utilizan agua en el proceso de eliminación de la pulpa. En lugar de ello, el grano se seca al sol con la pulpa adherida y, una vez seco, se retira la cáscara mediante trillado. Este método es tradicional en regiones como Brasil y Etiopía. Los cafés obtenidos por este método suelen tener sabores más intensos y afrutados, aunque con menor limpieza en taza que los lavados.

La segunda categoría corresponde a los Robustos, una variedad que se cultiva principalmente en Vietnam, Indonesia, varios países africanos y también en Brasil, donde se les conoce como Conilon. Estos cafés son mayoritariamente procesados por vía seca, es decir, sin el uso de agua. A diferencia de los Arábicos suaves, los Robustas tienen una calidad sensorial inferior, pero destacan por su mayor contenido de cafeína, resistencia a enfermedades y facilidad de cultivo, lo que los hace ideales para mezclas industriales, especialmente en cafés instantáneos o espresso. Aunque algunos Robustas se procesan por vía húmeda, su calidad aún no alcanza el nivel de los Arábicos y, por ello, no suelen ser tan valorados en el mercado.

En términos generales, los Arábicos suaves lavados son los más cotizados internacionalmente debido a su perfil sensorial más complejo, con aromas delicados, acidez marcada y buen cuerpo, características que los hacen destacar en el mercado de cafés especiales.

### **2.2.3. Denominaciones comerciales de los granos de café**

Según Lingle (2015), en la industria cafetalera existen diversas denominaciones comerciales que identifican las distintas etapas del grano de café durante su procesamiento. Estas denominaciones ayudan a estandarizar el lenguaje técnico y comercial entre productores, compradores y consumidores:

- **Café cereza:** Este término se utiliza para describir el fruto del cafeto justo después de su recolección, antes de que se inicie cualquier proceso de beneficio. En esta etapa, el fruto conserva todas sus capas externas (piel, pulpa y mucílago) y presenta un aspecto similar al de una cereza, de ahí su nombre.

- **Café almendra o grano de café:** Se refiere a la semilla del fruto del café una vez que se le han retirado todas sus capas externas, es decir, el exocarpo (cáscara), mesocarpo (pulpa) y endocarpo (pergamino). Este es el grano que se comercializa como café verde y que posteriormente será tostado.
- **Café pergamino:** En esta fase, el grano aún está recubierto por el endocarpo, conocido comúnmente como pergamino. Es el estado intermedio entre la café cereza y el café almendra, y suele almacenarse en este formato antes de la trilla, ya que el pergamino protege al grano de factores externos.
- **Café pulido:** Se trata del grano de café verde que ha pasado por una etapa adicional de limpieza mecánica para eliminar la película plateada (tegumento) que recubre el grano, lo que mejora su apariencia y homogeneidad. Este proceso es común en cafés de alta calidad destinados a exportación.
- **Café tostado:** Es el producto final, obtenido tras someter el grano verde a un proceso de tostación térmica. En esta etapa, el café adquiere su característico aroma, sabor y color, quedando listo para su molienda y preparación como bebida.

#### 2.2.4. Torrefacción del café

Gonzales y Rugeles (1988) destacan que, dentro de la tecnología del café, la torrefacción constituye una de las etapas más críticas posteriores a la cosecha. Durante este proceso, se generan y estabilizan los compuestos orgánicos que confieren al café su característico aroma, así como aquellos responsables del sabor y olor propios de la bebida obtenida a partir de los granos tostados.

En términos operativos, la torrefacción implica calentar uniformemente el café crudo, requiriendo aproximadamente 295 kilocalorías por kilogramo de producto. Para asegurar un calentamiento homogéneo, los granos se mantienen en movimiento constante mediante dispositivos mecánicos. Esta agitación permite que las transformaciones físicas (como el cambio de color y textura) y las reacciones fisicoquímicas ocurran de manera uniforme en toda la masa de café.

El proceso se mantiene hasta que se alcanza el nivel deseado de coloración, momento en el cual se detiene el calentamiento y se procede a un enfriamiento rápido de los granos. Esta etapa, conocida como “quenching”, se lleva a cabo utilizando corrientes

de aire, con o sin la adición de agua pulverizada, para detener bruscamente las reacciones térmicas.

Cabe señalar que la torrefacción no solo implica fenómenos de transferencia de calor y masa, sino también una serie de reacciones químicas complejas. En sistemas avanzados como los tostadores de lecho fluido, también intervienen principios de la mecánica de fluidos, añadiendo un componente hidrodinámico al proceso.

## **2.3. Propiedades térmicas de los alimentos**

### **2.3.1. Importancia**

Las propiedades térmicas de los alimentos constituyen parámetros esenciales para realizar cálculos precisos en los procesos de calentamiento, enfriamiento y congelación, siendo además fundamentales para el diseño de equipos y operaciones dentro de la ingeniería de alimentos (Alvis et al., 2010). No obstante, su determinación no siempre resulta sencilla, ya que diferentes técnicas de medición pueden arrojar resultados no completamente coincidentes.

De acuerdo con Alvis et al. (2010) y Singh y Heldman (2004), la comprensión y aplicación de estas propiedades resulta crucial por varias razones:

- Permiten estimar las velocidades de transferencia de calor en diversas condiciones térmicas.
- Son determinantes para el diseño eficiente de equipos adaptados a la gran diversidad de productos alimenticios.
- Facilitan la modelación y optimización de procesos térmicos, mejorando así la eficiencia y calidad del procesamiento.

Estas propiedades permiten predecir el comportamiento térmico de los alimentos, como la rapidez con la que se enfrían o calientan durante los tratamientos térmicos (Singh y Heldman, 2004). Con los avances actuales en técnicas analíticas, se ha vuelto posible detectar variaciones muy pequeñas de estas propiedades en función del tiempo, la temperatura y la localización específica del alimento en procesos como la congelación, lo cual resalta la necesidad de datos más precisos y detallados (Alvis et al., 2010).

El desarrollo de nuevas tecnologías de medición de composición alimentaria también ha potenciado el interés por entender cómo características como la temperatura, densidad, composición y porosidad afectan las propiedades térmicas. En un escenario

ideal, se podrían predecir estas propiedades a partir de dichos parámetros, adaptando los procesos a cada tipo de alimento (Singh y Heldman, 2004).

Además, la creciente disponibilidad de nuevos productos alimenticios —muchos de los cuales no existían anteriormente— ha incrementado la demanda de información específica sobre sus propiedades térmicas, lo que representa un reto constante para la investigación y la innovación en la industria alimentaria.

### **2.3.2. Principales propiedades térmicas o termo físicas**

En el campo de la ingeniería de alimentos, las propiedades térmicas más significativas incluyen la conductividad térmica, el calor específico, la difusividad térmica, la entalpía, la densidad y el coeficiente de transferencia de calor convectivo o superficial. Estas propiedades permiten modelar y optimizar los procesos de transferencia de calor durante el calentamiento, enfriamiento o congelación de productos alimenticios.

Una de las más relevantes es la conductividad térmica, que representa la capacidad de un material para conducir calor a través de su estructura (Alvis et al., 2010). En el caso de los alimentos, esta propiedad no solo depende de su composición química —como el contenido de agua, grasa o aire—, sino también de factores físicos como el grado de homogeneidad, la presencia de espacios vacíos, la forma, el tamaño de las partículas y, en el caso de alimentos fibrosos como la carne, la orientación de las fibras, que influye directamente en el flujo térmico (Singh y Heldman, 2004).

La conductividad térmica resulta crítica para calcular la velocidad a la que el calor se transfiere dentro del alimento, lo que permite diseñar con mayor precisión los procesos térmicos. Por ejemplo, en el caso de un alimento con forma de tableta, Alvis et al. (2010) proponen el siguiente modelo matemático para calcular la cantidad de calor ( $q$ ) que fluye a través de un área de transferencia ( $A$ ) con espesor ( $L$ ):

$$q = \frac{A \cdot K \cdot (T_1 - T_2)}{L}$$

Donde:

$q$  = cantidad de flujo de calor (W)

$A$  = área de transferencia de calor del alimento ( $m^2$ )

$k$  = conductividad térmica ( $W/m^\circ C$ )

$T_1$  = temperatura registrada en la superficie del alimento  $t_1$  ( $^\circ C$ )

$T_2$  = temperatura registrada en la misma superficie del alimento  $t_2$  ( $^\circ C$ )

$L$  = espesor del alimento considerado como medio conductor (m)

Según Alvis et al. (2010), el calor específico es una propiedad térmica fundamental que expresa la cantidad de energía requerida para elevar la temperatura de una unidad de masa de un material en un grado Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) o Kelvin (K). En el ámbito de la ingeniería de alimentos, esta propiedad es esencial para diseñar y controlar procesos térmicos como la cocción, congelación, pasteurización o enfriamiento. Para un alimento con masa  $M$ , el calor ( $Q$ ) necesario para elevar su temperatura desde un valor inicial ( $T_1$ ) hasta uno final ( $T_2$ ) puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$Q = C_p M (T_2 - T_1)$$

Siendo:

Donde:

$C_p$  = calor específico (KJ/kg $^{\circ}\text{C}$ )

$M$  = masa del alimento (kg)

$Q$  = cantidad de calor aplicado (KJ)

$T_2$  = temperatura del alimento en la superficie a un tiempo dado  $t_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_1$  = temperatura del alimento en la superficie a un tiempo dado  $t_1$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

El calor específico de una mezcla puede estimarse con base en los valores individuales de cada uno de sus componentes, ponderados según su proporción en la mezcla. Esta propiedad, representada como  $C_p$  cuando se considera a presión constante, es particularmente relevante en el diseño térmico de procesos alimentarios. En el caso de los gases, resulta necesario distinguir entre el calor específico a presión constante  $C_p$  y el calor específico a volumen constante  $C_v$ , ya que ambos intervienen en distintas aplicaciones termodinámicas (Singh y Heldman, 2004; Alvis et al., 2010).

Una propiedad térmica complementaria y esencial es la difusividad térmica, que integra la capacidad de un material para conducir calor con su capacidad de almacenarlo. En términos físicos, se define como la razón entre la conductividad térmica  $k$  y el producto de la densidad  $\rho$  y el calor específico  $C_p$ :

La difusividad térmica se define mediante la fórmula:

$$a = \frac{k}{\rho \cdot C_p}$$

Donde:

$k$  = conductividad térmica ( $\text{W/m}^\circ\text{K}$ )

$\rho$  = densidad ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_p$  = calor específico ( $\text{J/kg}^\circ\text{K}$ )

El valor de la difusividad térmica  $\alpha$  indica la rapidez con la que el calor se propaga a través de un material. Esta propiedad es particularmente sensible a la composición del alimento, influyendo factores como el contenido de agua, la estructura interna y la temperatura del producto. Aunque durante procesos térmicos como la pasteurización o la esterilización la composición global del alimento puede mantenerse relativamente constante, los cambios inducidos por el calor en la estructura física y la distribución de fases modifican significativamente el valor de  $\alpha$ . Estos cambios afectan la eficiencia del proceso y, por tanto, deben ser considerados en el diseño y control de operaciones térmicas en la industria alimentaria. (Singh y Heldman, 2004).

En términos generales, la difusividad térmica es una propiedad clave para estimar la velocidad de transferencia de calor en alimentos sólidos. Su valor se determina mediante la razón entre la conductividad térmica y el producto del calor específico y la densidad del material (Singh y Heldman, 2004).

Por su parte, el coeficiente de transferencia de calor convectivo o de superficie no es una propiedad intrínseca del alimento ni de ningún otro material, pero resulta indispensable para cuantificar la velocidad con la que el calor se transfiere por convección hacia o desde la superficie de un objeto (Alvis et al., 2010). Este coeficiente es especialmente relevante en el diseño y análisis de procesos de calentamiento y enfriamiento de alimentos. De acuerdo con la Ley de Enfriamiento de Newton, actúa como una constante de proporcionalidad que relaciona el flujo de calor con la diferencia de temperatura entre la superficie del alimento y el fluido circundante.

El valor del coeficiente de transferencia de calor convectivo ( $h_s$  o  $h_e$ ) depende de múltiples factores, entre los que se incluyen la velocidad del fluido, sus propiedades

físicas (como viscosidad y conductividad térmica), la forma y textura de la superficie del alimento, así como la diferencia de temperatura entre el medio externo y el producto alimenticio (Alvis et al., 2010).

La Ley de Enfriamiento de Newton se expresa mediante la ecuación:

$$q = h_s \cdot A \cdot (T_i - T_s)$$

Donde:

$q$  = cantidad de flujo de calor (W)

$h_s$  = coeficiente de calor convectivo de superficie (W/m<sup>2</sup>°C)

$A$  = área de transferencia de calor del alimento (m<sup>2</sup>)

$T_s$  = temperatura del alimento en la superficie (°C)

$T_i$  = temperatura inicial del alimento (°C)

La densidad se define como la relación entre la masa y el volumen de un material, expresada comúnmente en unidades de kg/m<sup>3</sup>. Esta propiedad física es de gran relevancia en la ingeniería de alimentos, ya que afecta directamente a parámetros térmicos fundamentales como la capacidad calorífica, la conductividad y la difusividad térmicas. En consecuencia, su conocimiento es indispensable para modelar procesos de transferencia de calor y diseñar operaciones térmicas en productos alimenticios (Alvis et al., 2010; Singh y Heldman, 2004).

### 2.3.3. Factores que afectan su medición

Cada propiedad térmica de los alimentos se ve influenciada por múltiples factores durante su medición, entre los cuales destacan el contenido de humedad, la temperatura, la composición general y los constituyentes específicos del alimento (Alvis et al., 2010). De acuerdo con Singh y Heldman (2004), estos constituyentes afectan de manera diferenciada cada propiedad térmica, dependiendo del tipo de alimento, dada la amplia variabilidad y complejidad inherente a los productos alimenticios.

Entre los principales **constituyentes** que conforman los alimentos se incluyen:

- **Proteínas:** albúmina, caseína, suero de leche, proteínas cárnicas y gluten.
- **Lípidos:** aceite vegetal, manteca de cerdo, aceite de maíz y grasa láctea.
- **Carbohidratos:** dextrosa, lactosa, sacarosa y almidón.

- **Fibras y cenizas:** celulosa, pectina y minerales residuales.

La determinación de propiedades térmicas resulta más efectiva cuando se realiza bajo condiciones específicas del proceso, empleando modelos matemáticos ajustados al tipo de alimento. No obstante, muchos modelos presentan limitaciones para predecir con precisión estas propiedades en un amplio rango de temperaturas y composiciones. Entre los factores con mayor incidencia se encuentran las variaciones de temperatura y las características estructurales del producto, lo que complica la predicción exacta de las velocidades de transferencia de calor.

Por ejemplo:

- **Composición:** en alimentos porosos como la harina, un incremento en el contenido de humedad modifica la estructura interna, aumentando la porosidad y reduciendo la conductividad térmica.
- **Temperatura:** al descender la temperatura, especialmente por debajo de 0 °C, la conductividad térmica aumenta debido a la formación de hielo, el cual posee una mayor capacidad de conducción térmica que el agua. Esto se observa en alimentos congelados como carnes, donde se registra un incremento en la conductividad térmica.

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Lugar de ejecución**

El presente estudio se llevó a cabo en la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), ubicada en la ciudad de Tingo María, región Huánuco. La zona se caracteriza por un rango de temperatura ambiental que varía entre 17 °C y 35 °C, y presenta una humedad relativa promedio del 83,5 %. Las actividades experimentales se desarrollaron en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería de los Alimentos y del Laboratorio de Harinas y Panificación de la Facultad de Industrias Alimentarias (FIIA). La institución se encuentra situada a una altitud de 660 metros sobre el nivel del mar (msnm), con coordenadas geográficas de 09°17'08" de latitud sur y 75°59'52" de longitud oeste, dentro del distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, en la región Huánuco.

#### **3.2. Materia prima, materiales, reactivos y equipos**

##### **3.2.1. Materia prima**

Para el estudio se utilizaron granos de café (*Coffea arabica*) de dos variedades: Bourbon y Catimor, los cuales se recolectaron en los cafetales de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, ubicados en la zona de La Divisoria, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco. Esta zona se localiza en las coordenadas geográficas 09°06'15" de latitud sur y 75°51'00" de longitud oeste.

##### **3.2.2. Materiales y reactivos**

**Materiales:** Bandejas de acero inoxidable; Cilindros de acero inoxidable de dimensiones, longitud: 200 mm por diámetro: 30,10 mm; Mesa de acero inoxidable; Crisol y lunas de reloj; Material aislante (teflón, corcho, cinta aislante); Matraz marca SCHOTT de 500,1000 mL; Papel tisú; Pinza de metal; Probeta marca KIMAX de 100, 200, 300, 400, 500 mL; Pipeta marca SCHOTT de 0,5; 5; 10 mL; Tapones de jebe para los extremos del cilindro; Vasos de precipitación marca BOECO de 100, 200, 300, 400, 500, 1000 mL; Campana de vidrio marca CSN-CIMAX (desecador), Vasos de precipitado, marca MARIENFELD, volumen de 100, 250, 400, 500 ML c/u, made in Germany; Soporte de fierro para el tubo de acero.

**Reactivos:** Hidróxido de sodio (NaOH) 0,1 N; Indicador de fenolftaleína 1%; Buffer acetato de sodio 0,1 M pH 4,5; Buffer acetato de sodio 1M pH 5.

### 3.2.3. Equipos

Balanza analítica electrónica OHAUS, modelo AP210s serial number 113032314, Sensibilidad 0,0001 g EEUU; Computadora instalada con programade "DATA TRACE" FOR WINDOWS DATATRECE micropack serial number M3T12677, model 7500T1, rango -20 To +140 DEGREES C, DATATRECE micropack serial number M3T11776, part number 12752823-501, model 7500T2, rango -20 To +140 DEGREES C, USA; Tostadora eléctrica de acero inoxidable de 3 litros de capacidad; Estufa tipo LP 201/AL con temperatura hasta 200; Equipo de titulación para medir la acidez (bureta autoenrrasable de 10 mL), marca de bureta; pipetas, marca MSARIENFLED, tolerancia 0,1 mL volumen 10mL, made in Germany; Picnómetro o matraz aforado de 100 mL clase A PIREX; Potenciómetro, marca SCHOTT, modelo CG840, digital, rango de pH 0 a 14, made in USA; Refractómetro de mesa, marca QUIMUS: graduado de 0% a 100% de sacarosa, made in Brasil; Refrigeradora marca ELECTROLUX modelo Firgidaire Frost free, Canadá; Sensores térmicos "DATA TRACE"; Colorímetro digital KONICA MINOLTA CR-410.

### 3.3. Métodos de análisis

Los métodos empleados para la caracterización fisicoquímica y de los productos derivados de los granos de café se describen en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Referencias de los métodos utilizados en los análisis químicos.

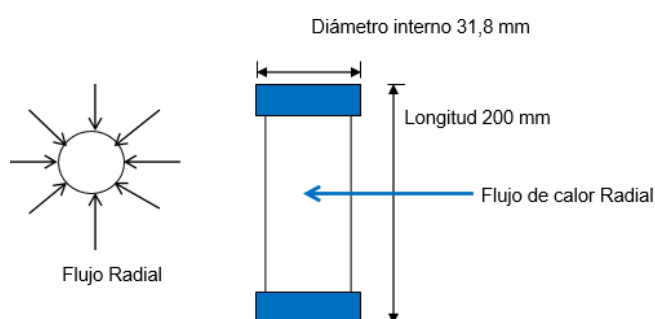
| Análisis                      | Muestra             | Métodos  |
|-------------------------------|---------------------|--|
| Humedad                       | Café pulido o verde | En estufa a presión atmosférica. Método de la A.O.A.C. N° 925.09.                |
| Cenizas                       | Café pulido o verde | Por calcinación en una mufla a 600°C. Método de la A.O.A.C. N°923.03.            |
| Extracto etéreo               | Café pulido o verde | Método de la A.O.A.C. N° 920.39C.  |
| Proteína bruta                | Café pulido o verde | Por Micro Kjeldahl en 0,04 g de materia molida. Método de la A.O.A.C. N° 920.87. |
| Fibra                         | Café pulido o verde | Método de la A.O.A.C. N° 962.09.   |
| Elementos libres de nitrógeno | Café pulido o verde | Método de la A.O.A.C. N° 920.88.   |
| Azúcares Totales              | Café pulido o verde | Determinación por HPLC. Método MO EC0520.  |
| Preparación de la muestra     | Café pulido o verde | Métodos de la A.O.A.C N° 920.149.  |

**Fuente:** Departamento de nutrición y calidad INIAP, Laboratorio de postcosecha del DECAB-EPN.

El proceso de tostado y molido de los granos se ejecutó conforme a lo indicado en la Tabla 1, la cual presenta los análisis efectuados en las muestras, junto con los métodos empleados para cada uno de ellos.

### 3.3.1. Determinación de las propiedades termo físicas

La determinación de las propiedades termo físicas de los granos de café se llevó a cabo a través de un método experimental fundamentado en la transferencia de calor en estado no estacionario, empleando un equipo que fue descrito inicialmente por Dickerson en 1965 y posteriormente adaptado por Porsdal en 1982.



**Figura 1.** Dimensiones del tubo de cobre utilizado para el experimento.

El método en cuestión se sustentó en el uso de un cilindro de cobre concebido bajo las condiciones teóricas de seminfinitud. Con el fin de cumplir con los requisitos específicos del experimento, los extremos del cilindro fueron herméticamente sellados mediante tapones aislantes fabricados en material de goma, asegurando así que la transferencia de calor se desarrollara de manera predominantemente unidireccional, orientada en el sentido radial. En este marco, se asumió como despreciable el flujo de calor en dirección axial frente al predominio del movimiento térmico en la dirección radial (véase Figura 1).

Para la evaluación de las propiedades termofísicas del material en estudio —en este caso, café molido—, el cilindro se rellenó con dicha muestra y se dispuso de dos sensores destinados a la medición térmica. Uno de ellos se ubicó estratégicamente en el interior del sistema, permitiendo registrar las variaciones de temperatura en el núcleo térmico y en la superficie periférica del cilindro.

### **3.4. Metodología experimental**

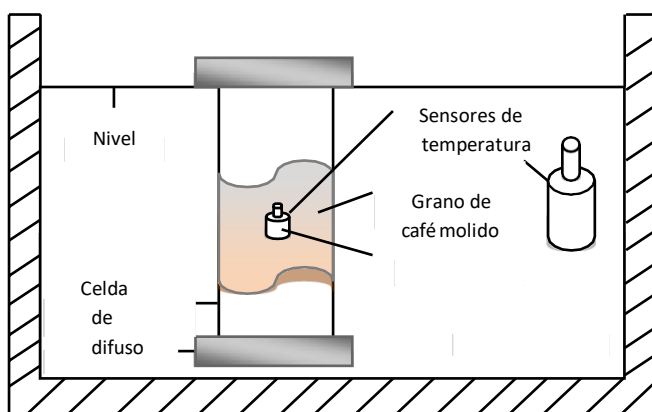
La presente investigación se desarrolló a través de una secuencia de etapas claramente delimitadas, cuya articulación metodológica respondió a criterios técnicos y teóricos específicos. En primer lugar, se llevó a cabo la caracterización física de los granos de café, entendida como el conjunto de operaciones orientadas a definir sus atributos materiales iniciales. A continuación, se procedió al acondicionamiento de la materia prima, ajustando su contenido de humedad según los parámetros establecidos por el diseño experimental. Posteriormente, se determinaron las propiedades termofísicas de las dos variedades estudiadas, para lo cual se consideraron cinco niveles térmicos diferenciados (60°C, 70°C, 80°C y 90°C), con el fin de observar las variaciones asociadas a los gradientes de temperatura. Finalmente, se realizó una caracterización fisicoquímica de los granos una vez concluidos los procesos de tostado y molido, etapas cruciales que inciden directamente en las características finales del producto.

#### **3.4.1. Característica de los granos de café pulido**

En esta etapa del estudio no se implementó un diseño experimental formal, sino que se limitó a la ejecución de aquellas pruebas fisicoquímicas previamente definidas en la sección correspondiente a Materiales y Métodos. Las muestras de café utilizadas pertenecieron a las variedades Bourbon y Catimor, obtenidas de los cafetales ubicados en la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Previo al análisis fisicoquímico, las muestras fueron sometidas al proceso de trillado con el objetivo de eliminar la capa externa de pergamino, siguiendo el protocolo establecido y detallado en el Anexo 1 y la Tabla 3.

#### **3.4.2. Determinación de las propiedades termofísicas de los granos de café**

Con el objetivo de obtener los perfiles térmicos asociados al café en estado tostado y molido, se procedió a la determinación de las propiedades termofísicas de las variedades Bourbon y Catimor, considerando porcentajes de humedad del 50%, 60%, 70% y 80%, así como condiciones térmicas de 60°C, 70°C, 80°C y 90°C. Esta combinación factorial generó un total de 32 tratamientos experimentales, cada uno evaluado mediante tres repeticiones independientes. Los detalles específicos de esta disposición se presentan en la Tabla 2, mientras que su representación gráfica correspondiente se ilustra en la Figura 5.



**Figura 2.** Equipo que se utilizara para la obtención del perfil térmico.

**Fuente:** SHIVA et al., (2014).

La Tabla 2 y la Figura 5 ilustran el diseño experimental implementado para la determinación de las propiedades termofísicas de las variedades Bourbon y Catimor. Este esquema metodológico consideró cuatro niveles de humedad (50%, 60%, 70% y 80%) y cuatro temperaturas específicas (60°C, 70°C, 80°C y 90°C), configurando así una matriz factorial que dio lugar a un conjunto de tratamientos diferenciados. Cada uno de estos tratamientos se evaluó mediante tres repeticiones, garantizando consistencia y confiabilidad en la recolección de datos experimentales.

**Tabla 2.** Diseño experimental para la estimación de las propiedades termo físicas en granos de café.

| Variedad | Tratamiento térmico | % Agua | Repetición | Parámetro  |
|----------|---------------------|--------|------------|--|
| Bourbon  | 60 °C               | 50%    | 3          | Densidad ( $\rho$ )<br>Conductividad térmica<br>(k) Calor Específico<br>Difusividad térmica ( $\alpha$ ) |
|          |                     | 60%    | 3          |  |
|          |                     | 70%    | 3          |  |
|          |                     | 80%    | 3          |  |
|          | 70 °C               | 50%    | 3          |  |
|          |                     | 60%    | 3          |  |
|          |                     | 70%    | 3          |  |
|          |                     | 80%    | 3          |  |
|          | 80 °C               | 50%    | 3          |  |
|          |                     | 60%    | 3          |  |
|          |                     | 70%    | 3          |  |
|          |                     | 80%    | 3          |  |
|          | 90°C                | 50%    | 3          |  |
|          |                     | 60%    | 3          |  |
|          |                     | 70%    | 3          |  |
|          |                     | 80%    | 3          |  |
| Catimor  | 60 °C               | 50%    | 3          |  |
|          |                     | 60%    | 3          |  |
|          |                     | 70%    | 3          |  |
|          |                     | 80%    | 3          |  |
|          | 70 °C               | 50%    | 3          |  |
|          |                     | 60%    | 3          |  |
|          |                     | 70%    | 3          |  |
|          |                     | 80%    | 3          |  |
|          | 80 °C               | 50%    | 3          |  |
|          |                     | 60%    | 3          |  |
|          |                     | 70%    | 3          |  |
|          |                     | 80%    | 3          |  |
|          | 90°C                | 50%    | 3          |  |
|          |                     | 60%    | 3          |  |
|          |                     | 70%    | 3          |  |
|          |                     | 80%    | 3          |  |

Con el fin de determinar parámetros termofísicos clave —tales como la difusividad térmica, el calor específico, la densidad y la conductividad térmica—, se realizaron

mediciones de temperatura a intervalos regulares de 30 segundos, bajo tres repeticiones por cada tratamiento experimental. Dichos tratamientos correspondieron a las variedades Bourbon y Catimor de café en estado tostado y molido, previamente acondicionadas a niveles de humedad del 50%, 60%, 70% y 80%, y sometidas a temperaturas controladas de 60°C, 70°C, 80°C y 90°C. Esta combinación de variables generó un total de 32 condiciones experimentales diferenciadas, cuyos resultados cuantitativos han sido documentados y detallados en los Anexos 3 al 10.

### **3.4.3. Característica fisicoquímica de los granos de café**

La Tabla 1 recoge los análisis llevados a cabo en el marco de la caracterización fisicoquímica de los granos de café, lo cual permitió la determinación de los valores asociados a sus propiedades fisicoquímicas según los métodos establecidos por Choi y Okos.(1985).

En este estudio se evaluaron una serie de parámetros fisicoquímicos esenciales, entre los que se incluyen: tamaño, densidad, contenido de humedad, cenizas, pH, acidez titulable, contenido de proteínas, lípidos, sólidos totales, azúcares reductores, polisacáridos, sacarosa y cafeína, todo ello en las variedades Bourbon y Catimor. Previo al análisis, los granos se sometieron a un proceso térmico de tostado de 18 minutos a una temperatura constante de 210°C, seguido de una etapa de molido que garantizó la uniformidad de la muestra para su posterior evaluación. Los detalles específicos de esta metodología se presentan en el Anexo 2 y se resumen en la Tabla 4.

### **3.4.4. Acondicionamiento de la materia prima**

Una vez tostados, los granos de café fueron molidos y posteriormente acondicionados hasta alcanzar un nivel de humedad estandarizado del 11%. Para este proceso, las muestras se almacenaron en recipientes de vidrio con una capacidad nominal de 500 g, los cuales se colocaron dentro de cámaras herméticas de vidrio —conocidas comúnmente como campanas de equilibrio— destinadas a controlar con precisión la humedad relativa (HR) del ambiente interior. Con el fin de establecer una HR aproximada del 10%, se empleó una solución salina de hidróxido de sodio, cuyas propiedades higroscópicas permiten mantener condiciones estables de humedad. Durante el periodo de equilibración, los granos se sometieron a pesajes diarios que permitieron monitorear su variación de masa hasta alcanzar el estado de equilibrio hídrico, definido

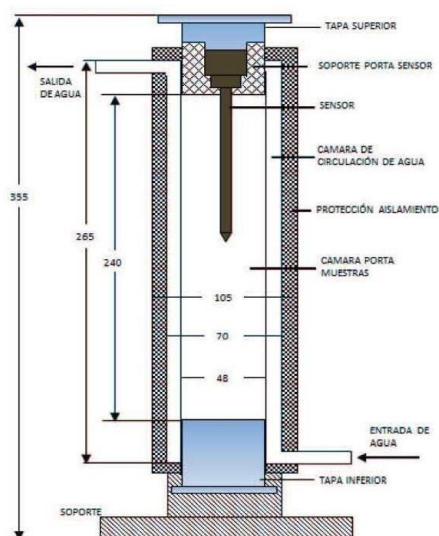
operativamente como la condición en la cual el peso de la muestra se mantenía constante a través de tres mediciones consecutivas.

#### **3.4.5. Determinación de las propiedades termofísicas de los granos de café**

Las Figuras 3 y 4 ilustran el dispositivo experimental diseñado específicamente para el propósito de esta investigación, cuya configuración se fundamentó en las propuestas metodológicas presentadas por Ureña (1990). El equipo consistió en un cilindro interno de 250 mm de longitud y 48 mm de diámetro interno, con un espesor de pared cercano a 1 mm. Este cilindro estaba contenido dentro de otro de mayor diámetro, formando así un espacio anular destinado a la circulación constante de agua a temperatura controlada (véase Figura 3).

Los extremos del cilindro interno fueron sellados herméticamente mediante tapones fabricados en teflón, material elegido por sus propiedades de estabilidad térmica y resistencia química. Uno de dichos tapones incorporaba un orificio roscado, utilizado para insertar y fijar un sensor de tipo Micropack, perteneciente al módulo de adquisición DATATRACE TEMP. Este sistema instrumental, integrado mediante una interfaz computacional y soportado por software especializado, constituía el conjunto responsable de registrar y almacenar los datos térmicos generados durante el experimento.

La termocupla asociada al sensor se posicionó de manera precisa, ubicando su extremo activo en el centro geométrico del cilindro interno, con la finalidad de capturar las variaciones térmicas producidas en dicha posición crítica dentro de la muestra analizada.

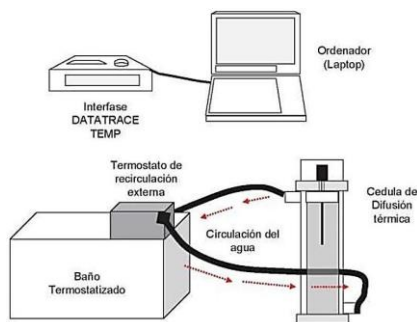


**Figura 3.** Esquema del cilindro material acero inoxidable AISI 304, cotas en mm.

Los granos de café previamente molidos se acondicionaron añadiendo distintas proporciones de agua respecto a la masa de café, generando combinaciones definidas como: 50% agua y 50% café, 60% agua y 40% café, 70% agua y 30% café, y finalmente 80% agua y 20% café. Tras su preparación, estas mezclas se introdujeron en el interior del cilindro experimental (véase Figura 3), garantizando así condiciones controladas durante la medición térmica.

La adquisición de datos se realizó mediante un sensor encargado de registrar las variaciones de temperatura en función del tiempo, con una precisión instrumental de  $\pm 0,05$  °C. Las evaluaciones se llevaron a cabo bajo cuatro niveles térmicos específicos: 60°C, 70°C, 80°C y 90°C. Durante cada ensayo, se recolectaron hasta 90 registros por segundo, lo cual permitió obtener perfiles térmicos altamente resueltos en el tiempo.

La configuración general del sistema experimental, incluyendo disposición del sensor, circuito de circulación térmica y posicionamiento relativo de los componentes, se detalla esquemáticamente en la Figura 4, facilitando la comprensión del arreglo físico utilizado para la determinación de las propiedades termo físicas de las muestras de café.



**Figura 4.** Esquema del equipo usado para determinar las propiedades termofísicas.

Para determinar las propiedades termofísicas y, en primer lugar, la difusividad térmica, se tomó como punto de partida la ecuación general de transferencia de calor, expresada de la siguiente manera:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

Dicha ecuación, formulada en términos de derivadas parciales, incorpora un conjunto de variables esenciales que describen el fenómeno térmico:  $T$ , que denota la temperatura;  $t$ , que representa la variable temporal; y  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , que corresponden a las coordenadas espaciales asociadas a la transferencia de calor. A partir de este planteamiento diferencial, fue posible obtener una expresión matemática general que permitiera modelar los perfiles térmicos tanto en una lámina como en un cilindro de dimensiones finitas.

Las soluciones analíticas derivadas de este modelo se expresan en forma de series infinitas, cuya estructura incluye términos exponenciales, funciones trigonométricas — como el seno —, así como funciones trascendentales ligadas a las raíces de ecuaciones características del sistema. En particular, para el caso de un cilindro finito cuya temperatura inicial sea uniforme y que se encuentre expuesto a un entorno térmicamente constante, y suponiendo despreciable la resistencia convectiva en su superficie externa, se propone la siguiente solución analítica:

$$\frac{T_s - T}{T_s - T_i} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{m+1}}{\beta_m} \cos(\beta_m 2x/l) \frac{2J_0(\beta_n r/R)}{\beta_n J_1(\beta_n)} \exp \left[ - \left( \frac{\beta_n^2}{R^2} + \frac{4\beta_m^2}{l^2} \right) \alpha t \right]$$

Donde:

$T_s$ : Temperatura del medio circundante.

$T_i$ : Temperatura inicial.

x: Coordenada rectangular.

l: Longitud del cilindro finito.

$J_0$ : Función Bessel de primera clase de orden cero.

$J_1$ : Función Bessel de primera clase de orden uno.

R: Radio en (m).

$P_e$ : Raíz de la función Bessel.

$P_a$ : Raíz de la función coseno.

t: Tiempo (s).

r: Coordenada radial.

a: Difusividad térmica.

Cuando la muestra permanece expuesta al calor por un tiempo prolongado, solo el primer término de la serie es relevante. Para un cilindro finito, la ecuación (2) puede simplificarse bajo la condición de que  $m = n = 1$ , lo que implica que  $\beta_m = p/2$ ,  $\beta_n = 2,4048$ , y  $J_1(2,4048) = 0,5191$ . En el centro del objeto cilíndrico,  $x = 0, r = 0$ ; y  $J_0(0) = 1,0$ . En el centro del cilindro ( $\mathbf{x} = \mathbf{0}, \mathbf{r} = \mathbf{0}$ ), se cumple que  $\mathbf{J0(0)} = \mathbf{1.0}$ , lo que permite expresar la solución aproximada para tiempos prolongados de la siguiente manera:

$$\frac{T_s - T}{T_s - T_i} = 2,0396 \exp \left[ - \left( \frac{2,4048^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{\ell^2} \right) \alpha t \right]$$

Al graficar las curvas de penetración del calor en papel semilogarítmico, la ecuación anterior puede reescribirse en la siguiente forma:

$$t = f_h \log \left( j \frac{T_s - T_i}{T_s - T} \right)$$

De esta ecuación se obtiene:

$$f_h = 0,398 \frac{r^2}{\alpha}$$

Es el parámetro de la curva de calentamiento y  $j = 1,6$ ; para el caso de un cilindro infinito. La pendiente de la curva  $t = \log(T)$ , permite determinar el valor de  $f_h$ . Sustituyendo los términos en la ecuación, se obtiene:

$$t = 0,398 \frac{r^2}{\alpha} \log \left[ 1,6 \frac{T_a - T_0}{T_a - T} \right]$$

Finalmente, la difusividad térmica se puede calcular mediante la expresión:

$$\alpha = \frac{0.398r^2}{f_h}$$

Donde:

$\alpha$ : Difusividad térmica ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ).

r: Radio del cilindro (m).

$f_h$ : Parámetro de la curva de calentamiento ( $\text{s}^{-1}$ ).

Los valores obtenidos de difusividad térmica para los granos se analizaron estadísticamente mediante un diseño multifactorial. Para evaluar la existencia de grupos homogéneos de datos, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey.

#### **3.4.6. Validación del cilindro utilizado para hallar las propiedades termo físicas**

Dado que ciertos productos agroalimentarios exhiben particularidades en su comportamiento térmico, especialmente en términos de la velocidad de transferencia de calor, se consideró necesario analizar el impacto de la convección dentro del proceso general de difusión térmica. Este fenómeno tiene especial relevancia en materiales líquidos o semilíquidos, donde los mecanismos convectivos pueden dominar o interferir significativamente con el flujo conductivo.

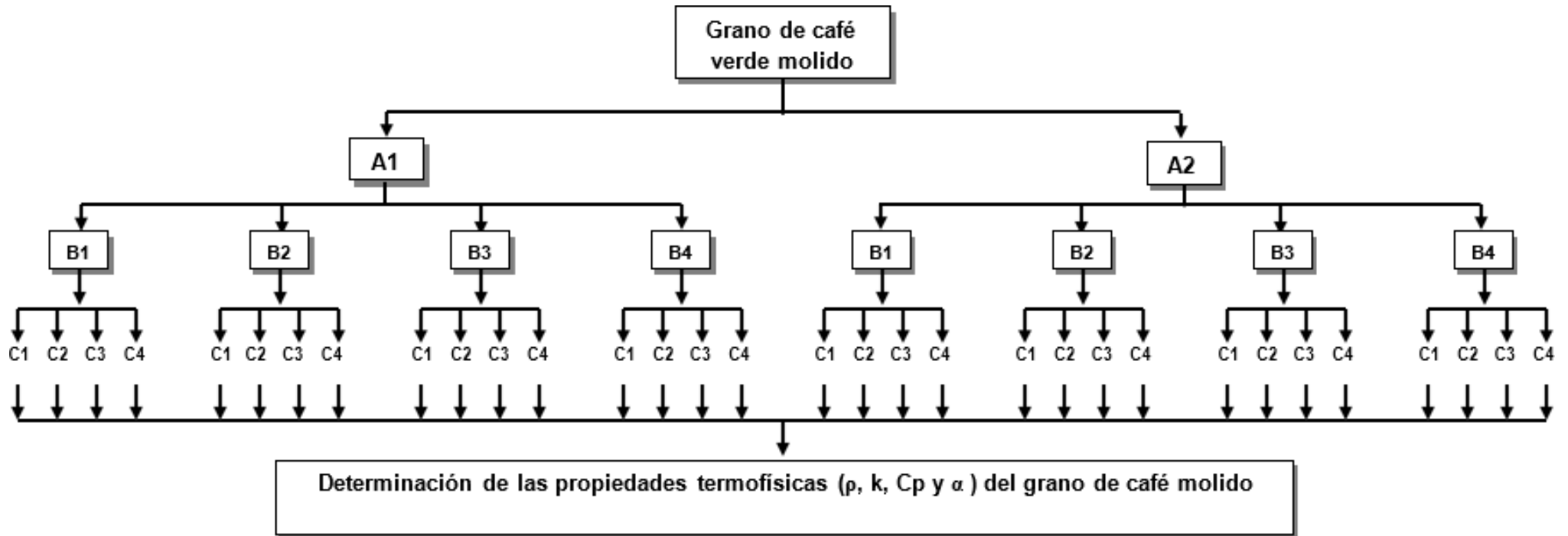
Para estimar dicha influencia, se recurrió al empleo de una formulación específica cuya aplicabilidad se restringe a aquellos sistemas en los que la transferencia de calor ocurre predominantemente a través del mecanismo de conducción. Esta condición constituye una suposición fundamental en la modelación térmica utilizada, y su validez requiere verificarse experimentalmente en contextos reales.

En este sentido, la metodología propuesta se someterá a un proceso de validación empírica mediante ensayos con muestras de café molido expuestas a distintas temperaturas. Esta evaluación permitirá contrastar los resultados obtenidos con los valores reportados en la literatura científica, estableciendo así el grado de aproximación entre lo teórico y lo observado.

El estudio se desarrolló bajo un esquema factorial consistente en 12 tratamientos diferenciados, generados por la combinación de cuatro niveles de humedad (50%, 60%, 70% y 80%) y cuatro condiciones térmicas (60°C, 70°C, 80°C y 90°C). El propósito

central de este diseño fue evaluar la repetibilidad del método experimental utilizado, garantizando así su robustez metodológica y su potencial aplicabilidad en estudios posteriores.

### 3.5. Diseño experimental



**Figura 5.** Diseño experimental para determinar las difusividades térmicas de los granos de café.

En la Figura 5 se tiene:

A: Variedades; A1: Bourbon; A2: Catimor

B: Temperatura; B1: 60°C; B2: 70°C; B3: 80°C; B4: 90°C; C: % de agua; C1: 50%; C2: 60%; C3: 70%; C4: 80%

Se llevaron a cabo un total de 32 tratamientos, cada uno con tres repeticiones, con el objetivo de aumentar el nivel de confianza en las pruebas. Los resultados obtenidos se analizaron mediante un análisis de varianza.

### **3.6. Análisis estadístico**

Los resultados obtenidos respecto a las propiedades termo físicas de los granos de café se sometieron a un análisis estadístico riguroso, basado en un diseño factorial de tres factores con arreglo  $2 \times 4 \times 4$ . Este esquema permitió evaluar sistemáticamente las interacciones entre las variables independientes consideradas en el estudio. Con el fin de identificar la existencia de agrupamientos significativos dentro de los datos experimentales, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey, cuyo propósito fue establecer diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados.

El procesamiento y análisis de los datos se realizó utilizando el software Statgraphics Centurion XVII, una herramienta ampliamente reconocida por su capacidad analítica en el tratamiento estadístico de datos experimentales. A través de esta plataforma se calculó el coeficiente de variación (%) como medida de dispersión relativa, se generó la tabla de análisis de varianza (ANOVA) y se ejecutó la prueba post hoc de Tukey con un nivel de confianza del 95%. Estas operaciones estadísticas constituyeron una base sólida para valorar la magnitud y significancia de las diferencias observadas en las propiedades termofísicas bajo distintas condiciones experimentales.

Paralelamente, se implementó un Diseño en Bloques Completos al Azar (DBCA) bajo un esquema factorial multinivel, orientado a construir un modelo matemático predictivo capaz de estimar el comportamiento de dichas propiedades en función de las variables controladas durante el experimento. Este enfoque permitió modelar las propiedades termofísicas del sistema en estudio considerando temperaturas de 60°C, 70°C, 80°C y 90°C, junto con contenidos de humedad del 50%, 60%, 70% y 80%.

Siguiendo la metodología propuesta por Ureña (2000), se llevó a cabo un análisis factorial multinivel destinado a explorar las interacciones complejas entre tres dimensiones fundamentales: variedad (Bourbon y Catimor), temperatura y humedad. Este análisis se desarrolló sobre un conjunto de 32 combinaciones experimentales únicas, organizadas según un diseño factorial  $2 \times 4 \times 4$ , cada una repetida tres veces para asegurar

la consistencia y representatividad de los datos. El modelo matemático subyacente a este diseño fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = U + A_i + B_j + C_k + (A*B)_{ij} + (A*C)_{ik} + (B*C)_{jk} + E_{ijk}$$

Donde:

$Y_{ij}$ : Resultado de la evaluación

U: Efecto medio de las evaluaciones

$A_i$ : Variedad con 2 niveles: Bourbon y Catimor

$B_j$ : Temperatura con 4 niveles: 60°C, 70°C, 80°C y 90°C

$C_k$ : Humedad con 4 niveles: 50%, 60%, 70% y 80%

$E_{ijk}$ : Error experimental

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Características fisicoquímicas de los granos de café Bourbon y Catimor

#### 4.1.1. Características fisicoquímicas de los granos de café verde de las variedades Bourbon y Catimor

La variedad Catimor exhibió un tamaño promedio de grano significativamente mayor al compararse con la variedad Bourbon, alcanzando una dimensión media de 6,90 mm, frente a los 6,10 mm registrados en esta última. Este patrón morfológico fue además notablemente consistente dentro de cada variedad: en el caso de Bourbon, el 85,00% de los granos analizados presentó precisamente el tamaño promedio mencionado; en tanto, en la variedad Catimor, el 90,00% de los granos alcanzó exactamente los 6,90 mm. Este comportamiento diferenciado sugiere que el tamaño del grano está condicionado por factores intrínsecos a la propia variedad, aunque también puede estar modulado por variables extrínsecas como la fertilidad del suelo, las condiciones climáticas durante el ciclo vegetativo y, sobre todo, el grado de madurez alcanzado al momento de la cosecha. Esta interpretación concuerda con lo señalado por Infocafes (2015) y Duicela et al. (2015), quienes destacan la incidencia combinada de aspectos genéticos y ambientales en la definición de las características físicas del grano de café.

**Tabla 3.** Característica fisicoquímica del café verde de las variedades Bourbon y Catimor.

| <b>Variabes Cuantitativas</b> | <b>Unidad</b>        | <b>Bourbon</b> | <b>Catimor</b> |
|-------------------------------|----------------------|----------------|----------------|
| Tamaño (diámetro)             | mm                   | 6,10 ± 0,100   | 6,90 ± 0,111   |
| Humedad                       | %                    | 10,23 ± 0,061  | 10,35 ± 0,053  |
| Cenizas                       | %                    | 3,48 ± 0,036   | 3,78 ± 0,044   |
| Ph                            | —                    | 7,16 ± 0,017   | 6,92 ± 0,031   |
| Acidez (como ácido málico)    | %                    | 1,14 ± 0,010   | 1,36 ± 0,017   |
| Proteína                      | %                    | 12,58 ± 0,062  | 10,68 ± 0,036  |
| Lípidos                       | %                    | 7,78 ± 0,044   | 7,59 ± 0,020   |
| Sólidos Totales               | %                    | 89,74 ± 0,026  | 89,60 ± 0,020  |
| Azúcares Reductores           | %                    | 0,10 ± 0,074   | 0,18 ± 0,017   |
| Polisacáridos                 | %                    | 51,00 ± 1,471  | 49,20 ± 0,020  |
| Sacarosa                      | %                    | 7,56 ± 0,044   | 6,99 ± 0,095   |
| Cafeína                       | %                    | 0,88 ± 0,026   | 0,99 ± 0,036   |
| Densidad aparente             | (kg/m <sup>3</sup> ) | 733,20 ± 5,577 | 745,00 ± 1,732 |

La variedad Catimor se clasifica, según el Instituto Hondureño del Café (2004), dentro de la categoría “Premium” para grano verde, debido a su mayor tamaño,

correspondiente a la criba 18. Por su parte, la variedad Bourbon recibe la denominación “Extra”, asociada a un tamaño menor (criba 16). Este diferencial no solo es relevante desde el punto de vista morfológico, sino también comercial, dado que un tamaño mayor del grano verde suele cumplir con los estándares de calidad exigidos tanto a nivel nacional como internacional para su exportación.

En cuanto al contenido de humedad, este fue de 10,35% para la variedad Catimor y 10,23% para Bourbon, valores que se encuentran dentro del rango aceptable establecido entre 10,00% y 12,00%, conforme a lo reportado por Infocafes (2015) y Duicela et al. (2015). Se ha documentado que cuando la humedad excede el 12,00%, se incrementa el riesgo de proliferación de moho, afectando negativamente la calidad del producto; por otro lado, niveles inferiores pueden inducir fracturas en el grano, alterando tanto su proceso de tostado como sus características sensoriales finales.

En relación con la composición mineral, medida a través del contenido de cenizas, el grano verde de Catimor presentó un valor promedio de 3,78%, superando al de Bourbon, cuyo contenido fue de 3,48%. Estos resultados son consistentes con los registros previos de Puerta (2011) y Bolívar y Gallego (2017), quienes han observado variaciones entre 3,34% y 5,79% en café verde. No obstante, se ha identificado una tendencia decreciente en el contenido de cenizas en cultivos ubicados a altitudes superiores a los 1600 metros sobre el nivel del mar, fenómeno atribuido a factores edáficos y climáticos. A pesar de ello, en esta investigación la variedad Bourbon mostró un contenido relativo más elevado de minerales, mientras que Catimor registró un valor inferior, lo cual sugiere una variabilidad genética significativa entre ambas variedades.

Desde el punto de vista del pH, la variedad Bourbon alcanzó un valor más alto (7,16) comparado con Catimor (6,92), encontrándose ambos dentro del rango neutro, lo cual implica una baja concentración de protones libres, condiciones que favorecen la estabilidad química del grano (Wagner, 2005). En contraste, la acidez titulable — expresada como ácido málico— resultó mayor en Catimor (1,36%) respecto a Bourbon (1,14%), lo que confirma la relación inversa entre acidez y pH. Esta dinámica parece estar mediada por las prácticas de postcosecha y los métodos de beneficiado del café, tal como han señalado Uribe et al. (2017), Puerta (2012) y Córdova y Guerrero (2016).

El análisis de sólidos totales reveló valores muy similares entre ambas variedades: 89,74% para Bourbon y 89,60% para Catimor. Ambos indicadores refieren a un estado

óptimo del grano verde, de acuerdo con los parámetros establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-169-SCFI (2007).

En términos de composición proteica, Bourbon mostró un contenido superior (12,58%) frente a Catimor (10,68%). Este hallazgo coincide con los rangos típicos reportados por Smith (1985), quien establece entre 11,00% y 13,00% como valores esperados para café verde de la especie *Coffea arabica*. Así, únicamente la variedad Bourbon se encuentra dentro de dicho intervalo, lo cual podría asociarse a diferencias genéticas o a condiciones específicas de manejo agronómico.

Respecto al contenido de lípidos, Bourbon nuevamente destacó con un 7,78%, por encima del 7,59% registrado en Catimor. Sin embargo, estos valores son notablemente inferiores a los reportados por Farah (2012), quien documenta contenidos entre 15,00% y 17,00% para cafeína de tipo Arábica, así como a los registrados por Puerta (2011), quien obtuvo un promedio de 15,27% para la variedad Bourbon. Esta discrepancia sugiere que los datos obtenidos en esta investigación podrían estar influenciados por variables particulares de origen agroecológico o metodológico, careciendo aún de antecedentes específicos para las variedades analizadas en este estudio.

En cuanto a los azúcares reductores, Catimor presentó un contenido mayor (0,18%) comparado con Bourbon (0,10%), tendencia que concuerda con los registros de Puerta (2011) para la variedad Caturra Amarillo. Por otro lado, el contenido de polisacáridos fue más elevado en Bourbon (51,00%) que en Catimor (49,20%), valores cercanos al rango de 50,00% a 55,00% referido por Smith (1985) como característico del café verde.

Asimismo, el contenido de sacarosa fue mayor en Bourbon (7,56%) que en Catimor (6,99%), coincidiendo con los estudios de Farah (2012), quien señala que en la especie Arábica la sacarosa puede representar hasta el 9,00% del peso seco del grano verde. Estos compuestos —polisacáridos, azúcares reductores y sacarosa— son fundamentales en la conformación del perfil organoléptico final del café, contribuyendo al aroma, sabor, color, acidez, amargura y formación de espuma. Por ello, se considera ideal que se ubiquen dentro de los siguientes rangos: polisacáridos (50,00–55,00%), azúcares reductores (9,00%).

En lo concerniente a la cafeína, Catimor registró un contenido más alto (0,99%) comparado con Bourbon (0,88%). Si bien Catimor se encuentra dentro del rango de 0,90–1,20% descrito por Farah (2012) para la especie Arábica, Bourbon muestra un valor

inferior, lo cual indica que esta variable responde fuertemente al tipo de variedad cultivada.

Finalmente, en cuanto a la densidad aparente, Catimor registró un valor superior ( $745,00 \text{ kg/m}^3$ ) respecto a Bourbon ( $733,20 \text{ kg/m}^3$ ). Dichas diferencias se explican principalmente por factores genéticos inherentes a cada variedad. De acuerdo con Duicela et al. (2015) y Buenaventura y Castaño (2002), la densidad aparente del grano verde puede verse influida por el estado de madurez del fruto, la altitud del cultivo y posibles alteraciones en la estructura interna del tejido celular.

Por lo tanto, se concluye que la densidad aparente de las variedades analizadas se sitúa dentro del rango general reportado de  $645,00$  a  $750,00 \text{ kg/m}^3$ , lo cual denota una alta densidad del grano, según lo planteado por Prieto (2002), y, en consecuencia, una mayor calidad física y potencial sensorial del producto final.

#### **4.1.2. Características fisicoquímicas de los granos de café tostado y molido de las variedades Bourbon y Catimor**

Para ambas variedades analizadas se empleó una granulometría estándar de  $300 \mu\text{m}$ , con el objetivo explícito de garantizar uniformidad en los análisis fisicoquímicos y minimizar posibles variaciones derivadas de diferencias en la textura de la muestra. Esta homogeneización del tamaño de partícula es particularmente relevante durante la preparación de la bebida, ya que influye directamente en la cinética de extracción de compuestos solubles y en la percepción sensorial final del producto (Guevara y Castaño, 2005). Según estos autores, a mayor tamaño de partícula, menor será el área de contacto entre el agua caliente y las superficies sólidas del café molido, lo cual incide en la eficiencia del proceso de infusión.

Asimismo, existe un sistema de clasificación bien establecido para las partículas de café molido según su tamaño, donde cada categoría granulométrica está asociada a métodos específicos de preparación del café. Este criterio se sustenta en normativas como la propuesta por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (1978), que reconoce la importancia del tamaño de molienda en la calidad final del producto infundido.

En cuanto a la densidad aparente del café tostado y molido, se registraron valores de  $336,667 \text{ kg/m}^3$  para la variedad Bourbon y  $338,333 \text{ kg/m}^3$  para Catimor. Ambos resultados se encuentran dentro del rango aceptable definido entre  $250$  y  $360 \text{ kg/m}^3$ , según

los estándares reportados por Peláez (1995). Este parámetro físico no solo refleja características intrínsecas de la materia prima, sino que también está influenciado por factores externos tales como el grado de torrefacción, el tipo de molienda y el contenido residual de humedad, como han señalado Cuéllar y Castaño (2001).

Se ha observado consistentemente que la densidad del café en estado tostado y molido disminuye conforme aumentan tanto la temperatura como el tiempo de exposición al calor durante el proceso de tostado. Este fenómeno se explica principalmente por dos mecanismos: por un lado, la pérdida progresiva de masa debido a la evaporación del agua residual; por otro, la generación interna de gases como monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que inducen una expansión física del grano. Estas transformaciones estructurales son claves para entender la evolución morfológica del café durante la torrefacción (Prieto, 2002; Peláez, 1995).

30

**Tabla 4.** Característica fisicoquímica del café tostado y molido de las variedades Bourbon y Catimor.

| <b>Variables Cuantitativas</b> | <b>Unidad</b>        | <b>Bourbon</b>  | <b>Catimor</b>  |
|--------------------------------|----------------------|-----------------|-----------------|
| Tamaño (diámetro)              | μm                   | 300 ± 5,00      | 300 ± 4,583     |
| Humedad                        | %                    | 1,35 ± 0,053    | 1,38 ± 0,020    |
| Cenizas                        | %                    | 4,71 ± 0,017    | 5,15 ± 0,072    |
| Ph                             | —                    | 5,07 ± 0,130    | 5,12 ± 0,017    |
| Acidez (como ácido málico)     | %                    | 0,84 ± 0,026    | 0,83 ± 0,20     |
| Proteína                       | %                    | 11,65 ± 0,036   | 11,54 ± 0,017   |
| Lípidos                        | %                    | 11,08 ± 0,156   | 12,53 ± 0,017   |
| Sólidos Totales                | %                    | 98,65 ± 0,063   | 98,62 ± 0,036   |
| Azúcares Reductores            | %                    | 0,22 ± 0,026    | 0,33 ± 0,026    |
| Polisacáridos                  | %                    | 22,60 ± 0,058   | 23,60 ± 0,361   |
| Sacarosa                       | %                    | 0,26 ± 0,026    | 0,19 ± 0,017    |
| Cafeína                        | %                    | 0,98 ± 0,036    | 1,09 ± 0,017    |
| Densidad aparente              | (kg/m <sup>3</sup> ) | 336,667 ± 0,005 | 338,333 ± 0,246 |

En relación con el contenido de humedad, tanto la variedad Bourbon como la Catimor cumplieron con los límites establecidos por la Norma NTE-INEN-1123-2016, lo cual refleja su adecuación al marco normativo vigente en cuanto a la calidad fisicoquímica del café verde. No obstante, se observó una reducción significativa en el contenido de humedad tras someter las muestras al proceso térmico de tostado. Este hallazgo confirma la existencia de una relación inversa entre el tiempo de tostado y el contenido residual de

agua en el grano: a medida que aumenta la duración del tratamiento térmico, disminuye progresivamente la humedad del producto.

Este fenómeno se explica por la naturaleza misma del proceso de torrefacción, dentro del cual se generan condiciones favorables para la evaporación del agua libre y la liberación parcial del agua ligada a los componentes estructurales del grano. En ambas variedades analizadas, la combinación de tostado y molienda resultó en una pérdida promedio de humedad comprendida entre 10,00% y 12,00% respecto al valor inicial, lo cual pone de relieve la magnitud del impacto físico-químico inducido por estas etapas del procesamiento.

De acuerdo con Sánchez et al. (2007), la cantidad de humedad remanente tras el tostado no es uniforme, sino que depende críticamente del tipo o intensidad del tueste aplicado. Así, un tueste de menor intensidad permite conservar niveles más altos de humedad en el café final, mientras que un tueste prolongado o intenso conduce a una deshidratación más pronunciada. Esta variabilidad sugiere que el control térmico durante el tostado constituye un factor determinante en la preservación o modificación intencional de las propiedades fisicoquímicas del producto final.

## **4.2. Relación de las propiedades termo físicas de las variedades de granos de café tostado con la temperatura**

### **4.2.1. Difusividad térmica del café de las variedades Bourbon y Catimor**

Los Anexos 3 al 10 recogen los valores de difusividad térmica obtenidos para cada uno de los tratamientos experimentales considerados en este estudio. Cada tratamiento se evaluó mediante tres repeticiones independientes, cuyos resultados fueron promediados para garantizar mayor precisión y confiabilidad estadística. En conjunto, estos anexos abarcan un total de 32 mediciones, correspondientes a la combinación factorial de variables que define el diseño experimental.

Los valores registrados oscilan entre un mínimo de  $2,320648 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  y un máximo de  $7,701187 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ , lo cual refleja la variabilidad inherente al comportamiento térmico del café tostado y molido bajo diferentes condiciones de humedad y temperatura. Además de los valores de difusividad, los cuadros incluyen las pendientes asociadas a cada ajuste lineal, así como los coeficientes de determinación ( $R^2$ ), los cuales muestran una correlación altamente significativa entre las variables

experimentales, evidenciando una baja dispersión y consistencia interna en los datos obtenidos.

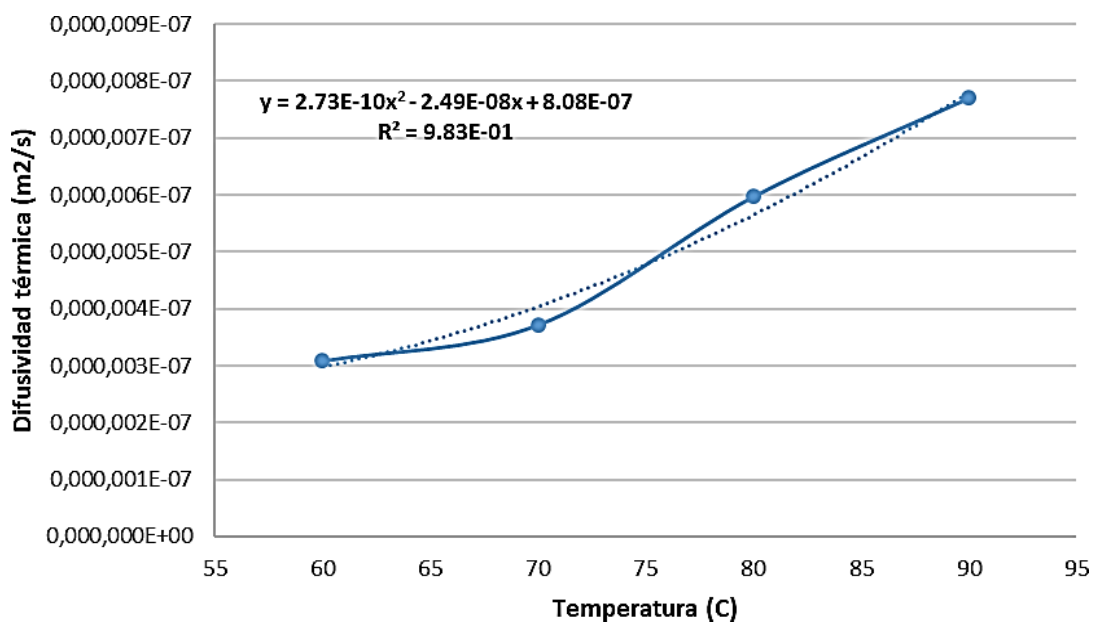
Los primeros cuatro anexos (del 3 al 6) corresponden específicamente a la variedad Bourbon, y presentan los resultados obtenidos a temperaturas de 60 °C, 70 °C, 80 °C y 90 °C, respectivamente. Los anexos subsiguientes (del 7 al 10) contienen los datos asociados a la variedad Catimor, evaluados bajo las mismas condiciones térmicas. En ambos casos, se detallan los resultados correspondientes a distintas proporciones de agua: 50%, 60%, 70% y 80%. Esta organización permite visualizar sistemáticamente cómo las propiedades termofísicas varían no solo en función de la temperatura, sino también del contenido de humedad y de la identidad varietal.

**Tabla 5.** Difusividad térmica de la variedad Bourbon y Catimor con respecto a la temperatura con 50% agua y 50% café.

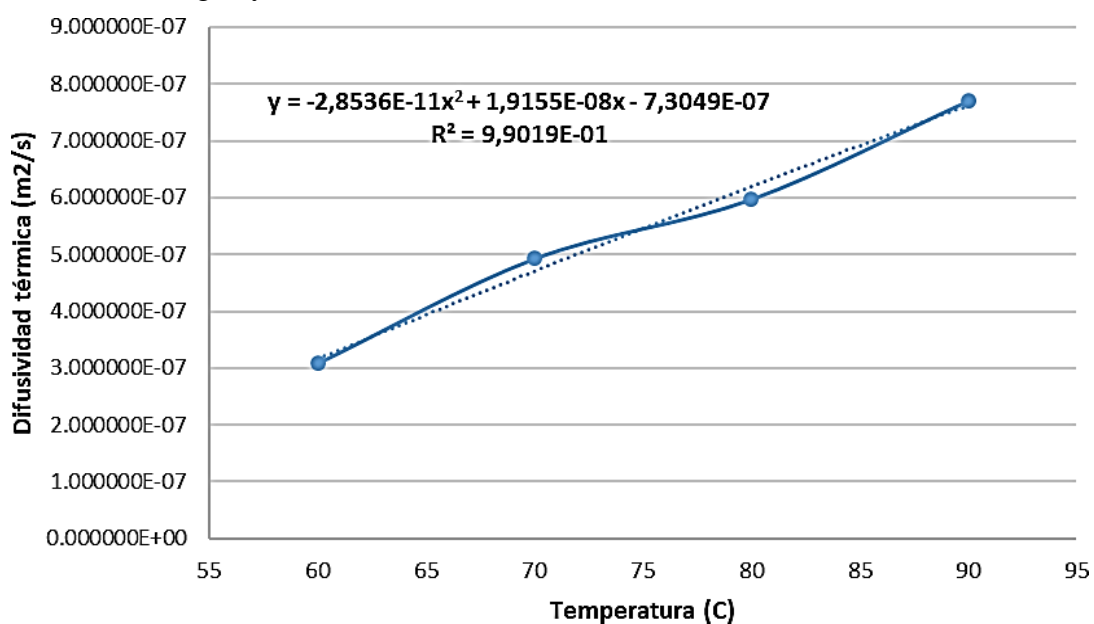
| <b>Temperatura (°C)</b> | <b>Bourbon</b>  | <b>Catimor</b>  |
|-------------------------|---|---|
|                         | Difusividad térmica (m <sup>2</sup> /s) con 50% agua y 50% café | Difusividad térmica (m <sup>2</sup> /s) con 50% agua y 50% café |
| 60                      | 3,084139E-07  | 3,087021E-07  |
| 70                      | 3,717103E-07  | 3,927747E-07  |
| 80                      | 5,971007E-07  | 5,968907E-07  |
| 90                      | 7,697587E-07  | 7,701187E-07  |

En la Tabla 5 se exponen los valores de difusividad térmica en función de la temperatura, considerando una proporción fija de 50% de agua y 50% de café, para ambas variedades analizadas. Esta disposición tabular permite observar las variaciones en la propiedad termofísica bajo condiciones controladas de humedad, facilitando así la comparación entre los comportamientos térmicos de Bourbon y Catimor.

Las Figuras 6 y 7 ilustran las curvas representativas de la difusividad térmica asociada a cada variedad. A simple vista, ambas gráficas sugieren un comportamiento funcional que responde a una relación cuadrática; no obstante, dicha tendencia no es idéntica entre variedades, revelando diferencias en la forma de las curvas y, por ende, en la manera como cada tipo de café responde al incremento térmico. Estas discrepancias en la curvatura indican la presencia de efectos varietales sobre la dinámica de transferencia de calor, lo cual deberá contrastarse estadísticamente en etapas posteriores del análisis con el fin de validar su significancia.



**Figura 6.** Difusividad térmica de la variedad Bourbon con respecto a la temperatura con 50% agua y 50% café.

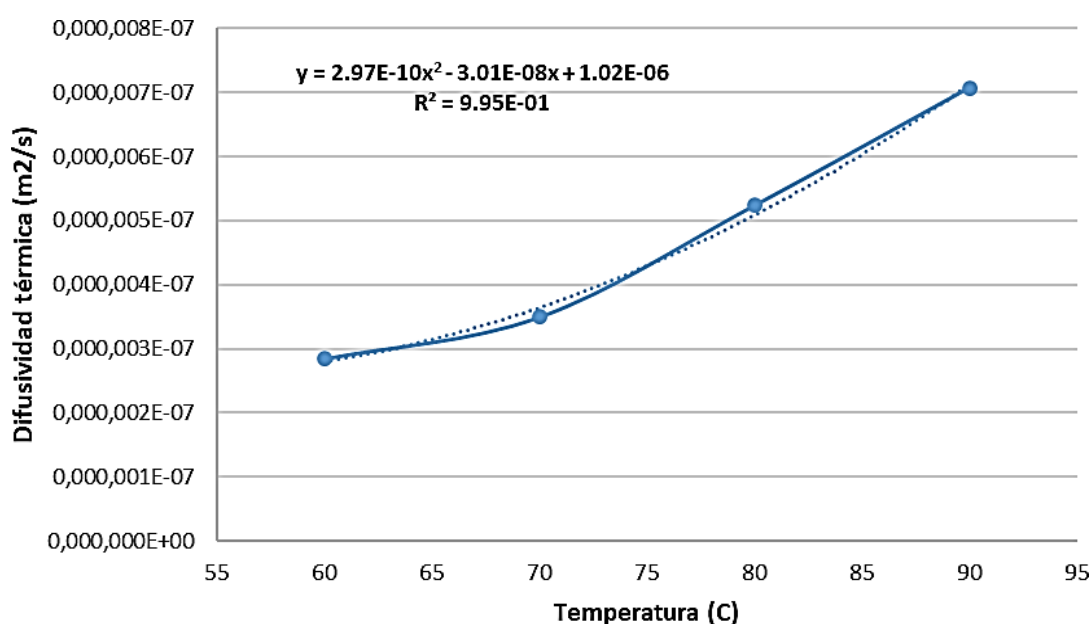


**Figura 7.** Difusividad térmica de la variedad Catimor con respecto a la temperatura

En la Tabla 6, se registran los valores de difusividad térmica para una proporción de 60% de agua y 40% de café en las variedades Bourbon y Catimor.

**Tabla 6.** Difusividad térmica de la variedad Bourbon y Catimor con respecto a la temperatura con 60% agua y 40% café.

| Temperatura (°C) | Bourbon   | Catimor   |
|------------------|---|---|
|                  | Difusividad térmica (m <sup>2</sup> /s) con 60% agua y 40% café | Difusividad térmica (m <sup>2</sup> /s) con 60% agua y 40% café |
| 60               | 2,846246E-07  | 2,844185E-07  |
| 70               | 3,496602E-07  | 3,492764E-07  |
| 80               | 5,237170E-07  | 5,240111E-07  |
| 90               | 7,076062E-07  | 7,075921E-07  |

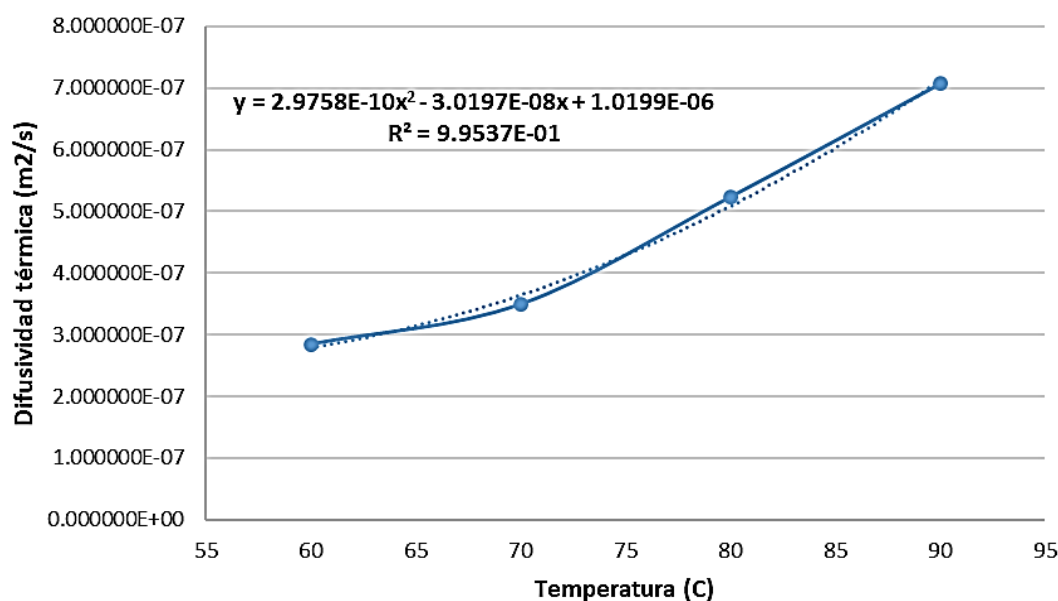


**Figura 8.** Difusividad térmica de la variedad Bourbon con respecto a la temperatura con 60% agua y 40% café.

De acuerdo con lo expuesto en la Tabla 6 y representado gráficamente en las Figuras 8 y 9, la variación de la difusividad térmica en función de la temperatura muestra un comportamiento semejante entre ambas variedades cuando se considera una proporción de 60% de agua y 40% de café. Las curvas obtenidas reflejan tendencias cuadráticas cuya forma es altamente comparable, lo cual sugiere una respuesta térmica relativamente homogénea bajo estas condiciones específicas de humedad.

Este comportamiento se refuerza al analizar los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) asociados a las ecuaciones cuadráticas ajustadas para cada variedad, los cuales exhiben valores muy cercanos entre sí, indicando un grado similar de ajuste y, por ende,

una consistencia metodológica en la modelación térmica. No obstante, cuando se evalúa una proporción equitativa de 50% de agua y 50% de café, aunque los valores numéricos sean próximos, las ecuaciones resultantes presentan diferencias estructurales que no pueden ignorarse. Este fenómeno revela que, aun bajo iguales condiciones externas, la composición interna y las características físicas particulares de cada variedad influyen de manera diferenciada en la dinámica térmica del sistema, generando modelos matemáticos no intercambiables.



**Figura 9.** Difusividad térmica de la variedad Catimor con respecto a la temperatura con 60% agua y 40% café.

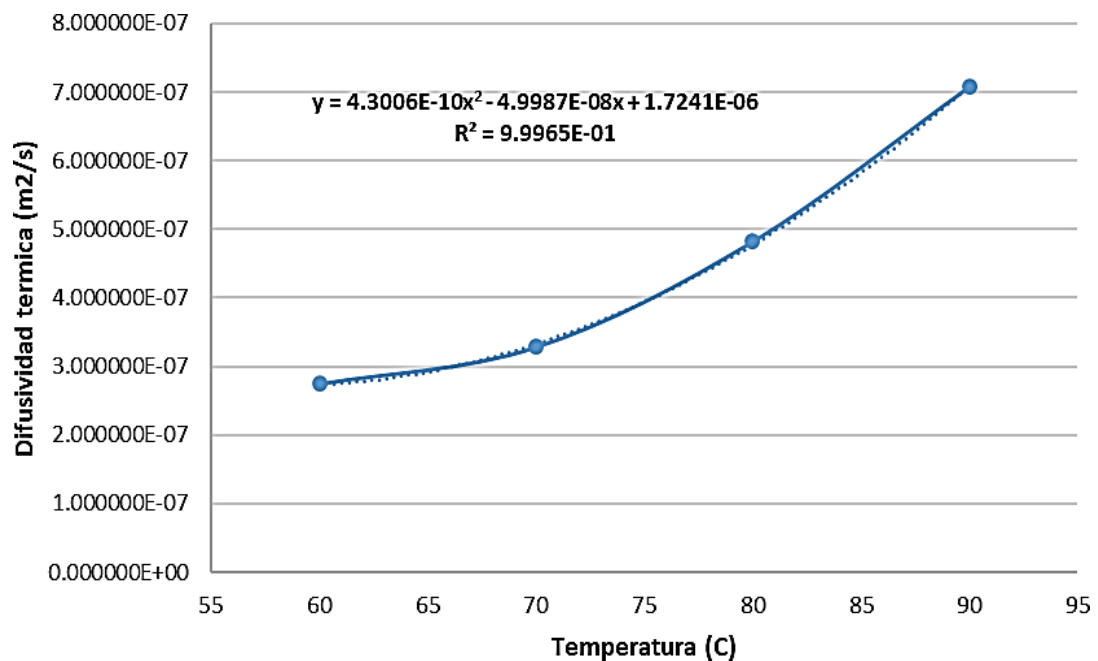
La Tabla 7 presenta los valores de difusividad térmica para una proporción de 70% de agua y 30% de café en ambas variedades.

**Tabla 7.** Difusividad térmica de la variedad Bourbon y Catimor con respecto a la temperatura con 70% agua y 30% café.

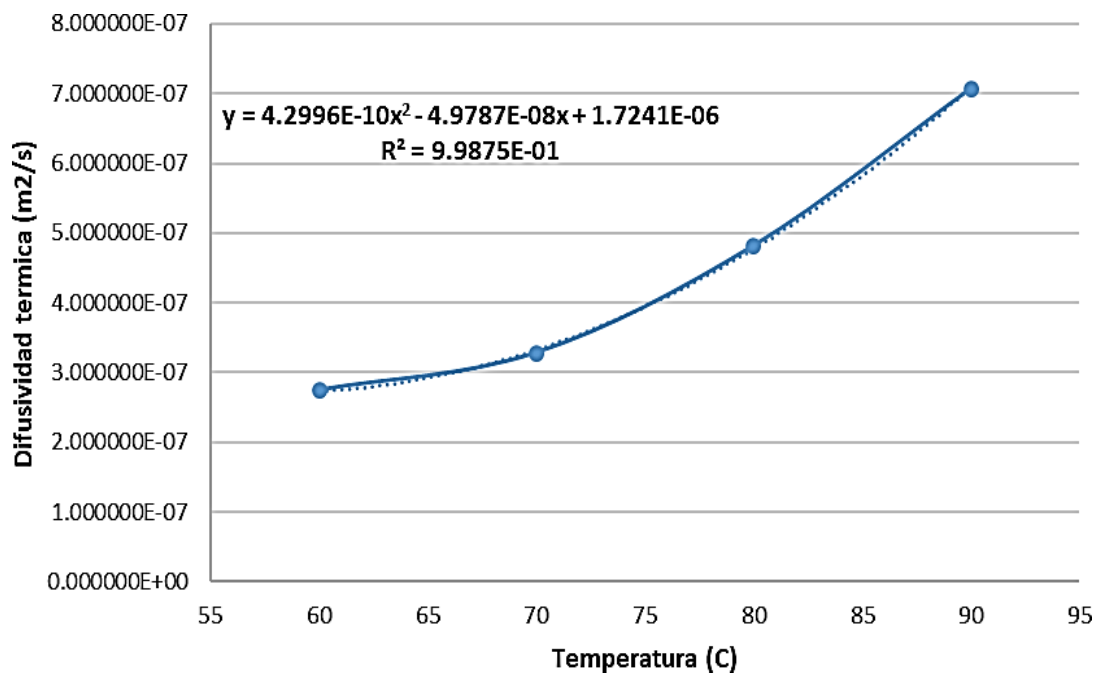
| Temperatura (°C) | Bourbon  | Catimor  |
|------------------|--|--|
|                  | Difusividad térmica (m²/s) con 70% agua y 30% café | Difusividad térmica (m²/s) con 70% agua y 30% café |
| 60               | 2,745726E-07                                       | 2,746023E-07                                       |
| 70               | 3,281704E-07                                       | 3,283114E-07                                       |
| 80               | 4,818249E-07                                       | 4,820138E-07                                       |
| 90               | 7,074479E-07                                       | 7,105569E-07                                       |

En las Figuras 10 y 11, se observan las curvas de variación en función de la temperatura, que muestran tendencias similares pero con diferencias en sus ecuaciones

cuadráticas. Esta variación también se refleja en la Tabla 7, donde los valores entre ambas variedades muestran una diferencia mínima, del orden de  $10^{-7}$ .



**Figura 10.** Difusividad térmica de la variedad Bourbon con respecto a la temperatura con 70% agua y 30% agua.

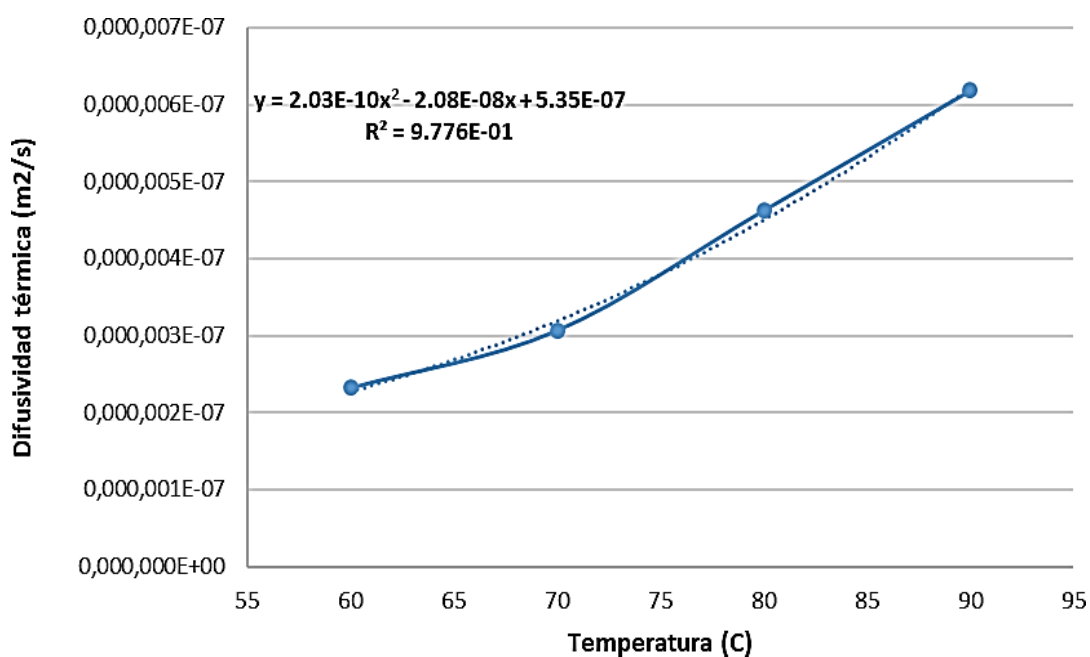


**Figura 11.** Difusividad térmica de la variedad Catimor con respecto a la temperatura con 70% agua y 30% café.

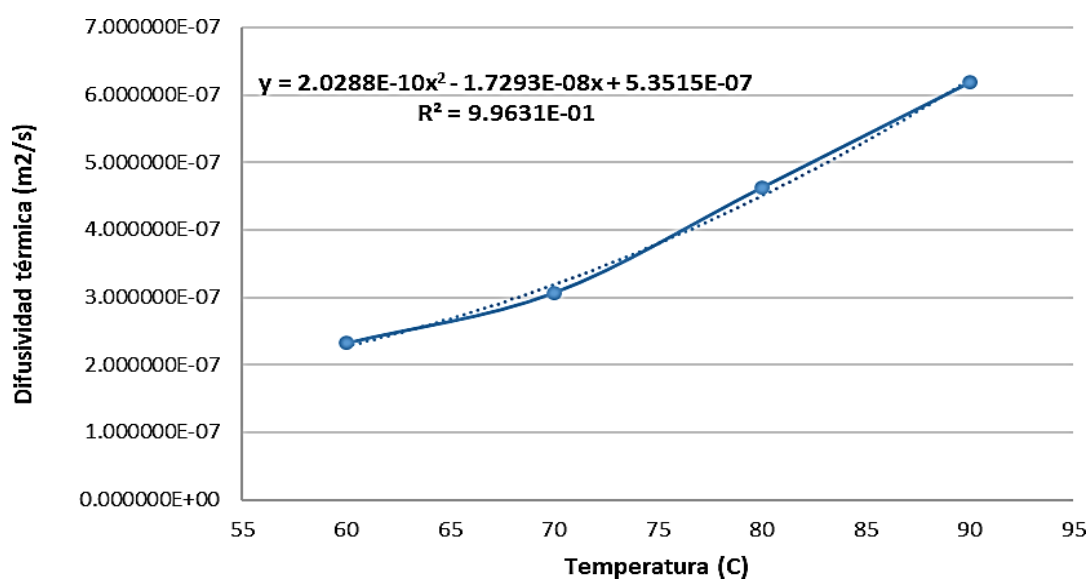
La Tabla 8 expone los valores de difusividad térmica para una proporción de 80% de agua y 20% de café de la variedad Bourbon y Catimor.

**Tabla 8.** Difusividad térmica de la variedad Bourbon y Catimor con respecto a la temperatura con 80% agua y 20% café.

| Temperatura (°C) | Bourbon  | Catimor  |
|------------------|--|--|
|                  | Difusividad térmica (m <sup>2</sup> /s) con 80 % agua y 20% café | Difusividad térmica (m <sup>2</sup> /s) con 80 % agua y 20% café |
| 60               | 2,320648E-07   | 2,321098E-07   |
| 70               | 3,067200E-07   | 3,128311E-07   |
| 80               | 4,626982E-07   | 4,631362E-07   |
| 90               | 6,185465E-07   | 6,190877E-07   |



**Figura 12.** Difusividad térmica de la variedad Bourbon con respecto a la temperatura con 80% agua y 20% café.



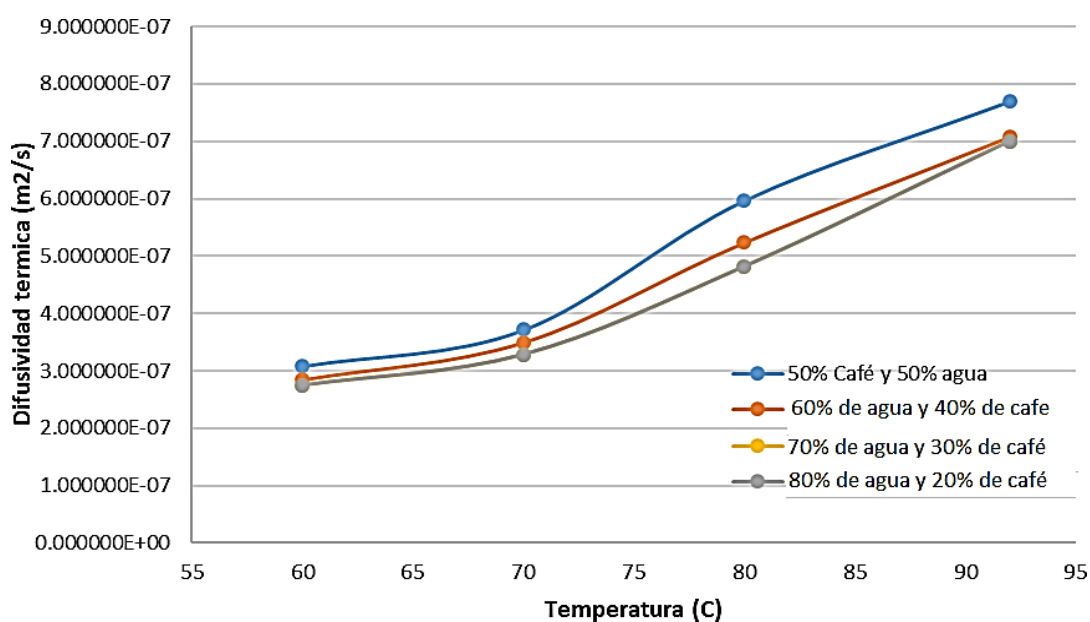
**Figura 13.** Difusividad térmica de la variedad Catimor con respecto a la temperatura con 80% agua y 20% café.

La Tabla 9 presenta un resumen de los valores de difusividad térmica obtenidos bajo diferentes proporciones de agua y café para la variedad Bourbon. En este caso específico, se observan variaciones entre los tratamientos que sugieren una respuesta diferenciada del material frente a los cambios en la composición hídrica. Estas diferencias, aunque inicialmente descriptivas, se someterán a un análisis estadístico más detallado con el fin de determinar su significancia y posible implicancia termofísica.

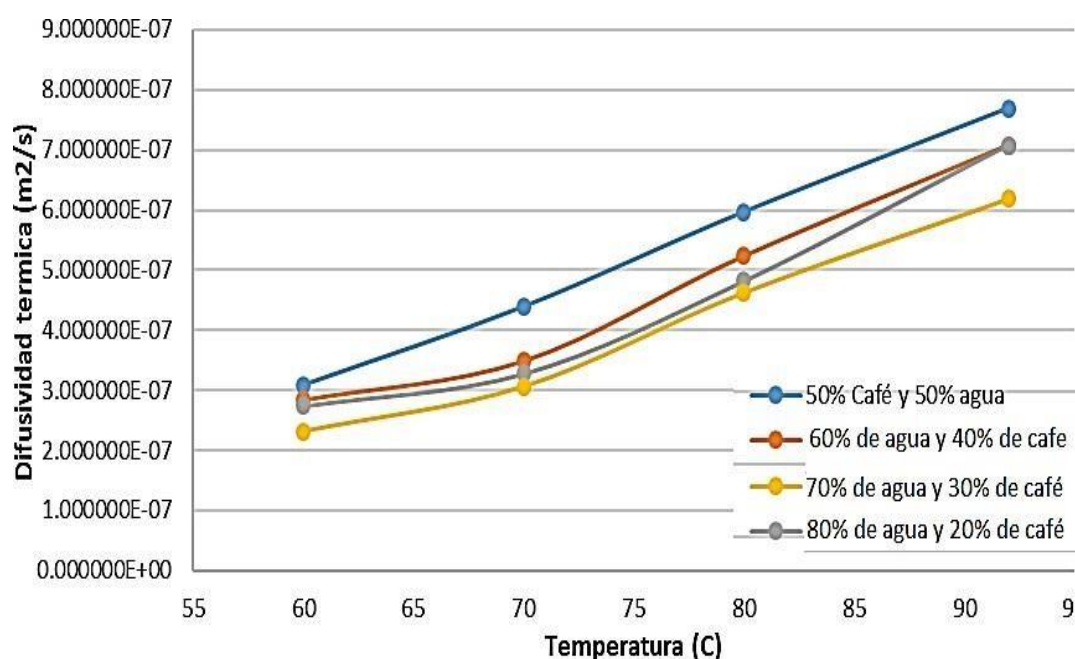
Con base en estos datos, se generaron curvas de variación específicas para cada variedad, las cuales permiten visualizar de manera gráfica las tendencias térmicas asociadas a los distintos niveles de humedad. Las Figuras 14 y 15 ilustran dichas curvas, representando la relación entre la difusividad térmica, la temperatura y la proporción de agua en el sistema. A partir de su análisis se evidencia que el comportamiento térmico no es uniforme entre variedades: por el contrario, las curvas exhiben formas y dinámicas distintas, lo cual refuerza la hipótesis de una influencia varietal sobre la transferencia de calor. Esta aparente heterogeneidad en las respuestas térmicas constituye un fundamento sólido para emprender un análisis estadístico más riguroso que clarifique su naturaleza y alcance.

**Tabla 9.** Valores de difusividad térmica de café de las variedades Bourbon y Catimor a diferentes temperaturas y contenido de agua.

| Variedad | T (°C) | Difusividad Térmica (m <sup>2</sup> /s) |                     |                     |                     |
|----------|--------|---|---------------------|---------------------|---------------------|
|          |        | 50% agua y 50% café                     | 60% agua y 40% café | 70% agua y 30% café | 80% agua y 20% café |
| Bourbon  | 60     | 3,084139E-07                            | 2,846246E-07        | 2,745726E-07        | 2,320648E-07        |
|          | 70     | 3,717103E-07                            | 3,496602E-07        | 3,281704E-07        | 3,067200E-07        |
|          | 80     | 5,971007E-07                            | 5,237170E-07        | 4,818249E-07        | 4,626982E-07        |
|          | 90     | 7,697587E-07                            | 7,076062E-07        | 7,074479E-07        | 6,185465E-07        |
| Catimor  | 60     | 3,087021E-07                            | 2,844185E-07        | 2,746023E-07        | 2,321098E-07        |
|          | 70     | 3,927747E-07                            | 3,492764E-07        | 3,283114E-07        | 3,128311E-07        |
|          | 80     | 5,968907E-07                            | 5,240111E-07        | 4,820138E-07        | 4,631362E-07        |
|          | 90     | 7,701187E-07                            | 7,075921E-07        | 7,105569E-07        | 6,190877E-07        |



**Figura 14.** Valores de difusividad térmica de café de la variedad Bourbon a diferentes temperaturas y contenido de agua.



**Figura 15.** Valores de difusividad térmica de café de la variedad Catimor a diferentes temperaturas y contenido de agua.

39

**Tabla 10.** Análisis de varianza de difusividad térmica de café molido y tostado en función de la variedad, temperatura y porcentaje de agua.

| Fuente         | Suma de Cuadrados | G.L. | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|----------------|-------------------|------|----------------|---------|---------|
| A: Variedad    | 0,000028125       | 1    | 0,000028125    | 0,02    | 0,8915  |
| B: Temperatura | 0,845065000       | 1    | 0,845065000    | 570,44  | 0,0000  |
| C: % Agua      | 0,047196900       | 1    | 0,047196900    | 31,86   | 0,0000  |
| AB             | 0,000001225       | 1    | 0,000001225    | 0,00    | 0,9773  |
| AC             | 0,000011025       | 1    | 0,000011025    | 0,01    | 0,9319  |
| BC             | 0,003561680       | 1    | 0,003561680    | 2,40    | 0,1336  |
| Error total    | 0,037035600       | 25   | 0,001481430    |         |         |
| Total (corr.)  | 0,932900000       | 31   |                |         |         |

La Tabla 10 muestra los resultados del análisis de varianza (ANOVA) aplicado a la difusividad térmica del café tostado y molido, considerando como factores experimentales la variedad, la temperatura y el porcentaje de agua en la formulación de la muestra. Según los resultados obtenidos, no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre las variedades analizadas, ya que el valor p asociado a este factor resultó superior al umbral convencional de 0,05. Este hallazgo sugiere que, dentro del rango de condiciones evaluadas, la identidad varietal no ejerce una influencia determinante sobre la difusividad térmica.

En contraste, sí se observaron efectos significativos atribuibles tanto a la temperatura como al porcentaje de agua, dado que los valores *p* correspondientes a estas variables fueron inferiores a 0,05. Esto indica que ambos factores inciden de manera relevante en la dinámica de transferencia de calor dentro del sistema estudiado. Ante esta evidencia, se procedió a aplicar la prueba de comparación múltiple de Tukey con el objetivo de identificar y caracterizar las diferencias específicas entre los niveles de temperatura y de contenido hídrico, con el fin de precisar su impacto relativo sobre la propiedad termofísica analizada.

**Tabla 11.** Comparaciones múltiples de difusividad térmica por variedad, temperatura y porcentaje de humedad mediante Tukey.

| <b>Variedad</b>    | <b>Recuento</b> | <b>Media MC</b>            |
|--------------------|-----------------|----------------------------|
| Bourbon            | 16              | 4,57937x10 <sup>-7</sup> a |
| Catimor            | 16              | 4,59812x10 <sup>-7</sup> a |
| <b>Temperatura</b> |                 |                            |
| 60°C               | 8               | 2,750x10 <sup>-7</sup> a   |
| 70°C               | 8               | 3,425x10 <sup>-7</sup> b   |
| 80°C               | 8               | 5,165x10 <sup>-7</sup> c   |
| 90°C               | 8               | 7,015x10 <sup>-7</sup> d   |
| <b>% de Agua</b>   |                 |                            |
| 80                 | 8               | 4,060x10 <sup>-7</sup> a   |
| 70                 | 8               | 4,485x10 <sup>-7</sup> b   |
| 60                 | 8               | 4,665x10 <sup>-7</sup> b   |
| 50                 | 8               | 5,145x10 <sup>-7</sup> c   |

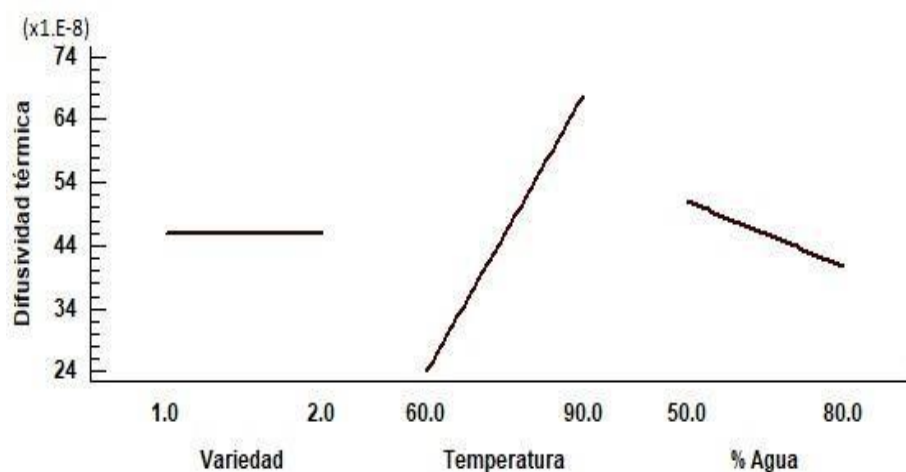
En la Tabla 11 se presentan los resultados de las comparaciones múltiples realizadas mediante la prueba de Tukey, con el fin de analizar las diferencias en difusividad térmica en función de tres variables fundamentales: variedad, temperatura y porcentaje de humedad. Los resultados indican que, en lo referente a la variedad, no existen diferencias estadísticamente significativas entre las variedades Bourbon y Catimor. Este hallazgo refuerza la idea de que, bajo las condiciones experimentales establecidas, las características intrínsecas asociadas a la identidad varietal no generan variaciones detectables en esta propiedad termofísica.

Por otro lado, cuando se analiza la influencia de la temperatura, sí se observan diferencias significativas entre los distintos niveles térmicos comprendidos entre 60 °C y 90 °C. En particular, se registra un incremento progresivo en los valores de difusividad

térmica a medida que aumenta la temperatura, lo cual sugiere una relación directa entre energía térmica aplicada y capacidad del sistema para transmitir calor en forma ordenada.

En cuanto al efecto del contenido de agua, se identifica una tendencia claramente decreciente en la difusividad térmica conforme aumenta la proporción de humedad en la muestra. Esta reducción puede explicarse por el desplazamiento relativo de los componentes sólidos —más eficientes en la conducción del calor— por parte del agua, cuya contribución al proceso de transferencia térmica es fundamentalmente convectiva. Así, a mayor contenido de agua, disminuye la conducción neta y se modifica el mecanismo dominante de transferencia de energía, lo cual impacta directamente en el valor medido de difusividad térmica.

Las Figuras 16, 17 y 18 ofrecen una representación gráfica de estas tendencias, permitiendo visualizar la evolución de la difusividad térmica en función de las variables principales, así como la superficie de respuesta estimada y los contornos asociados a dicha superficie. Estas herramientas visuales facilitan la interpretación de las interacciones complejas entre los factores estudiados, contribuyendo a una comprensión más integradora del comportamiento térmico del café tostado y molido bajo distintas condiciones experimentales.

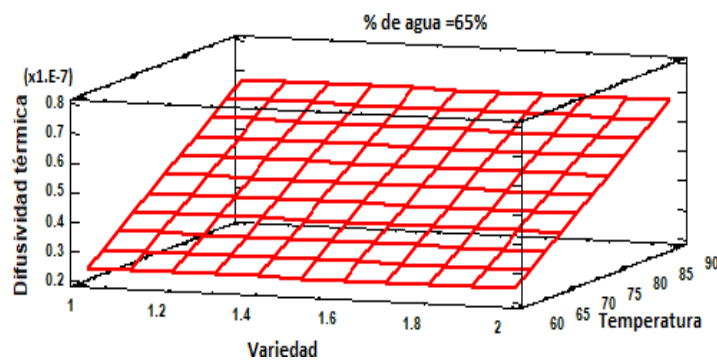


**Figura 16.** Gráfica de los efectos principales de difusividad térmica.

La Figura 16 permite confirmar que las variedades Bourbon y Catimor exhiben valores estadísticamente similares en términos de difusividad térmica, lo cual refuerza los hallazgos previos derivados del análisis de varianza. No obstante, esta representación gráfica pone de relieve cómo la temperatura influye de manera directa y positiva en dicha

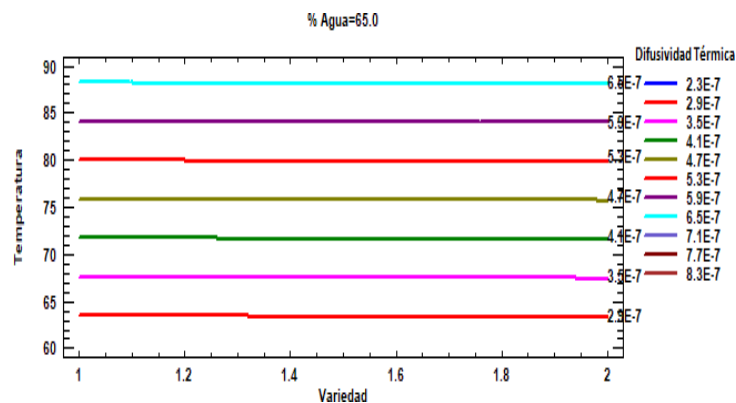
propiedad: a medida que se incrementa la temperatura, se observa un aumento proporcional en la capacidad del sistema para conducir el calor. Por otro lado, el aumento del porcentaje de agua en la formulación tiene un efecto inverso, asociado a la disminución de la fracción de sólidos en la matriz del café tostado y molido. Este fenómeno implica una reducción en la densidad efectiva del medio conductor, lo cual afecta negativamente la velocidad de transferencia térmica.

La Figura 17 complementa esta interpretación al ofrecer una visualización tridimensional que ilustra con mayor claridad la tendencia general de la difusividad térmica en función de las tres variables consideradas: variedad, temperatura y porcentaje de agua. Esta representación permite apreciar no solo el comportamiento individual de cada factor, sino también sus interacciones, evidenciando así la complejidad del fenómeno térmico en relación con las características fisicoquímicas del café procesado.



**Figura 17.** Superficie de respuesta estimada de difusividad térmica.

Por su parte, la Figura 18 muestra los contornos de la superficie de respuesta. Dado que la variedad no influye significativamente en la difusividad térmica, se observa que esta aumenta con la temperatura y disminuye conforme se incrementa el porcentaje de agua.



**Figura 18.** Contornos de la superficie de respuesta estimada de difusividad térmica.

Los resultados obtenidos en este estudio coinciden con los hallazgos reportados por Kostaropoulos y Saravacos (1997), quienes observaron una reducción significativa de la difusividad térmica en lo que denominan *región II* del contenido de humedad, comprendida entre 5% y 30%. En esta fase del proceso de hidratación, la humedad no se distribuye de manera homogénea en el medio, sino que se adsorbe formando capas multimoleculares sobre las superficies internas de la estructura sólida. A medida que el contenido hídrico aumenta, los poros capilares comienzan a llenarse progresivamente de agua, desplazando al aire que inicialmente ocupaba dichos espacios.

Este fenómeno tiene implicaciones directas sobre la dinámica de transferencia de calor, ya que la difusividad térmica del agua líquida es considerablemente menor que la del aire. Por tanto, el reemplazo del aire —con propiedades conductoras más favorables— por agua en los espacios intersticiales provoca una disminución global en la capacidad del sistema para transmitir calor de forma eficiente. Este comportamiento refuerza la idea de que la relación entre difusividad térmica y contenido de humedad no es lineal, sino que está mediada por cambios estructurales y redistributivos dentro de la matriz física del material analizado.

**Tabla 12.** Coeficiente de regresión de difusividad térmica.

| <b>Coefficiente</b> | <b>Estimado</b> |
|---------------------|-----------------|
| Constante           | -8,35677x10-7   |
| A: Variedad         | 1,11343x10-8    |
| B: Temperatura      | 2,00692x10-8    |
| C: % Agua           | 3,03767x10-9    |
| AB                  | 0,0             |
| AC                  | 0,0             |
| BC                  | 0,0             |

Con el objetivo de construir un modelo matemático capaz de predecir el comportamiento de la difusividad térmica en diferentes variedades de café bajo condiciones controladas de temperatura y humedad —específicamente, en un rango térmico de 60 °C a 90 °C y con contenidos de agua comprendidos entre 50% y 80%—, se implementó un análisis de regresión lineal múltiple. Este enfoque permitió establecer relaciones funcionales entre la propiedad termofísica estudiada y las variables

independientes consideradas en el diseño experimental.

Los coeficientes de regresión resultantes del ajuste se presentan en la Tabla 12, junto con la ecuación general que describe la relación entre dichas variables. La expresión obtenida representa una herramienta predictiva útil para estimar la difusividad térmica en función de los niveles de temperatura y humedad específicos, facilitando así la comprensión del fenómeno térmico bajo distintos escenarios de procesamiento. Esta modelación constituye un paso fundamental hacia la posibilidad de simular y optimizar los procesos térmicos involucrados en el tostado del café desde una perspectiva cuantitativa y reproducible.

$$\begin{aligned} \text{Difusividad térmica} = & -8,35677 \times 10^{-7} + 1,11343 \times 10^{-8} * \text{Variedad} + 2,00692 \times 10^{-8} * \\ & \text{Temperatura} + 3,03767 \times 10^{-9} * \% \text{ Agua} + 0,0 * \text{Variedad} * \text{Temperatura} + \\ & 0,0 * \text{Variedad} * \% \text{ Agua} + 0,0 * \text{Temperatura} * \% \text{ Agua} \end{aligned}$$

Finalmente, la ecuación del modelo resultante es:

$$DT = -8,35677 \times 10^{-7} + 1,11343 \times 10^{-8} * A + 2,00692 \times 10^{-8} * B + 3,03767 \times 10^{-9} * C$$

#### 4.2.2. Calor específico del café de las variedades Bourbon y Catimor

En el Anexo 11 se documentan los valores de la constante C , asociados a las temperaturas del calorímetro (60 °C, 70 °C, 80 °C y 90 °C), utilizados como insumo fundamental para la determinación del calor específico de las variedades de café Bourbon y Catimor. Estos coeficientes representan un elemento clave en el cálculo calibrado de la capacidad térmica específica de las muestras analizadas.

Los Anexos 12 al 15 recogen, a su vez, los valores experimentales del calor específico obtenidos bajo diferentes condiciones combinadas de temperatura (60 °C, 70 °C, 80 °C y 90 °C) y proporciones de agua (50%, 60%, 70% y 80%), permitiendo así una evaluación sistemática del comportamiento térmico del café tostado y molido en función de dichas variables. Cada uno de estos anexos corresponde a una combinación específica entre temperatura y humedad, lo cual facilita la comparación intertratamientos y la identificación de tendencias generales.

La Tabla 14 presenta los resultados del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al calor específico del café tostado y molido, considerando como factores principales la variedad, la temperatura y el porcentaje de agua. Según los resultados estadísticos

derivados de este análisis, no se observan diferencias significativas entre las variedades Bourbon y Catimor, ya que el valor  $p$  asociado a este factor es mayor a 0,05. Esto sugiere que, dentro del rango de variabilidad estudiado, la naturaleza varietal no influye de forma distintiva sobre esta propiedad termofísica.

En contraste, sí se detectan efectos estadísticamente significativos atribuibles tanto a la temperatura como al porcentaje de agua, siendo también significativa la interacción entre ambos factores (valor  $p < 0,05$ ). Esta evidencia indica que tanto el nivel térmico como la composición hídrica del medio tienen un impacto determinante en la capacidad del sistema para absorber energía calorífica. Con el fin de profundizar en estas diferencias y establecer relaciones más específicas entre los niveles de los factores, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey, orientada a evaluar el efecto individual y combinado de la temperatura y el contenido de agua sobre el calor específico del café.

**Tabla 13.** Promedios de calor específico encontrado en función a la variedad de café, las temperaturas y cantidad de agua.

| Variedad | Porcentaje agua y café | Calor Específico a 60°C (kJ/kg C) | Calor Específico a 70°C (kJ/kg C) | Calor Específico a 80°C (kJ/kg C) | Calor Específico a 90°C (kJ/kg C) |
|----------|------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Bourbon  | 50% agua y 50% café    | 3,1434                            | 5,7052                            | 8,1146                            | 9,9035                            |
|          | 60% agua y 40% café    | 6,4175                            | 10,3568                           | 12,6053                           | 14,8092                           |
|          | 70% agua y 30% café    | 15,7700                           | 17,1987                           | 19,9862                           | 24,3713                           |
|          | 80% agua y 20% café    | 27,1617                           | 35,4182                           | 36,7512                           | 46,5239                           |
| Catimor  | 50% agua y 50% café    | 3,0434                            | 5,9052                            | 8,2146                            | 9,8511                            |
|          | 60% agua y 40% café    | 6,9175                            | 10,0568                           | 12,3053                           | 14,7092                           |
|          | 70% agua y 30% café    | 14,7700                           | 18,1987                           | 18,9862                           | 24,8713                           |
|          | 80% agua y 20% café    | 26,1617                           | 34,7182                           | 35,4512                           | 46,7239                           |

**Tabla 14.** Análisis de varianza de calor específico de café molido y tostado en función de la variedad, temperatura y porcentaje de agua. 45

| Fuente         | Suma de Cuadrados | G.L. | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|----------------|-------------------|------|----------------|---------|---------|
| A: Variedad    | 0,351206          | 1    | 0,351206       | 0,02    | 0,8814  |
| B: Temperatura | 489,97            | 1    | 489,97         | 31,69   | 0,0000  |
| C: % Agua      | 3715,85           | 1    | 3715,85        | 240,37  | 0,0000  |
| AB             | 0,0875534         | 1    | 0,0875534      | 0,01    | 0,9406  |
| AC             | 0,522442          | 1    | 0,522442       | 0,03    | 0,8556  |
| BC             | 69,5531           | 1    | 69,5531        | 4,50    | 0,0440  |
| Error total    | 386,476           | 25   | 15,4591        |         |         |
| Total (corr.)  | 4662,81           | 31   |                |         |         |

La Tabla 15 presenta las comparaciones múltiples del calor específico según la variedad, la temperatura y el porcentaje de humedad, utilizando la prueba de Tukey.

**Tabla 15.** Comparaciones múltiples de calor específico por variedad, temperatura y porcentaje de humedad mediante Tukey.

| Variedad           | Recuento | Media    |
|--------------------|----------|----------|
| Bourbon            | 16       | 18,3898a |
| Catimor            | 16       | 18,1803a |
| <b>Temperatura</b> |          |          |
| 60°C               | 8        | 12,9232a |
| 70°C               | 8        | 17,1947b |
| 80°C               | 8        | 19,0518b |
| 90°C               | 8        | 23,9704c |
| <b>% de Agua</b>   |          |          |
| 50                 | 8        | 6,73513a |
| 60                 | 8        | 11,0222b |
| 70                 | 8        | 19,2691c |
| 80                 | 8        | 36,1138d |

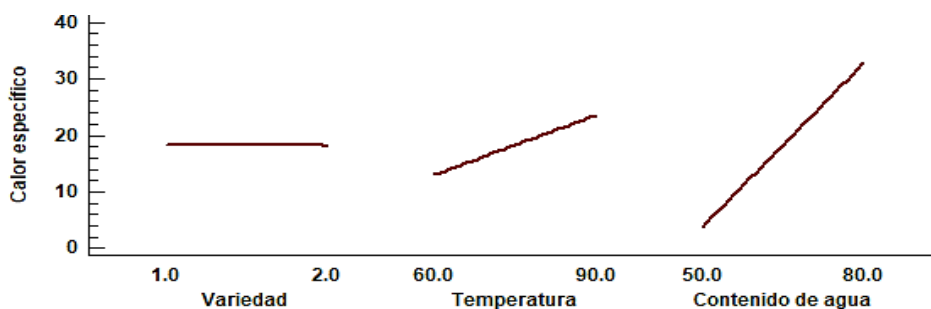
De acuerdo con los resultados estadísticos presentados en la Tabla 15, no se observan diferencias significativas entre las variedades Bourbon y Catimor en cuanto al calor específico del café tostado y molido. Sin embargo, un análisis más detallado de los datos revela que, al considerar los distintos niveles térmicos, sí existen variaciones notables dentro de ciertos intervalos. Por ejemplo, entre 60 °C y 70 °C se registran

diferencias estadísticamente significativas, mientras que entre 70 °C y 80 °C dichas diferencias no resultan significativas. En contraste, entre 80 °C y 90 °C vuelve a evidenciarse una variación marcada en el calor específico, lo cual sugiere que el comportamiento térmico del sistema no es uniforme a través del rango completo de temperaturas evaluadas.

Este patrón indica una tendencia general ascendente: el calor específico aumenta progresivamente en función de la temperatura. Este incremento refleja una mayor capacidad del sistema para almacenar energía térmica conforme se eleva la temperatura del medio. Paralelamente, se observa también una relación directa entre el contenido de agua y el valor del calor específico: a medida que aumenta la proporción de agua en la muestra, se registra un incremento en esta propiedad termofísica. Este fenómeno puede explicarse por la menor presencia de sólidos —con una capacidad calorífica específica inferior— y el predominio relativo del agua, cuyo valor de calor específico es considerablemente mayor.

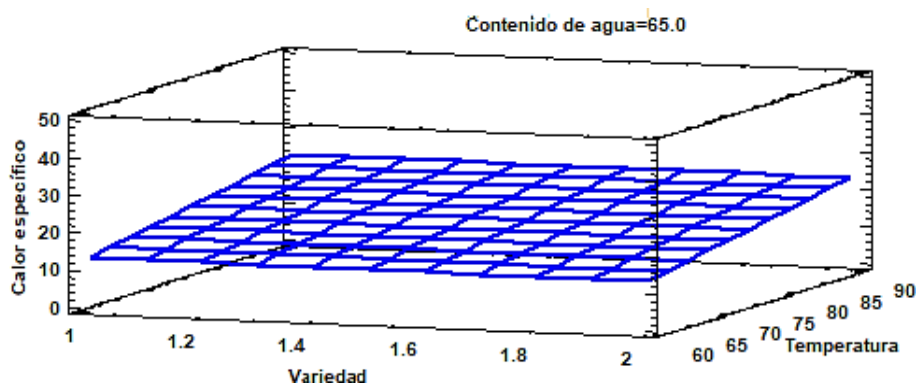
Las Figuras 19, 20 y 21 ilustran gráficamente estas tendencias, representando la evolución del calor específico en función de las variables principales, junto con la superficie de respuesta estimada y sus correspondientes curvas de nivel. Estas herramientas visuales permiten apreciar tanto las interacciones entre los factores como la forma funcional de la relación térmica bajo diferentes condiciones experimentales.

En particular, la Figura 19 permite confirmar visualmente que, desde el punto de vista estadístico, las variedades Bourbon y Catimor exhiben comportamientos térmicos comparables en términos de calor específico. No obstante, se reafirma que este parámetro crece conforme se incrementa la temperatura. Asimismo, se verifica que un mayor contenido de agua también conduce a valores superiores de calor específico, lo cual refuerza la hipótesis de que la composición hídrica del sistema modifica su respuesta calórica, en virtud del desplazamiento de los componentes sólidos que ofrecen menor resistencia al flujo de calor.



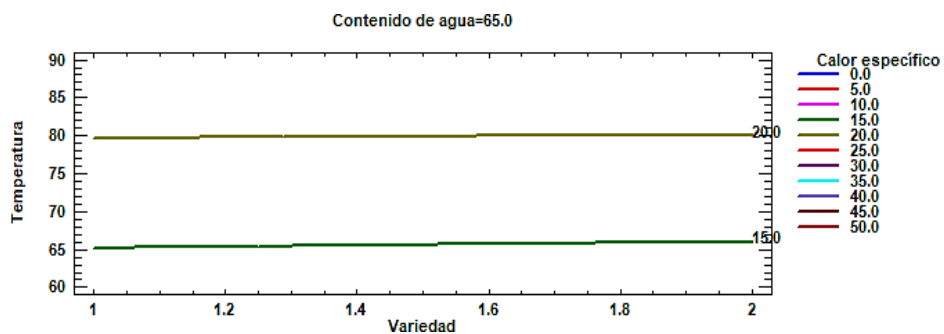
**Figura 19.** Gráfica de los efectos principales de calor específico.

La Figura 20 permite visualizar con mayor claridad la estabilidad del calor específico según la variedad de café, así como su incremento con la temperatura y el porcentaje de agua.



**Figura 20.** Superficie de respuesta estimada de calor específico.

En la Figura 21 se representan los contornos de la superficie de respuesta del calor específico. Se observa que, aunque el comportamiento es similar entre variedades, el calor específico aumenta con la temperatura y con el incremento del porcentaje de agua.



**Figura 21.** Contornos de la superficie de respuesta estimada de calor específico.

Para desarrollar un modelo matemático que permita predecir el calor específico de distintas variedades de café en función de temperaturas entre 60°C y 90°C y proporciones de agua entre 50% y 80%, se aplicó un modelo de regresión lineal cuyos coeficientes se presentan en la Tabla 16.

**Tabla 16.** Coeficiente de regresión de calor específico.

| <b>Coeficiente</b> | <b>Estimado</b> |
|--------------------|-----------------|
| Constante          | -13,9772        |
| A: Variedad        | 0,574405        |
| B: Temperatura     | -0,430678       |
| C: % Agua          | 0,113538        |
| AB                 | 0,009357        |
| AC                 | -0,022857       |
| BC                 | 0,0117943       |

La Tabla 16 muestra la ecuación de regresión ajustada a los datos experimentales.

$$\text{Calor específico} = -13,9772 + 0,574405*\text{Variedad} - 0,430678*\text{Temperatura} + 0,113538*\text{Contenido de agua} + 0,009357*\text{Variedad}*\text{Temperatura} - 0,022857*\text{Variedad}*\text{Contenido de agua} + 0,0117943*\text{Temperatura}*\text{Contenido de agua}$$

La ecuación final obtenida es:

48

$$C_e = -13,9772 + 0,574405*A - 0,430678*B + 0,113538*C + 0,009357*A*B - 0,022857*A*C + 0,0117943*B*C$$

#### 4.2.3. Densidad del café de las variedades Bourbon y Catimor

Los Anexos 16 al 19 recogen los valores experimentales de densidad obtenidos bajo diferentes condiciones combinadas de temperatura (60 °C, 70 °C, 80 °C y 90 °C) y proporciones de agua (50%, 60%, 70% y 80%), considerando ambas variedades estudiadas: Bourbon y Catimor. Estos anexos ofrecen una presentación detallada de los datos primarios, permitiendo un examen fino de las variaciones registradas dentro de cada tratamiento experimental.

No obstante, al analizar los valores de densidad contenidos en dichos anexos, se observa una alta similitud entre las mediciones, lo cual dificulta la identificación inmediata de diferencias o patrones estadísticamente significativos. Esta proximidad numérica sugiere una baja dispersión entre los tratamientos, lo que a su vez impide establecer conclusiones concluyentes sobre posibles efectos diferenciales sin un

procesamiento estadístico adicional.

Con el fin de superar esta limitación descriptiva y facilitar la interpretación global de los resultados, se elaboró un cuadro resumen en el que se organizaron los promedios generales por tratamiento. Este instrumento de síntesis permitió aplicar el análisis de varianza (ANOVA ) según el diseño factorial planteado, considerando como factores principales la *variedad* (Bourbon y Catimor), la *temperatura* (60 °C, 70 °C, 80 °C y 90 °C) y el *porcentaje de agua* (50%, 60%, 70% y 80%). Este enfoque estadístico representa una herramienta clave para discernir si las pequeñas variaciones observadas responden a efectos sistemáticos de los factores evaluados o simplemente reflejan fluctuaciones aleatorias del sistema.

**Tabla 17.** Promedios de densidad encontrado en función a la variedad de café, las temperaturas y cantidad de agua.

| Variedad | Porcentaje agua y café | Densidad a 60°C (Kg/m <sup>3</sup> ) | Densidad a 70°C (Kg/m <sup>3</sup> ) | Densidad a 80°C (Kg/m <sup>3</sup> ) | Densidad a 90°C (Kg/m <sup>3</sup> ) |
|----------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Bourbon  | 50% agua y 50% café    | 1,1247                               | 1,1243                               | 1,1233                               | 1,1220                               |
|          | 60% agua y 40% café    | 1,1247                               | 1,1243                               | 1,1233                               | 1,1220                               |
|          | 70% agua y 30% café    | 1,1357                               | 1,1343                               | 1,1327                               | 1,1313                               |
|          | 80% agua y 20% café    | 1,1367                               | 1,1347                               | 1,1330                               | 1,1310                               |
| Catimor  | 50% agua y 50% café    | 1,1347                               | 1,1343                               | 1,1333                               | 1,1320                               |
|          | 60% agua y 40% café    | 1,2047                               | 1,2043                               | 1,2033                               | 1,2020                               |
|          | 70% agua y 30% café    | 1,2257                               | 1,2243                               | 1,2227                               | 1,2213                               |
|          | 80% agua y 20% café    | 1,1567                               | 1,1547                               | 1,1530                               | 1,1510                               |

En la Tabla 18 se presenta el análisis de varianza de la densidad de los granos de café tostado y molido, considerando la variedad, la temperatura y el porcentaje de agua.

**Tabla 18.** Análisis de varianza de densidad de café molido y tostado en función de la variedad, temperatura y porcentaje de agua.

| Fuente               | Suma de Cuadrados | G.L.      | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P       |
|----------------------|-------------------|-----------|----------------|---------|---------------|
| A: Variedad          | 0,02              | 1         | 0,02           | 25,14   | <b>0,0000</b> |
| B: Temperatura       | 0,000067081       | 1         | 0,000067081    | 0,08    | 0,7739        |
| C: % Agua            | 0,00147622        | 1         | 0,00147622     | 1,86    | 0,1853        |
| AB                   | 0,0               | 1         | 0,0            | 0,00    | 1,0000        |
| AC                   | 0,00016           | 1         | 0,00016        | 0,20    | 0,6577        |
| BC                   | 0,0000060552      | 1         | 0,0000060552   | 0,01    | 0,9312        |
| Error total          | 0,0198919         | 25        | 0,000795676    |         |               |
| <b>Total (corr.)</b> | <b>0,0416013</b>  | <b>31</b> |                |         |               |

Los resultados del análisis de varianza, sintetizados en la Tabla 18, revelan que la densidad del café tostado y molido presenta diferencias estadísticamente significativas entre las variedades analizadas (Bourbon y Catimor), ya que el valor p asociado a este factor es inferior al umbral convencional de 0,05. Este hallazgo indica que la identidad varietal ejerce un efecto determinante en esta propiedad física, lo cual sugiere la existencia de diferencias estructurales o composicionales inherentes a cada tipo de grano.

En contraste, no se encontraron diferencias significativas atribuibles ni a la temperatura ni al porcentaje de agua en los rangos evaluados (60 °C a 90 °C y 50% a 80%, respectivamente), dado que en ambos casos los valores p resultaron superiores a 0,05. Esto implica que, dentro del diseño experimental planteado, estas variables no influyen de manera sistemática sobre la densidad del producto final.

Con el fin de profundizar en estos hallazgos y establecer comparaciones puntuales entre los niveles de los factores considerados, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey, orientada a evaluar la incidencia específica de la variedad, la temperatura y el contenido de agua sobre la densidad del café procesado.

La Tabla 19 presenta los resultados de dichas comparaciones múltiples, evidenciando diferencias estadísticamente significativas entre las variedades Bourbon y Catimor, lo cual refuerza la idea de que las características genéticas y morfológicas propias de cada una inciden directamente en la compactación del material molido. No obstante, en relación con la temperatura —dentro del rango de 60 °C a 90 °C— no se observaron variaciones significativas en la densidad, lo que sugiere que el tratamiento

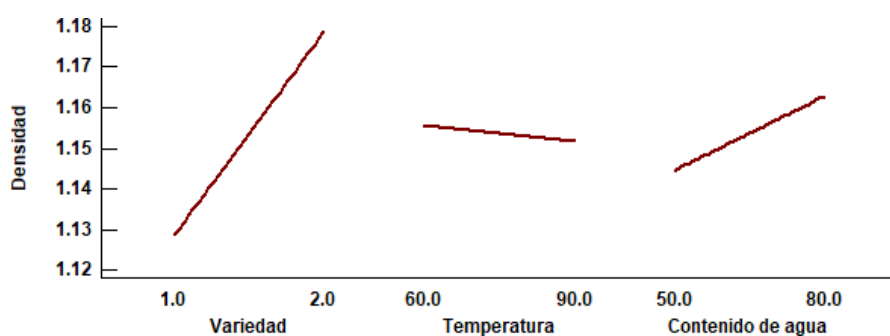
térmico no altera de forma apreciable la masa volumétrica del sistema bajo las condiciones experimentales establecidas.

Respecto al contenido de agua, tampoco se detectaron diferencias significativas entre los extremos del rango evaluado (50% y 80%), aunque sí se registraron variaciones específicas entre ciertos niveles intermedios. En particular, se identificó una diferencia significativa entre los tratamientos de 50% y 60% de humedad, así como entre los de 80% y 70%. No obstante, no se observaron discrepancias entre los contenidos de 80% y 60%, ni entre 60% y 70%. Esta dinámica sugiere que el efecto del contenido de agua sobre la densidad no es lineal ni gradual, sino que responde a interacciones más complejas entre la estructura del grano y la distribución del agua en su interior.

**Tabla 19.** Comparaciones múltiples de densidad por variedad, temperatura y porcentaje de humedad mediante Tukey.

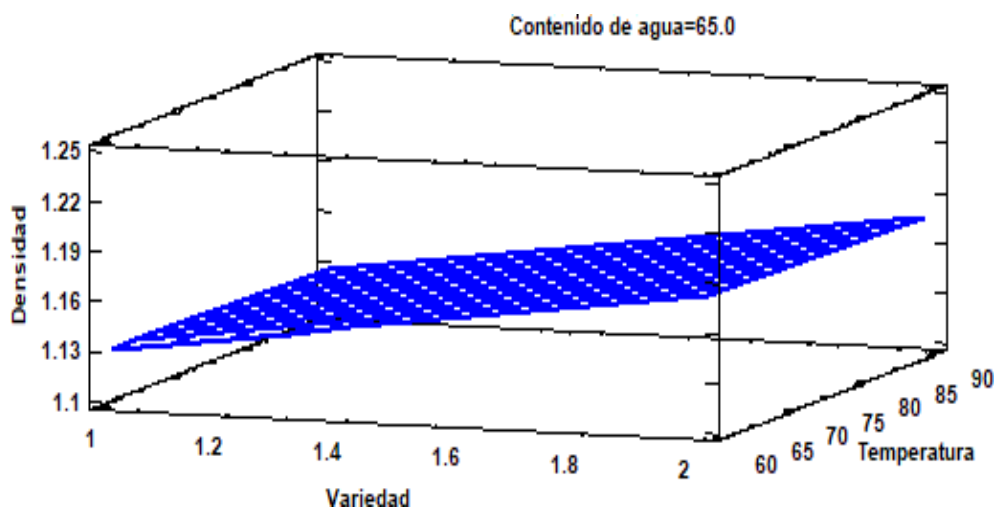
| <b>Variedad</b>    | <b>Recuento</b> | <b>Media</b>          |
|--------------------|-----------------|-----------------------|
| Bourbon            | 16              | 1, 12863a             |
| Catimor            | 16              | 1,17862 <sup>b</sup>  |
| <b>Temperatura</b> |                 |                       |
| 60°C               | 8               | 1, 15545a             |
| 70°C               | 8               | 1, 1544a              |
| 80°C               | 8               | 1, 15307a             |
| 90°C               | 8               | 1, 15157a             |
| <b>% de Agua</b>   |                 |                       |
| 80                 | 8               | 1, 12857a             |
| 70                 | 8               | 1,14385 <sup>ab</sup> |
| 60                 | 8               | 1,16357 <sup>bc</sup> |
| 50                 | 8               | 1,1785 <sup>c</sup>   |

Las Figuras 22, 23 y 24 muestran la tendencia de la densidad en función de las variables principales, la superficie de respuesta estimada y los contornos de la superficie de respuesta.



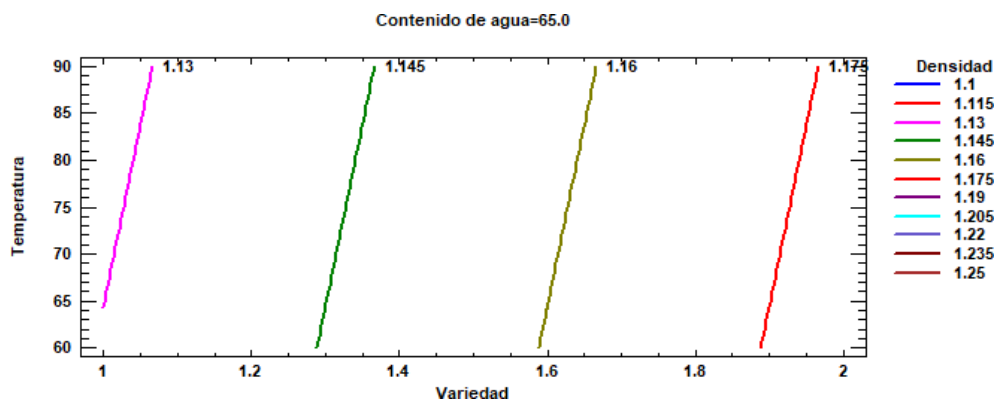
**Figura 22.** Gráfica de los efectos principales de densidad.

En la Figura 22 se evidencia que las variedades Bourbon y Catimor presentan diferencias estadísticas en su densidad. En contraste, el efecto de la temperatura es mínimo, aunque se observa una leve disminución de la densidad conforme la temperatura aumenta. Con respecto al porcentaje de agua, se nota un ligero incremento de la densidad a medida que la cantidad de agua aumenta, lo que se atribuye a la reducción de la porosidad y del espacio entre las partículas.



**Figura 23.** Superficie de respuesta estimada de densidad.

La Figura 23 permite visualizar con mayor claridad la tendencia de la densidad. Se confirma que la variedad de café influye estadísticamente en la densidad, mientras que la temperatura produce un leve aumento y el porcentaje de agua también contribuye a un incremento ligero.



**Figura 24.** Contornos de la superficie de respuesta estimada de densidad.

En la Figura 24 se presentan los contornos de la superficie de respuesta de

la densidad. Se observa que las variedades de café difieren estadísticamente en este parámetro. Asimismo, se confirma que la densidad disminuye con la temperatura y aumenta con el porcentaje de agua.

**Tabla 20.** Coeficiente de regresión de densidad.

| <b>Coefficiente</b> | <b>Estimado</b> |
|---------------------|-----------------|
| Constante           | 1,07089         |
| A: Variedad         | 0,024           |
| B: Temperatura      | 0,0000967       |
| C: % Agua           | 0,0002685       |
| AB                  | 0,0             |
| AC                  | 0,0004          |
| BC                  | -0,00000348     |

Para desarrollar un modelo matemático que permita predecir la densidad en distintas variedades de café en función de temperaturas entre 60°C y 90°C y proporciones de agua entre 50% y 80%, se utilizó un modelo de regresión lineal cuyos coeficientes se detallan en la Tabla 20.

La Tabla 20 presenta la ecuación de regresión ajustada a los datos experimentales.

$$\text{Densidad} = 1,07089 + 0,024 * \text{Variedad} + 0,0000967 * \text{Temperatura} + 0,0002685 * \text{Contenido de agua} + 0,0 * \text{Variedad} * \text{Temperatura} + 0,0004 * \text{Variedad} * \text{Contenido de agua} - 0,00000348 * \text{Temperatura} * \text{Contenido de agua}$$

La ecuación final obtenida es:

$$\rho = 1,07089 + 0,024 * A + 0,0000967 * B + 0,0002685 * C + 0,0004 * A * C - 0,00000348 * B * C$$

#### 4.2.4. Conductividad térmica del café de las variedades Bourbon y Catimor

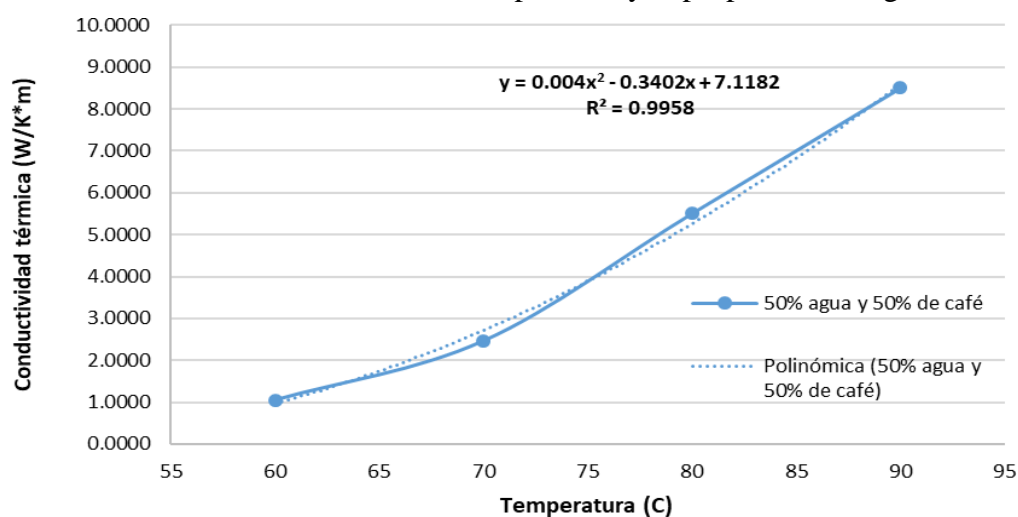
Los Anexos 20 al 23 presentan los valores de conductividad térmica en función de las variedades de café, las temperaturas de 60°C, 70°C, 80°C y 90°C, y las proporciones de agua de 50%, 60%, 70% y 80%.

Estos anexos incluyen datos de las tres variables en estudio con tres repeticiones. Sin embargo, para realizar un análisis más preciso, se consolidaron los promedios, los cuales se presentan en la Tabla 21.

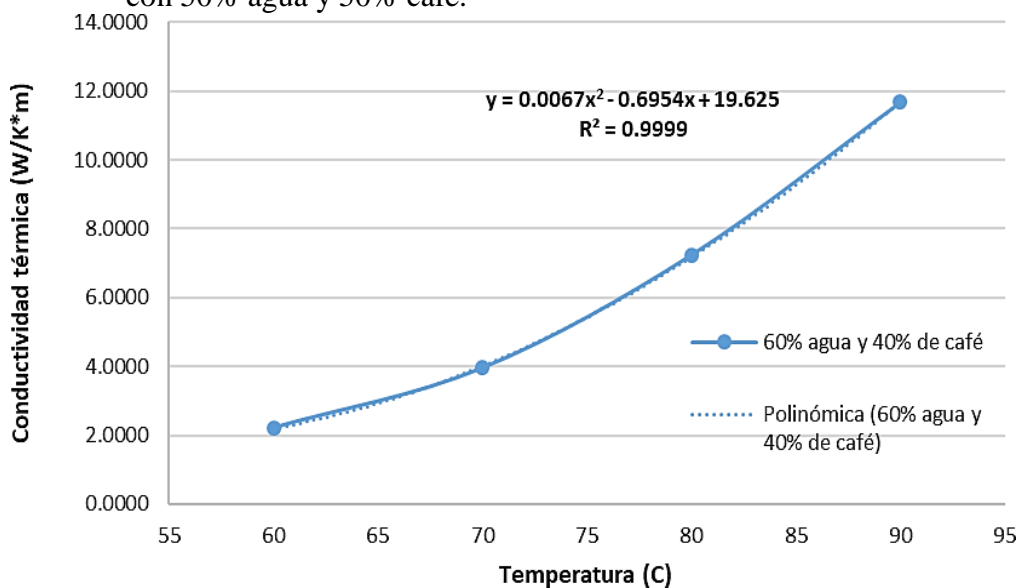
**Tabla 21.** Promedios de conductividad térmica encontrado en función a la variedad de café, las temperaturas y cantidad de agua.

| Variedad | Porcentaje agua y café | Conductividad térmica a 60°C (W/K.m) | Conductividad térmica a 70°C (W/K.m) | Conductividad térmica a 80°C (W/K.m) | Conductividad térmica a 90°C (W/K.m) |
|----------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Bourbon  | 50% agua y 50% café    | 1,0525                               | 2,4678                               | 5,5087                               | 8,5088                               |
|          | 60% agua y 40% café    | 2,2141                               | 3,9538                               | 7,2393                               | 11,6781                              |
|          | 70% agua y 30% café    | 4,6068                               | 6,7744                               | 10,3927                              | 19,9060                              |
|          | 80% agua y 20% café    | 8,1666                               | 12,0830                              | 18,5866                              | 32,6895                              |
| Catimor  | 50% agua y 50% café    | 1,4307                               | 2,6622                               | 6,1218                               | 9,1156                               |
|          | 60% agua y 40% café    | 2,6817                               | 4,6049                               | 7,9818                               | 13,0296                              |
|          | 70% agua y 30% café    | 5,5474                               | 7,6052                               | 11,6485                              | 22,1203                              |
|          | 80% agua y 20% café    | 7,2578                               | 12,6076                              | 19,3842                              | 33,8941                              |

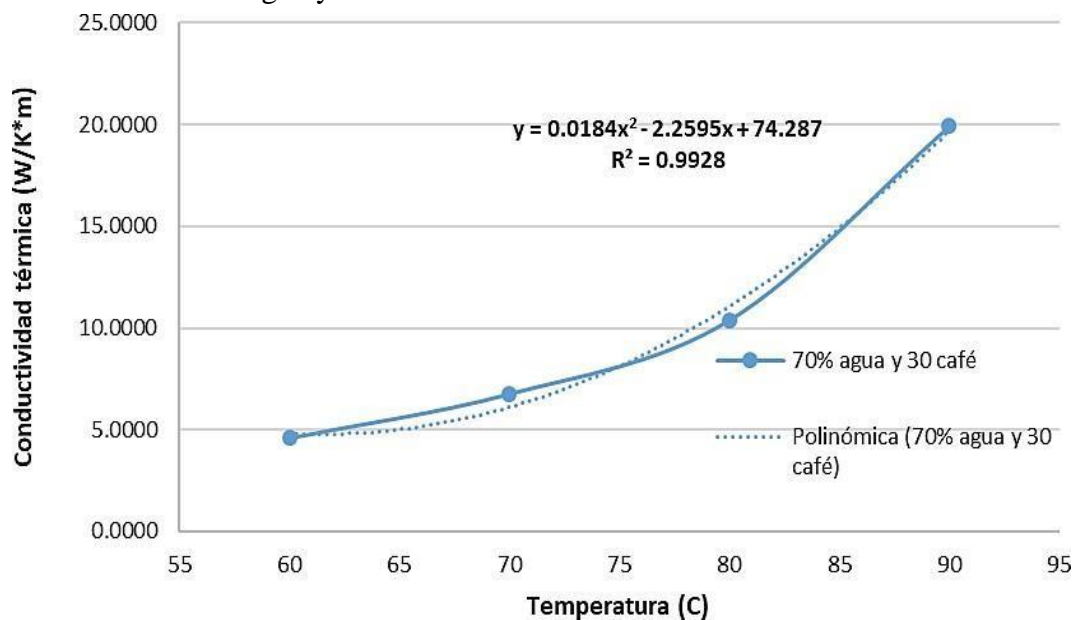
A partir de los datos de la Tabla 21, se elaboraron las curvas de conductividad térmica con el fin de visualizar mejor el comportamiento de esta propiedad termofísica en función de la variedad de café, la temperatura y la proporción de agua.



**Figura 25.** Conductividad térmica de la variedad Bourbon con respecto a la temperatura con 50% agua y 50% café.

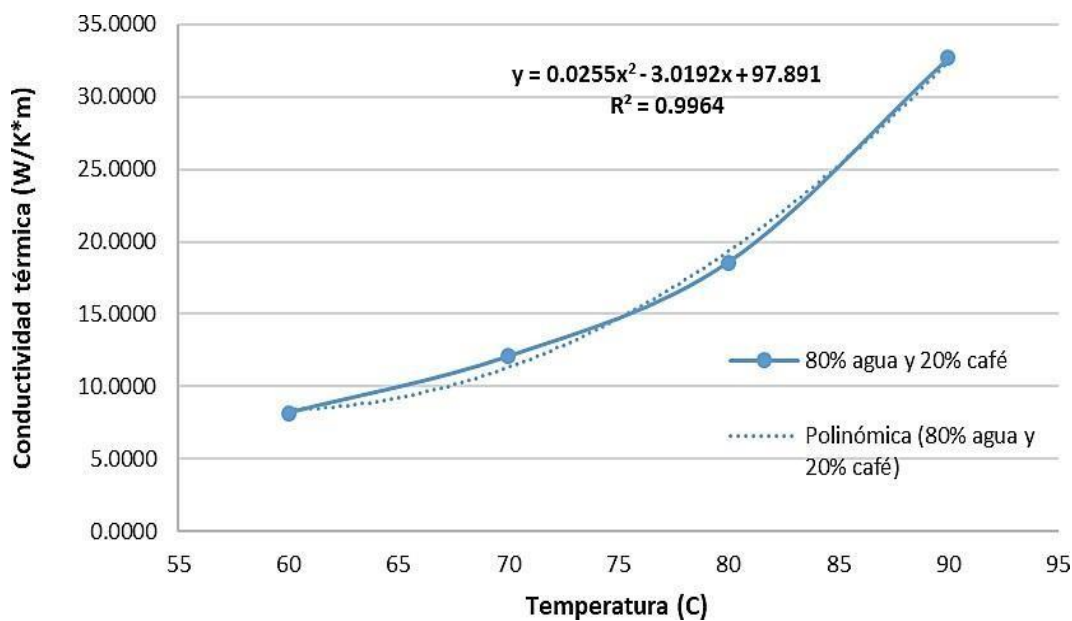


**Figura 26.** Conductividad térmica de la variedad Bourbon con respecto a la temperatura con 60% agua y 40% café.

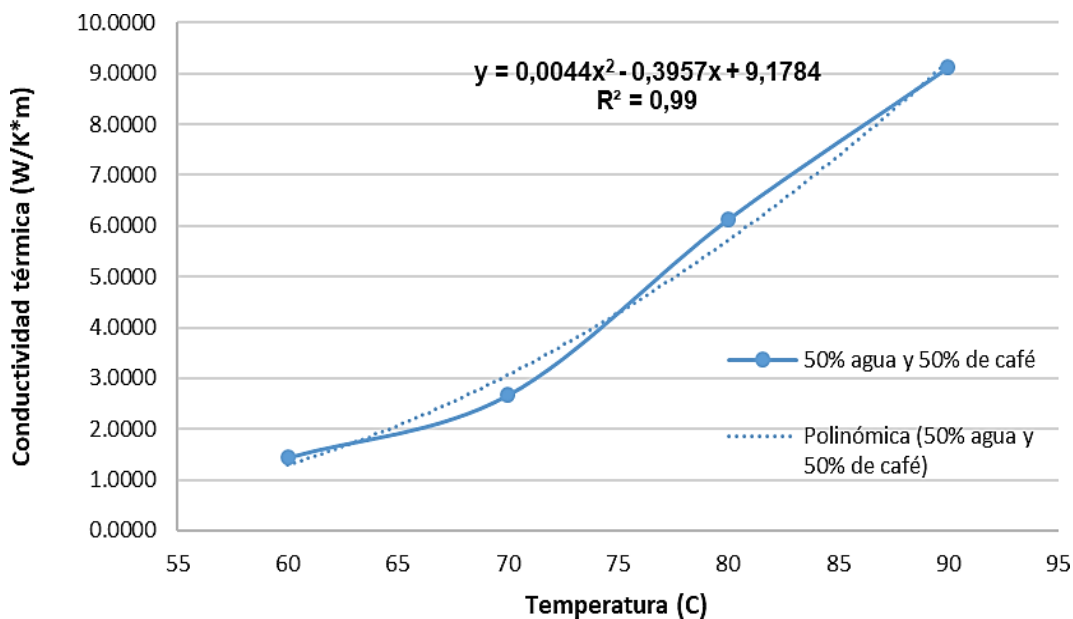


55

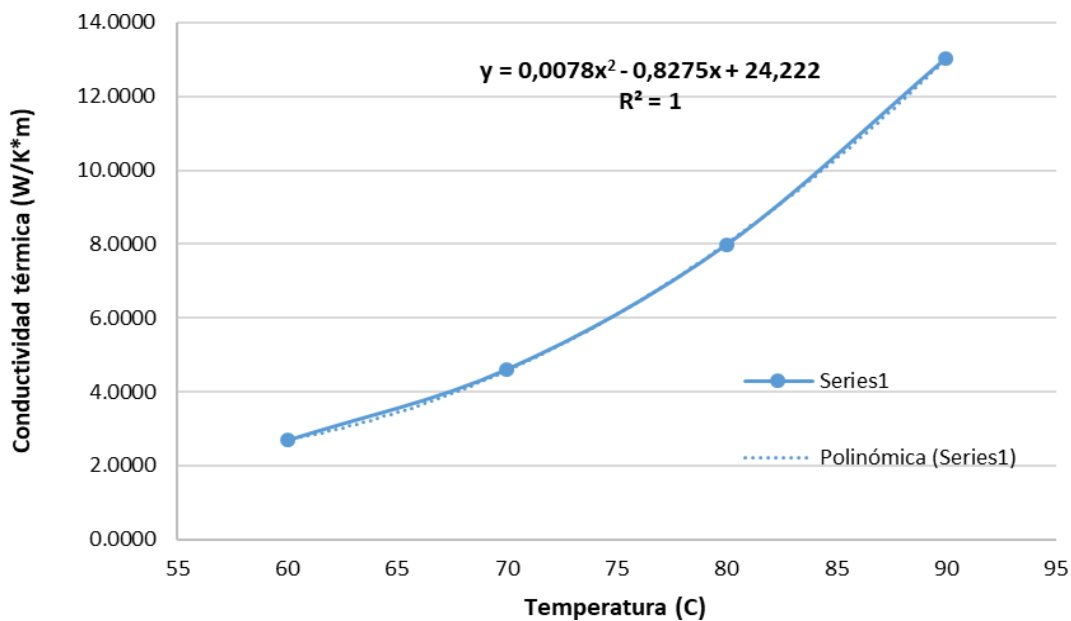
**Figura 27.** Conductividad térmica de la variedad Bourbon con respecto a la temperatura con 70% agua y 30% café.



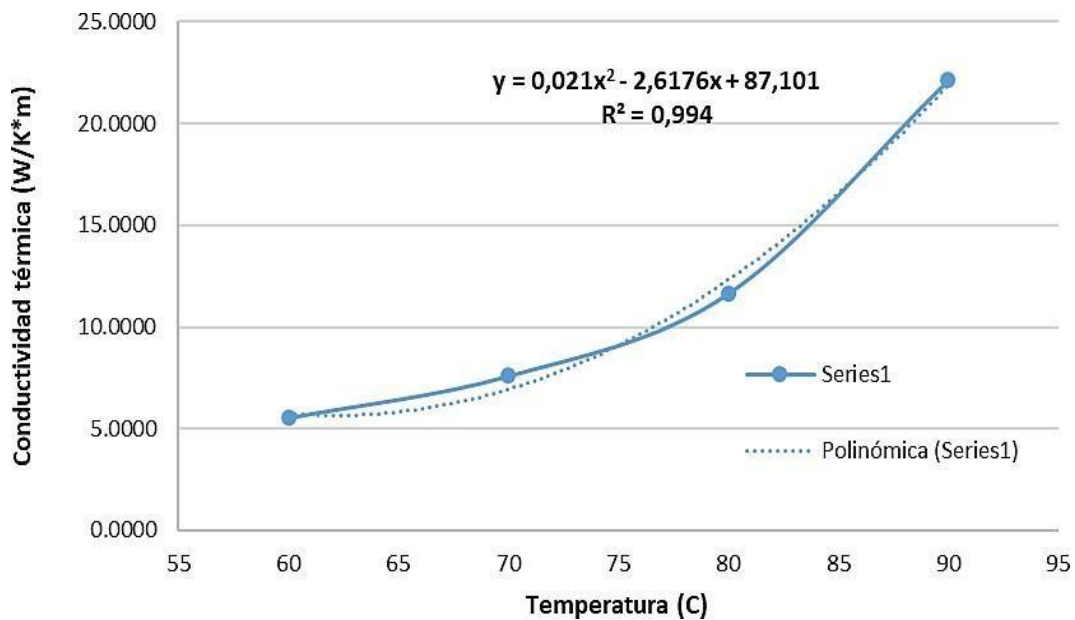
**Figura 28.** Conductividad térmica de la variedad Bourbon con respecto a la temperatura con 80% agua y 20% café.



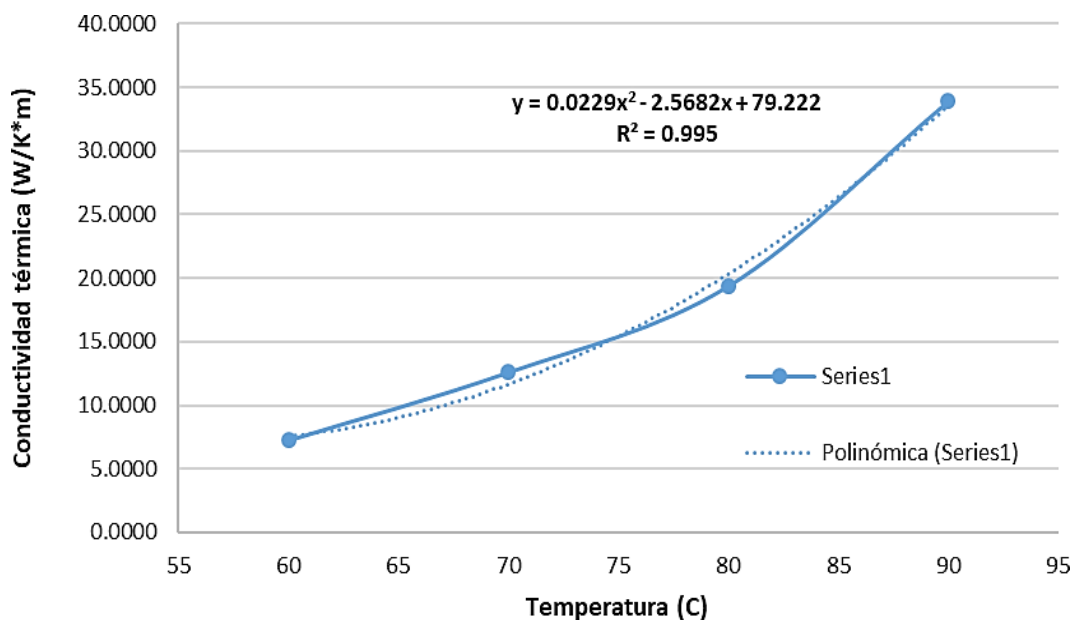
**Figura 29.** Conductividad térmica de la variedad Catimor con respecto a la temperatura con 50% agua y 50% café.



**Figura 30.** Conductividad térmica de la variedad Catimor con respecto a la temperatura con 60% agua y 40% café.



**Figura 31.** Conductividad térmica de la variedad Catimor con respecto a la temperatura con 70% agua y 30% café.



Las Figuras 25 a la 31 ilustran las curvas de conductividad térmica en función de la temperatura, cada una asociada a una proporción específica de agua en la muestra. A simple vista, estas representaciones gráficas exhiben una apariencia visualmente semejante, lo que podría llevar a interpretar un comportamiento térmico homogéneo entre los distintos tratamientos. No obstante, al aplicar un modelo de regresión lineal para ajustar los datos experimentales, se obtienen ecuaciones con parámetros diferenciados, lo cual sugiere —desde una perspectiva matemática— que las tendencias observadas no son estrictamente comparables entre sí.

Este contraste entre la percepción visual y el ajuste analítico motiva un análisis más riguroso de las diferencias entre las curvas, razón por la cual se implementó un análisis de varianza (ANOVA) con el fin de evaluar estadísticamente si dichas variaciones responden a efectos sistemáticos de los factores considerados o bien se deben a fluctuaciones aleatorias del sistema.

La Tabla 22 presenta los resultados de dicho análisis, en el cual se considera la conductividad térmica como variable dependiente, y como factores independientes se incluyen la variedad de café (Bourbon y Catimor), la temperatura (60 °C, 70 °C, 80 °C y

90 °C) y el porcentaje de agua (50%, 60%, 70% y 80%). Este enfoque permite discernir el impacto relativo de cada uno de estos componentes sobre la propiedad termofísica estudiada, así como identificar posibles interacciones entre ellos que podrían explicar la heterogeneidad observada en los modelos ajustados.

**Tabla 22.** Análisis de varianza de conductividad térmica de café molido y tostado en función de la variedad, temperatura y porcentaje de agua.

| Fuente         | Suma de Cuadrados | G.L. | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|----------------|-------------------|------|----------------|---------|---------|
| A: Variedad    | 4,3991            | 1    | 4,3991         | 0,71    | 0,4077  |
| B: Temperatura | 941,181           | 1    | 941,181        | 151,73  | 0,0000  |
| C: % Agua      | 803,81            | 1    | 803,81         | 129,58  | 0,0000  |
| AB             | 1,35183           | 1    | 1,35183        | 0,22    | 0,6447  |
| AC             | 0,0141621         | 1    | 0,0141621      | 0,00    | 0,9623  |
| BC             | 182,1             | 1    | 182,1          | 29,36   | 0,0000  |
| Error total    | 155,08            | 25   | 6,2032         |         |         |
| Total (corr.)  | 2087,94           | 31   |                |         |         |

Los resultados del análisis de varianza, sintetizados en la Tabla 22, indican que la conductividad térmica del café tostado y molido no presenta diferencias estadísticamente significativas entre las variedades analizadas (Bourbon y Catimor), ya que el valor  $p$  asociado a este factor es mayor a 0,05. Esto sugiere que, dentro del rango de condiciones evaluadas, la identidad varietal no influye de manera distintiva sobre esta propiedad termofísica.

En contraste, sí se observan efectos significativos atribuibles tanto a la temperatura como al porcentaje de agua, así como a la interacción entre ambos factores, dado que los valores  $p$  correspondientes resultan inferiores a 0,05. Este hallazgo refuerza la idea de que la conductividad térmica no depende de manera aislada de uno solo de estos parámetros, sino que emerge como resultado de una relación compleja e integrada entre la energía térmica aplicada y la composición hídrica del medio. Ante esta evidencia, se procedió a aplicar la prueba de comparación múltiple de Tukey con el fin de profundizar en el análisis de los efectos individuales y combinados de la temperatura y el contenido de agua sobre la conductividad térmica.

La Tabla 23 presenta los resultados de dichas comparaciones múltiples, corroborando que no existen diferencias estadísticas entre las variedades bajo ninguna

condición experimental. No obstante, al evaluar el impacto de la temperatura, se detectaron diferencias significativas entre ciertos intervalos térmicos: mientras no se observaron variaciones entre 60 °C y 70 °C, sí se registraron entre 70 °C y 80 °C, y entre 80 °C y 90 °C. Este patrón indica un comportamiento no lineal de la conductividad térmica en función del incremento térmico, lo cual refleja una posible modificación progresiva en la estructura interna del grano o en la movilidad del calor dentro del sistema.

En cuanto al efecto del porcentaje de agua, tampoco se encontraron diferencias significativas entre los contenidos de 50% y 60%, aunque sí se observaron entre los niveles superiores (60%, 70% y 80%). Esta tendencia sugiere que el impacto del agua sobre la conductividad térmica se manifiesta principalmente a partir de cierto umbral hídrico, más que en etapas iniciales de hidratación. En general, se verifica que a mayor proporción de agua, la conductividad térmica tiende a aumentar, fenómeno que puede explicarse por la reducción relativa de sólidos —con menor capacidad conductiva— y el predominio creciente del agua, cuya conductividad intrínseca es considerablemente superior. Este cambio en la composición matricial modifica la dinámica del flujo térmico, influyendo directamente sobre la eficiencia del proceso de transferencia de calor.

**Tabla 23.** Comparaciones múltiples de conductividad térmica por variedad, temperatura y porcentaje de humedad mediante Tukey.

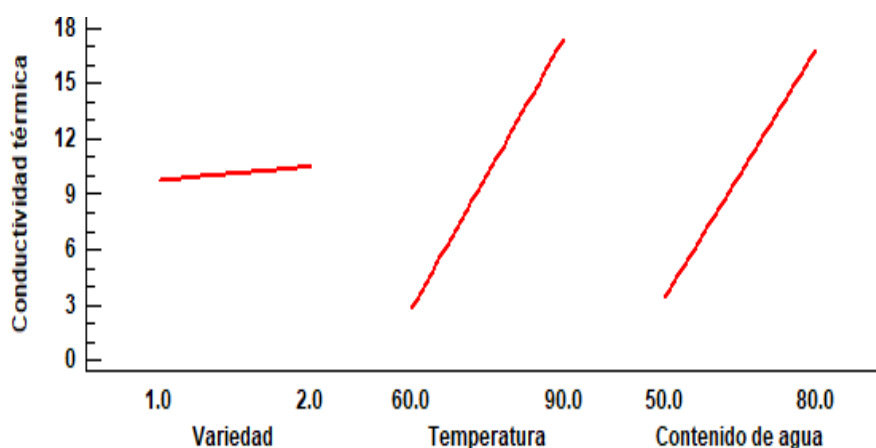
| <b>Variedad</b>    | <b>Recuento</b> | <b>Media</b> |
|--------------------|-----------------|--------------|
| Bourbon            | 16              | 9,73929a     |
| Catimor            | 16              | 10,4808a     |
| <b>Temperatura</b> |                 |              |
| 60°C               | 8               | 4,1197a      |
| 70°C               | 8               | 6,59486a     |
| 80°C               | 8               | 10,858b      |
| 90°C               | 8               | 18,8678c     |
| <b>% de Agua</b>   |                 |              |
| 50                 | 8               | 4,60851a     |
| 60                 | 8               | 6,67291a     |
| 70                 | 8               | 11,0752b     |
| 80                 | 8               | 18,0837c     |

Las Figuras 33, 34 y 35 ilustran la tendencia de la conductividad térmica en función de las variables independientes consideradas en el estudio —variedad, temperatura y porcentaje de agua —, así como la superficie de respuesta estimada y sus

correspondientes curvas de nivel. Estas representaciones gráficas permiten visualizar tanto el comportamiento individual de cada factor como las interacciones entre ellos, facilitando así una interpretación integral del fenómeno térmico bajo distintas condiciones experimentales.

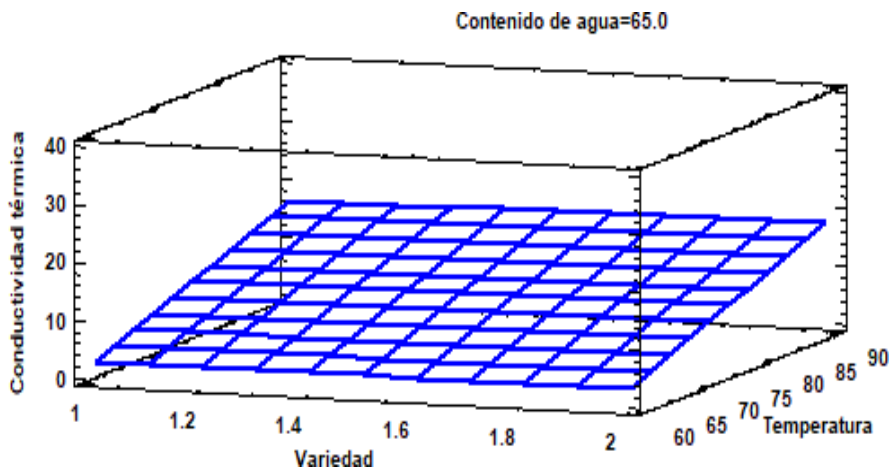
En particular, la Figura 33 muestra que las variedades Bourbon y Catimor exhiben valores de conductividad térmica estadísticamente similares, lo cual refuerza los hallazgos previos derivados del análisis de varianza. No obstante, se destaca claramente una tendencia ascendente en la propiedad analizada conforme aumenta la temperatura, lo que sugiere una relación directa entre energía térmica aplicada y eficiencia en la transferencia de calor dentro de la matriz del café tostado y molido.

De forma paralela, se observa también un efecto positivo del contenido de agua sobre la conductividad térmica. Este incremento puede atribuirse a la disminución relativa de la fracción sólida —menos conductiva— y al predominio creciente del agua —cuya conductividad intrínseca es considerablemente mayor—. Esta transformación en la composición interna del sistema modifica las características del medio conductor, influyendo directamente en la dinámica térmica del material procesado.



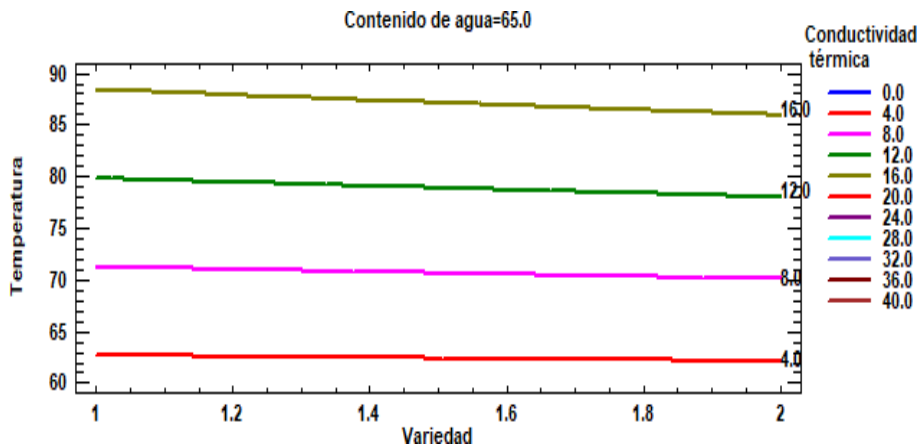
**Figura 33.** Gráfica de los efectos principales de conductividad térmica.

La Figura 34 muestra con mayor claridad que la conductividad térmica se mantiene estable en función de la variedad de café, mientras que aumenta con la temperatura y se incrementa ligeramente con el porcentaje de agua.



**Figura 34.** Superficie de respuesta estimada de conductividad térmica.

En la Figura 35 se representan los contornos de la superficie de respuesta de la difusividad térmica. Se observa que, aunque la variedad no muestra un impacto significativo, la conductividad térmica aumenta con la temperatura y el porcentaje de agua.



**Figura 35.** Contornos de la superficie de respuesta estimada de conductividad térmica.

**Tabla 24.** Coeficiente de regresión de conductividad térmica.

| <b>Coefficiente</b> | <b>Estimado</b> |
|---------------------|-----------------|
| Constante           | 41,0172         |
| A: Variedad         | -2,26061        |
| B: Temperatura      | -0,810541       |
| C: % Agua           | -0,988671       |
| AB                  | 0,0367672       |
| AC                  | 0,00376325      |
| BC                  | 0,019084        |

Para desarrollar un modelo matemático que permita predecir la difusividad térmica en distintas variedades de café en función de temperaturas entre 60°C y 90°C y proporciones de agua entre 50% y 80%, se utilizó un modelo de regresión lineal cuyos coeficientes se detallan en la Tabla 24.

La Tabla 24 presenta la ecuación de regresión ajustada a los datos experimentales.

$$\text{Conductividad térmica} = 41,0172 - 2,26061 * \text{Variedad} - 0,810541 * \text{Temperatura} + 0,00376325 * \text{Variedad} * \text{Contenido de agua} + 0,019084 * \text{Temperatura} * \text{Contenido de agua}$$

La ecuación final obtenida es:

$$k = 41,0172 - 2,26061 * A - 0,810541 * B - 0,988671 * C + 0,0367672 * A * B + 0,00376325 * A * C + 0,019084 * B * C$$

#### **4.3. Ecuaciones que permitirán encontrar las propiedades termofísicas de las variedades de café en función a la temperatura y porcentaje de agua**

Tras llevar a cabo la evaluación de las propiedades termofísicas de las variedades de café Bourbon y Catimor a temperaturas de 60°C, 70°C, 80°C y 90°C, y con proporciones de agua del 50%, 60%, 70% y 80%, fue posible establecer ecuaciones que relacionan dichas propiedades con las variables analizadas.

##### **4.3.1. Ecuaciones de difusividad térmica**

A continuación, se presenta una ecuación general de la difusividad térmica que la relaciona con la variedad de café, la temperatura y el porcentaje de agua.

$$\alpha = 8,35677 \times 10^{-7} + 1,11343 \times 10^{-8} * A + 2,00692 \times 10^{-8} * B + 3,03767 \times 10^{-9} * C$$

En donde:

$\alpha$  = difusividad térmica (m<sup>2</sup>/s)

A = Variedad

B= Temperatura

C= Porcentaje de agua

Las Tablas 25 y 26 muestran las ecuaciones de la difusividad térmica en función de la temperatura, con cuatro ecuaciones correspondientes a cada porcentaje de agua, donde cada tabla representa una variedad específica.

**Tabla 25.** Ecuaciones que gobiernan la difusividad térmica de la variedad Bourbon en función a la temperatura.

| Composición         | Ecuación  | R <sup>2</sup> |
|---------------------|---|----------------|
| 50% agua y 50% café | $\alpha = 2,73 * 10^{-10}T^2 - 2,49 * 10^{-8}T + 8,08 * 10^{-8}$<br><i>T = temperatura entre 60 y 90°C</i>    | 0,9963         |
| 60% agua y 40% café | $\alpha = 2,97 * 10^{-10}T^2 - 3,01 * 10^{-8}T + 1,02 * 10^{-6}$<br><i>T = temperatura entre 60 y 90°C</i>    | 0,9954         |
| 70% agua y 30% café | $\alpha = 4,300 * 10^{-10}T^2 - 4,998 * 10^{-8}T + 1,724 * 10^{-6}$<br><i>T = temperatura entre 60 y 90°C</i> | 9,9996         |
| 80% agua y 20% café | $\alpha = 2,03 * 10^{-10}T^2 - 1,73 * 10^{-8}T + 5,35 * 10^{-7}$<br><i>T = temperatura entre 60 y 90°C</i>    | 0,9967         |

**Tabla 26.** Ecuaciones que gobiernan la difusividad térmica de la Variedad Catimor en función a la temperatura.

| Composición         | Ecuación  | R <sup>2</sup> |
|---------------------|---|----------------|
| 50% agua y 50% café | $\alpha = 2,73 * 10^{-10}T^2 - 2,49 * 10^{-8}T + 8,08 * 10^{-8}$<br><i>T = temperatura entre 60 y 90°C</i>    | 0,9963         |
| 60% agua y 40% café | $\alpha = 2,97 * 10^{-10}T^2 - 3,01 * 10^{-8}T + 1,02 * 10^{-6}$<br><i>T = temperatura entre 60 y 90°C</i>    | 0,9954         |
| 70% agua y 30% café | $\alpha = 4,300 * 10^{-10}T^2 - 4,998 * 10^{-8}T + 1,724 * 10^{-6}$<br><i>T = temperatura entre 60 y 90°C</i> | 9,9996         |
| 80% agua y 20% café | $\alpha = 2,03 * 10^{-10}T^2 - 1,73 * 10^{-8}T + 5,35 * 10^{-7}$  | 0,9967         |

#### 4.3.2. Ecuación de calor específico

De manera experimental, se obtuvo una ecuación que establece la relación entre el calor específico y las variedades de café, las temperaturas analizadas y los porcentajes de agua empleados en este estudio. La ecuación es la siguiente:

$$C_e = -13,9772 + 0,574405*A - 0,430678*B + 0,113538*C + 0,009357*A*B - 0,022857*A*C + 0,0117943*B*C$$

En donde:

C<sub>e</sub> = Calor específico (kJ/kg°C)

A = Variedad

B= Temperatura

C= Porcentaje de agua

#### 4.3.3. Ecuación de densidad

Se determinó experimentalmente una ecuación que vincula la densidad con las variedades de café, las temperaturas evaluadas y los porcentajes de agua utilizados en la investigación. La ecuación es la siguiente:

$$\rho = 1,07089 + 0,024*A + 0,0000967*B + 0,0002685*C + 0,0004*A*C - 0,00000348*B*C$$

En donde:

$\rho$  = Densidad (kg/m<sup>3</sup>)

A = Variedad

B= Temperatura

C= Porcentaje de agua

#### 4.3.4. Ecuaciones de conductividad térmica

Se presenta una ecuación general de la conductividad térmica, la cual está en función de la variedad de café, la temperatura y el porcentaje de agua considerado en este estudio. La ecuación es la siguiente:

$$k = 41.0172 - 2.26061*A - 0.810541*B - 0.988671*C + 0.0367672*A*B + 0.00376325*A*C + 0.019084*B*C$$

En donde:

k = conductividad térmica (W/K.m)

A = Variedad

B= Temperatura

C= Porcentaje de agua

Las Tablas 27 y 28 contienen las ecuaciones de la conductividad térmica en función de la temperatura, con cuatro ecuaciones correspondientes a cada porcentaje de agua, y cada tabla representa una variedad de café en particular.

**Tabla 27.** Ecuación que gobierna la conductividad térmica (k) en función a la temperatura (T) en diferentes proporciones de agua y café de la variedad Bourbon (T se considera desde 60°C a 90°C).

| Proporción agua - café | Ecuación de la conductividad térmica (k) en función a la temperatura (T) | Coefficiente   |
|------------------------|--|----------------|
| 50% agua y 50% café    | $k = 0,004T^2 - 0,3402T + 7,1182$  | $R^2 = 0,9958$ |
| 60% agua y 40% café    | $k = 0,0067T^2 - 0,6954T + 19,625$                                       | $R^2 = 0,9999$ |
| 70% agua y 30% café    | $k = 0,0184T^2 - 2,2595T + 74,287$                                       | $R^2 = 0,9928$ |
| 80% agua y 20% café    | $k = 0,0255T^2 - 3,0192T + 97,891$                                       | $R^2 = 0,9964$ |

**Tabla 28.** Ecuación que gobierna la conductividad térmica (k) en función a la T° en diferentes proporciones de agua y café de la variedad Catimor (T° desde 60°C a 90°C).

| Proporción agua - café | Ecuación de la conductividad térmica (k) en función a la temperatura (T) | Coefficiente   |
|------------------------|--|----------------|
| 50% agua y 50% café    | $k = 0,0044T^2 - 0,3957T + 9,1783$                                       | $R^2 = 0,9999$ |
| 60% agua y 40% café    | $k = 0,0078T^2 - 0,8275T + 245,222$                                      | $R^2 = 0,9999$ |
| 70% agua y 30% café    | $k = 0,021T^2 - 2,6176T + 87,101$  | $R^2 = 0,9940$ |
| 80% agua y 20% café    | $k = 0,0229T^2 - 2,5682T + 79,222$                                       | $R^2 = 0,9996$ |

## V. CONCLUSIONES

Tras la obtención, procesamiento, análisis e interpretación sistemática de los resultados obtenidos en esta investigación, se han podido establecer conclusiones relevantes en torno a las propiedades termofísicas y fisicoquímicas de las variedades de café Bourbon y Catimor bajo diferentes condiciones térmicas y de humedad.

- En primer lugar, se logró caracterizar integralmente las propiedades fisicoquímicas de ambos materiales en estado verde y tostado, lo cual proporciona una base empírica sólida para comprender cómo las características intrínsecas varían entre variedades y estados de procesamiento. Estas diferencias son clave no solo desde una perspectiva descriptiva, sino también funcional, dado su impacto potencial sobre el comportamiento físico durante los procesos térmicos posteriores.
- Las características fisicoquímicas de los granos de café Bourbon en estado verde son: tamaño (diámetro)  $6,10 \pm 0,100$  mm; humedad  $10,23 \pm 0,061\%$ ; cenizas  $3,48 \pm 0,036\%$ ; pH  $7,16 \pm 0,017$ ; acidez (como ácido málico)  $1,14 \pm 0,010$ ; proteína  $12,58 \pm 0,062\%$ ; lípidos  $7,78 \pm 0,044\%$ ; sólidos totales  $89,74 \pm 0,026\%$ ; azúcares reductores  $0,10 \pm 0,074\%$ ; polisacáridos  $51,00 \pm 1,471\%$ ; sacarosa  $7,56 \pm 0,044\%$ ; cafeína  $0,88 \pm 0,026\%$ ; densidad aparente  $733,20 \pm 5,577$  kg/m<sup>3</sup>.

Para el café Catimor en estado verde, las características fisicoquímicas son: tamaño (diámetro)  $6,90 \pm 0,111$  mm; humedad  $10,35 \pm 0,053\%$ ; cenizas  $3,78 \pm 0,044\%$ ; pH  $6,92 \pm 0,031$ ; acidez (como ácido málico)  $1,36 \pm 0,017\%$ ; proteína  $10,68 \pm 0,036\%$ ; lípidos  $7,59 \pm 0,020\%$ ; sólidos totales  $89,60 \pm 0,020\%$ ; azúcares reductores  $0,18 \pm 0,017\%$ ; polisacáridos  $49,20 \pm 0,020\%$ ; sacarosa  $6,99 \pm 0,095\%$ ; cafeína  $0,99 \pm 0,036\%$ ; densidad aparente  $745,00 \pm 1,732$  kg/m<sup>3</sup>.

Para el café Bourbon tostado, los valores obtenidos son: tamaño (diámetro)  $300 \pm 5,00$   $\mu$ m; humedad  $1,35 \pm 0,053\%$ ; cenizas  $4,71 \pm 0,017\%$ ; pH  $5,07 \pm 0,130$ ; acidez (como ácido málico)  $0,84 \pm 0,026\%$ ; proteína  $11,65 \pm 0,036\%$ ; lípidos  $11,08 \pm 0,156\%$ ; sólidos totales  $98,65 \pm 0,063\%$ ; azúcares reductores  $0,22 \pm 0,026\%$ ; polisacáridos  $22,60 \pm 0,058\%$ ; sacarosa  $0,26 \pm 0,026\%$ ; cafeína  $0,98 \pm 0,036\%$ ; densidad aparente  $336,667 \pm 0,005$  kg/m<sup>3</sup>.

Finalmente, para el café Catimor tostado, se determinaron las siguientes

características: tamaño (diámetro)  $300\pm 4,583 \mu\text{m}$ ; humedad  $1,38\pm 0,020\%$ ; cenizas  $5,15\pm 0,072\%$ ; pH  $5,12\pm 0,017$ ; acidez (como ácido málico)  $0,83\pm 0,20\%$ ; proteína  $11,54\pm 0,017\%$ ; lípidos  $12,53\pm 0,017\%$ ; sólidos totales  $98,62\pm 0,036\%$ ; azúcares reductores  $0,33\pm 0,026\%$ ; polisacáridos  $23,60\pm 0,361\%$ ; sacarosa  $0,19\pm 0,017\%$ ; cafeína  $1,09\pm 0,017\%$ ; densidad aparente  $338,333\pm 0,246 \text{ kg/m}^3$ .

- La relación entre las propiedades termofísicas del café tostado y molido y las variables térmicas y hídricas revela tendencias sistemáticas que permiten inferir dinámicas funcionales específicas. En primer lugar, se constata que dichas propiedades no son independientes de los factores experimentales evaluados, sino que están mediadas por la interacción compleja entre temperatura, porcentaje de agua y, en ciertos casos, por la variedad de café.

En cuanto a la difusividad térmica, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las variedades Bourbon y Catimor, lo cual sugiere que esta propiedad no está determinada por características genéticas o morfológicas intrínsecas a cada tipo de grano. Sin embargo, sí se observó una relación directamente proporcional con respecto a la temperatura: es decir, conforme aumenta la energía térmica aplicada, se incrementa la velocidad de transferencia de calor dentro de la matriz del café. Este fenómeno puede interpretarse como el reflejo de transformaciones microestructurales inducidas por la acción del calor, que modifican la disposición interna del medio conductor. Por otro lado, en relación con el contenido de agua, se estableció una correlación inversa: a mayor proporción de humedad, menor es la difusividad térmica registrada. Esta tendencia se explica por la menor capacidad conductiva del agua libre comparada con la fase sólida del grano, así como por cambios en la densidad efectiva del sistema.

En el caso del calor específico, tampoco se identificó un efecto diferenciador entre variedades, lo cual indica que ambas responden de manera semejante frente al almacenamiento de energía térmica. No obstante, este parámetro mostró una dependencia directamente proporcional tanto de la temperatura como del porcentaje de agua, revelando que un aumento en alguno o ambos factores se traduce en una mayor capacidad del sistema para retener energía calórica. Este comportamiento refuerza la idea de que el contenido hídrico modifica profundamente la respuesta térmica del material, dada la alta capacidad calorífica del agua.

Respecto a la densidad, sí se evidenciaron diferencias significativas entre variedades. La variedad Catimor mostró valores superiores en todos los tratamientos evaluados, lo cual implica que su estructura física es más compacta o densa —al menos bajo las condiciones controladas del estudio—, un rasgo que podría estar relacionado con su composición química o su geometría interna. Con respecto a la temperatura, se observó un ligero incremento en la densidad a medida que esta aumenta, lo cual puede estar asociado a procesos de contracción térmica o redistribución de componentes durante el tostado. Este hallazgo introduce una variable adicional en la interpretación de las propiedades físicas del grano, dado que la densidad no solo responde a la naturaleza varietal, sino también al régimen térmico aplicado.

Finalmente, en lo concerniente a la conductividad térmica, no se detectaron diferencias entre las variedades analizadas. En cambio, se verificó una relación claramente directa con la temperatura y el porcentaje de agua: es decir, a mayores niveles de estas dos variables, la conductividad térmica del sistema se incrementa. Este patrón refleja la influencia del agua sobre el proceso de conducción del calor, ya que su presencia sustituye progresivamente a otros componentes con menor conductividad intrínseca, alterando así la eficiencia del flujo térmico a través del medio.

- Así mismo, se formularon ecuaciones predictivas específicas que permiten estimar las propiedades termofísicas del café en función de tres variables clave: la variedad, la temperatura y la proporción de agua. Estos modelos matemáticos constituyen una herramienta metodológica fundamental para la simulación y optimización de procesos térmicos en el ámbito de la industria cafetalera. Las ecuaciones ajustadas se detallan en los apartados siguientes:
  - Difusividad térmica: Apartado 4.3.1
  - Calor específico: Apartado 4.3.2
  - Densidad aparente: Apartado 4.3.3
  - Conductividad térmica: Apartado 4.3.4

## VI. PROPUESTAS A FUTURO

- En primer lugar, se recomienda que los resultados obtenidos en esta investigación sean sistematizados y puestos a disposición de fabricantes de equipos térmicos destinados al procesamiento del café, así como también de pequeños y medianos productores dedicados a la agroindustria cafetalera en los valles de la región del Alto Huallaga.
- En segundo lugar, es necesario profundizar en estudios similares que incluyan no solo las variedades aquí analizadas, sino también aquellas otras —tanto resistentes como no resistentes a enfermedades comunes— que son utilizadas comúnmente en distintas zonas productoras. La diversidad varietal constituye una variable fundamental en la conformación de perfiles termofísicos, y dado que el cultivo del café representa una alternativa económica estratégica tanto para los agricultores regionales como para el desarrollo rural del país, este tipo de análisis debe integrarse progresivamente en las agendas de investigación local y nacional.
- Asimismo, se sugiere llevar a cabo pruebas experimentales de tostado con otras variedades de café, extendiendo el estudio incluso al caso de granos originarios de zonas andinas, bajo condiciones controladas de temperatura y tiempo de procesamiento. Esta ampliación permitiría contrastar los resultados obtenidos en este trabajo con matrices materiales de diferente origen botánico y edáfico, lo cual podría revelar patrones térmicos más generales o bien identificar efectos específicos asociados a cada tipo de grano.
- Es imprescindible la conformación de un equipo especializado de catadores capacitados, dotado de habilidades sensoriales precisas y diferenciadas, cuyo rol sería realizar evaluaciones organolépticas rigurosas del café tostado. Esta incorporación de una dimensión cualitativa en la caracterización del producto complementaría los análisis físicos y químicos, ofreciendo una visión integral sobre la relación entre la estructura térmica del grano y su expresión sensorial en la bebida final.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARADO, J. 2006. Principios de Ingeniería aplicados a alimentos. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos, Ecuador.
- ALVIS, A.; CAICEDO, I.; PEÑA, P. 2010. Determinación del coeficiente de transferencia de calor a través de una aplicación de computadoras. Información Tecnológica, Colombia. 21(5): 13 – 20.
- ALVIS, A.; CAICEDO, I.; PEÑA, P. 2012. Determinación de propiedades termofísicas de alimentos en función de la concentración y la temperatura empleando un programa computacional. Información Tecnológica, Colombia. 23(1): 111 – 116.
- A.O.A.C. 1997. Official Methods of analysis of AOAC (Association of Official Analytical Chemists) International; Agricultural Chemicals, Foods, Contaminants and Drugs. V1 y V2 Arlington: A.O.A.C. Inc. 2658 p.
- BAIRI, A.; LARAQI, N.; GARCIA DE MARÍA, J. 2007. Determination of thermal diffusivity of foods using 1D fourier cylindrical solution. Journal of Food Engineering, France. 78(2): 669 – 675.
- BUENAVENTURA, C.; CASTAÑO, J. 2002. Influencia de la altitud en la calidad de la bebida de muestras de café procedente del Ecotopo 206B en Colombia. Cenicafé, Colombia. 53(2): 119 – 131.
- CHOI, Y.; OKOS, M. R. 1985. Thermal properties in liquid foods-Review. In: Physical and Chemical properties of food. Ed. M.R. Okos, American Society of Agricultural Engineering, 93-101 pp.
- CÓRDOVA, N.; GUERRERO, J. 2016. Caracterización de los procesos tradicionales de fermentación de café en el departamento de Nariño. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, Colombia. 14(2): 75 – 83.
- DICKERSON, W. 1965. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. Food Technology. 19(5): 198 – 204.
- DOMENEGHINI, G.; RIBEIRO, J.; PEZ, D.; TESSARO, I.; FERREIRA, L. 2011. Physical properties of acerola and blueberry pulps. Journal of Food Engineering,

- Brazil. 106(4): 283 – 289.
- DUICELA, L.; GUAMÁN, J.; FARFÁN, D. 2015. Poscosecha y calidad del café robusta. Quito, Ecuador, Humus. 123 p.
- DUICELA, L.; CORRAL, R.; FARFÁN, D.; VERDUGA, C.; PALMA, R.; MACÍAS, A.; ALCÍVAR, R.; REYES, J.; CUEVA, J.; ROMERO, F.; CHOEZ, F.; GUAMÁN, J.; MOROCHO, F.; GARCÍA, J. 2010. Influencia de métodos de beneficio sobre la calidad organoléptica del café arábigo. Informe técnico. Portoviejo, Ecuador, COFENAC-S.I.C.A. 27 p.
- ERDOGDU, F.; LINKE, M.; PRAEGER, U.; GEYER, M.; SCHLÜTER, O. 2014. Experimental determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of whole green (unripe) and yellow (ripe) Cavendish bananas under cooling conditions. Journal of Food Engineering, Germany. 128: 46 – 52.
- FARAH, A. 2012. Coffee Constituents. Emerging Health Effects and Disease Prevention. 33-35 p.
- FELLOWS, P. 1988. Processing Technology: Principles and Practice. Cornwall, England, Ellis Horwood Ltd. 591 p.
- FERNANDO, M.; GUEVARA, M. 2012. Determinación de las propiedades térmicas del jugo de fique (*Furcraea* spp) de las variedades uña de águila y negra común, provenientes del municipio de el Tambo-Nariño. Tesis para Ing. Agroindustrial. San Juan de Pasto, Colombia. Universidad de Nariño. 182 p.
- GEANKOPLIS, C. 2007. Procesos de transporte y principios de procesos de separación. 4 Ed. D.F, México, Editorial Patria. 1052 p.
- GLAVINA, M.; DI SCALA, K.; ANSORENA, R.; DEL VALLE, C. 2006. Estimation of thermal diffusivity of foods using transfer functions. LWT — Food Science and Technology, Argentina. 39(5): 455 - 459.
- GONZÁLEZ, H.; VARGAS, C. 1987. Determinación grado de tueste y cantidad de agua de enfriamiento. Tesis para Ing. Santa fe de Bogota, Colombia. Universidad de Colombia. 165 p.
- GONZALEZ, C.; RUGELES, B. 1988. Contribución al estudio fisicoquímico de granos defectuosos en café verde y su incidencia en la calidad de la bebida. Tesis para Quím. Farmacéutica. Santa fe de Bogota, Colombia. Universidad de Colombia.
- GUPTA, T. 1996. Thermal diffusivity measurements of wheat flour and wheat flour

- dough. *Journal of Food Process Engineering*. 19(3): 343 – 352.
- HUAMÁN, N.; YUPANQUI, G.; ALLCCA, E.; ALLCCA, G. 2016. Efecto del contenido de humedad y temperatura sobre la difusividad térmica engranos andino. *Rev. Soc. Quím., Perú*. 82(3): 259 – 271.
- IBARZ, A.; BARBOSA, G. 2005. *Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos*. Madrid, España, Mundi Prensa. 2535 p.
- INIAP. 2004. Departamento de nutrición y calidad laboratorio de poscosecha del DECAB-EPN. Quito, Ecuador.
- INFOCAFES. 2018. El portal del café del Perú. [En línea]: (<http://www.infocafes.com/descargas/biblioteca/18.pdf>, documento).
- INFOCAFES. 2015. El portal del café del Perú. [En línea]: (<http://www.infocafes.com/descargas/biblioteca/24.pdf>, documento).
- INSTITUTO HONDUREÑO DEL CAFÉ. 2004. Requisitos de Calidad del Café para su comercialización Nacional e Internacional. 17 p.
- KOSTAROPOULOS, A.; SARAVACOS, G. 1997. Thermal diffusivity of granular and porous foods at low moisture content. *Journal of Food Engineering, Greece*. 33(1-2): 101 – 109.
- LINGLE, T. 2015. Desarrollo del Café de Especialidades Gourmet, Orgánico y Otros. In: Simposio sobre Caficultura Latinoamericana, San Salvador, 23-27. Memorias. El Salvador.
- MOREIRA, R.; PALAU, J.; SWEAT V.; SUN, X. 1995. Thermal and physical properties of tortilla chips as a function of frying time. *Journal of Food Processing and Preservation*. 19(4): 175 – 189.
- MUÑOZ, V. 2002. Determinación de la difusividad térmica en pasta de Murta (*Ugni molinae* Turcz), en función de la temperatura. Tesis para Lic. En Ingeniería de Alimentos. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. 102 p.
- NORMA MEXICANA NMX-F-013. 2000. Café puro tostado, en grano o molido, sin descafeinar o descafeinado. especificaciones y métodos de prueba. PRIETO, Y. 2002. Caracterización física de café semitostado. Tesis para Ing. Químico. Bogotá D.C., Colombia. Fundación Universidad de América. 189 p. 73
- PORSDAL, K. 1982. Thermal diffusivity of foods measured by simple equipment. *Journal of Food Engineering, Denmark*. 1(2): 115 – 122.

- PUERTA, G. 2006. Buenas Prácticas Agrícolas para el Café. CENICAFE, 2 p.
- PUERTA, G. 2009. Los Catadores de Café. CENICAFÉ, 11 p.
- PUERTA, G. 2011. Composición Química de una Taza de Café. [En línea]: (<http://www.cenicafe.org/es/publications/avt04142.pdf>, documento).
- PUERTA, G. 2012. Factores, Procesos y controles en la Fermentación de café. Avances Técnicos CENICAFÉ, 12 p.
- PUERTA, G.; BOLÍVAR, C.; GALLEGO, C. 2017. Composición química de elementos minerales en café verde y tostado, con relación a suelos y altitud. CENICAFÉ, 60 p.
- RODRÍGUEZ, M.; LÓPEZ, J. 2009. Una revisión de las propiedades térmicas de los alimentos. Tesis para Ing. Química y Metalurgia. Sonora - Hermosillo, México. Universidad de Sonora.
- SINGH, P.; HELDMAN, D. 2004. Introducción a la Ingeniería de los Alimentos. Zaragoza. España, Editorial Acribia S.A. 544 p.
- SHIVA, K.; DURGA, P.; BASAVARAJ, M. 2014. Effect of moisture content and temperature on thermal conductivity of *Psidium guajava* L. by line heat source method (transient analysis). International Journal of Heat and Mass Transfer, India. 78: 354 – 359.
- SMITH, A. 1985. Introducción al análisis del café. Inglaterra.
- STUMBO, C. 1973. Thermo bacteriology in food processing. 2 Ed. New York, EE.UU, Academic Press.
- TEIXEIRA, A.; DIXON, J.; ZHRADNIK, J.; ZINSMEISTER, G. 1969. Computer optimization of nutrient retention in the thermal processing of conduction-heated foods. Food Technology. 23: 845 – 850.
- UREÑA P. 1990. Obtención de alimentos modelo a partir de mezclas bentonita: glicerol: agua para estudios de tratamientos térmicos. Tesis Doctoral. Valencia, España. Universidad Politécnica de Valencia. 145 p.
- UREÑA, P. 2000. Análisis sensorial de alimentos. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONCYTEC. Lima Perú.
- URIBE, J.; YUSIANTO, M.; PEÑUELA, A.; OLIVEROS, C.; HUSSON, J.; BRANDO, C.; RODRÍGUEZ, A. 2017. Postharvest Processing Revealing the Green Bean. The Craft and Science of Coffee, Colombia. 1: 51- 79.

VÁSQUEZ, R. 2018. Difusividad térmica de la pulpa de aguaje (*Mauritia flexuosa* L. F.) en función de la temperatura y el contenido de agua. Tesis para Ing. en Industrias Alimentarias. Tingo María, Perú. Universidad Nacional Agraria de la Selva.

WAGNER, M. 2005. [En línea]:  
([http://www.cerveceroscaseros.com.ar/Ph\\_y\\_acidez\\_%20Mauricio\\_Wagner.pdf](http://www.cerveceroscaseros.com.ar/Ph_y_acidez_%20Mauricio_Wagner.pdf), documento).

**VIII. ANEXOS**

**A-I:** Composición fisicoquímica del café verde de las variedades Bourbon y Catimor.

| Componente                 | Bourbon |        |        |        |       | Catimor |        |        |        |       |
|----------------------------|---------|--------|--------|--------|-------|---------|--------|--------|--------|-------|
|                            | 1       | 2      | 3      | X      | DE    | 1       | 2      | 3      | X      | DE    |
| Tamaño (diámetro)          | 6.00    | 6.20   | 6.10   | 6,10   | 0.100 | 6.78    | 6.92   | 7.00   | 6,90   | 0.111 |
| Humedad                    | 10.20   | 10.19  | 10.30  | 10,23  | 0.061 | 10.31   | 10.33  | 10.41  | 10,35  | 0.053 |
| Cenizas                    | 3.45    | 3.47   | 3.52   | 3,48   | 0.036 | 3.75    | 3.76   | 3.83   | 3,78   | 0.044 |
| pH                         | 7.14    | 7.17   | 7.17   | 7,16   | 0.017 | 6.91    | 6.95   | 6.89   | 6,92   | 0.031 |
| Acidez (como ácido málico) | 1.15    | 1.13   | 1.14   | 1,14   | 0.010 | 1.38    | 1.35   | 1.35   | 1,36   | 0.017 |
| Proteína                   | 12.51   | 12.60  | 12.63  | 12,58  | 0.062 | 10.71   | 10.64  | 10.69  | 10,68  | 0.036 |
| Lípidos                    | 7.73    | 7.80   | 7.81   | 7,78   | 0.044 | 7.61    | 7.57   | 7.59   | 7,59   | 0.020 |
| Sólidos Totales            | 89.71   | 89.75  | 89.76  | 89,74  | 0.026 | 89.58   | 89.62  | 89.60  | 89,60  | 0.020 |
| Azúcares reductores        | 0.018   | 0.12   | 0.162  | 0,10   | 0.074 | 0.16    | 0.19   | 0.19   | 0,18   | 0.017 |
| Polisacáridos              | 52.50   | 50.94  | 49.56  | 51,00  | 1.471 | 49.18   | 49.22  | 49.20  | 49,20  | 0.020 |
| Sacarosa                   | 7.51    | 7.58   | 7.59   | 7,56   | 0.044 | 6.93    | 7.10   | 6.94   | 6,99   | 0.095 |
| Cafeína                    | 0.85    | 0.89   | 0.90   | 0,88   | 0.026 | 1.00    | 0.95   | 1.02   | 0,99   | 0.036 |
| Densidad aparente          | 730.50  | 735.10 | 724.00 | 733,20 | 5.577 | 746     | 743.00 | 746.00 | 745,00 | 1.732 |

**A.II:** Composición fisicoquímica del café tostado y molido de las variedades Bourbon y Catimor.

| Componente                 | Bourbon |        |        |         |       | Catimor |        |        |       |       |
|----------------------------|---------|--------|--------|---------|-------|---------|--------|--------|-------|-------|
|                            | 1       | 2      | 3      | X       | DE    | 1       | 2      | 3      | X     | DE    |
| Tamaño (diámetro)          | ---     | ----   | ---    | 300     |       | ---     | ---    | ---    | 300   |       |
| Humedad                    | 1.33    | 1.31   | 1.41   | 1,35    | 0.053 | 1.36    | 1.40   | 1.38   | 1,38  | 0.020 |
| Cenizas                    | 4.69    | 4.72   | 4.72   | 4,71    | 0.017 | 5.13    | 5.09   | 5.23   | 5,15  | 0.072 |
| pH                         | 4.99    | 5      | 5.22   | 5,07    | 0.130 | 5.14    | 5.11   | 5.11   | 5,12  | 0.017 |
| Acidez (como ácido málico) | 0.81    | 0.86   | 0.85   | 0,84    | 0.026 | 0.81    | 0.85   | 0.83   | 0,83  | 0.020 |
| Proteína                   | 11.61   | 11.66  | 11.68  | 11,65   | 0.036 | 11.55   | 11.52  | 11.55  | 11,54 | 0.017 |
| Lípidos                    | 11      | 10.98  | 11.26  | 11,08   | 0.156 | 12.51   | 12.54  | 12.54  | 12,53 | 0.017 |
| Sólidos Totales            | 98.61   | 98.66  | 98.68  | 98,65   | 0.036 | 98.61   | 98.59  | 98.66  | 98,62 | 0.036 |
| Azúcares reductores        | 0.25    | 0.2    | 0.21   | 0,22    | 0.026 | 0.3     | 0.35   | 0.34   | 0,33  | 0.026 |
| Polisacáridos              | 22.10   | 22.7   | 23     | 22,60   | 0.458 | 23.2    | 23.70  | 23.90  | 23,60 | 0.361 |
| Sacarosa                   | 0.23    | 0.27   | 0.28   | 0,26    | 0.026 | 0.17    | 0.20   | 0.20   | 0,19  | 0.017 |
| Cafeína                    | 0.95    | 1.02   | 0.97   | 0,98    | 0.036 | 1.07    | 1.10   | 1.10   | ---   | 0.017 |
| Densidad aparente          | 336.66  | 336.67 | 336.67 | 336,667 | 0.005 | 338.12  | 338.28 | 338.60 | 1.40  | 0.246 |

**A-III:** Difusividad térmica a 60°C con 50% de agua y 50% de café, 60% de agua y 40% de café, 70% de agua y 30% de café y 80% de agua y 20% de café de la variedad Bourbon.

| Tiempo (s)                        | 60°C 50% agua 50% café |            |            | 60°C 60% agua 40% café |            |            | 60°C 70% agua 30% café |            |            | 60°C 80% agua 20% café |            |            |
|-----------------------------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|
|                                   | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    |
| 0                                 | 29,14                  | 29,73      | 29,53      | 29,03                  | 29,85      | 29,83      | 32,01                  | 32,35      | 32,15      | 32,01                  | 32,12      | 32,52      |
| 30                                | 31,25                  | 32,20      | 31,34      | 31,37                  | 31,54      | 31,51      | 32,36                  | 32,52      | 32,86      | 32,36                  | 32,91      | 33,26      |
| 60                                | 33,70                  | 34,10      | 33,79      | 34,15                  | 35,01      | 34,94      | 34,87                  | 35,70      | 34,88      | 34,87                  | 35,50      | 34,97      |
| 90                                | 36,33                  | 36,62      | 36,47      | 37,10                  | 38,04      | 37,29      | 37,30                  | 38,30      | 37,54      | 37,30                  | 37,84      | 37,53      |
| 120                               | 38,98                  | 39,26      | 39,64      | 40,03                  | 40,51      | 41,00      | 39,59                  | 40,43      | 40,54      | 39,59                  | 40,01      | 39,88      |
| 150                               | 41,51                  | 42,43      | 41,98      | 42,78                  | 42,99      | 43,12      | 42,60                  | 42,79      | 43,45      | 41,70                  | 42,57      | 42,42      |
| 180                               | 43,83                  | 43,84      | 44,71      | 45,26                  | 46,25      | 45,94      | 43,50                  | 43,74      | 44,36      | 43,62                  | 43,88      | 43,85      |
| 210                               | 45,94                  | 46,29      | 46,92      | 47,44                  | 48,12      | 47,68      | 45,02                  | 45,92      | 45,12      | 45,36                  | 45,52      | 45,65      |
| 240                               | 47,81                  | 47,87      | 48,75      | 49,33                  | 50,01      | 49,68      | 47,25                  | 47,31      | 47,67      | 46,92                  | 47,25      | 47,51      |
| 270                               | 49,46                  | 49,90      | 50,18      | 50,95                  | 51,14      | 51,06      | 48,02                  | 48,50      | 48,36      | 48,32                  | 49,28      | 48,77      |
| 300                               | 50,90                  | 51,48      | 51,56      | 52,34                  | 53,20      | 52,97      | 52,03                  | 52,10      | 52,24      | 49,59                  | 50,42      | 50,56      |
| 330                               |                        |            |            | 53,52                  | 54,11      | 54,44      | 53,06                  | 53,97      | 54,05      | 50,72                  | 50,98      | 51,46      |
| 360                               |                        |            |            | 54,53                  | 54,68      | 55,51      | 56,80                  | 56,92      | 56,81      | 51,74                  | 52,35      | 52,74      |
| 390                               |                        |            |            | 55,37                  | 56,23      | 55,42      | 57,30                  | 57,82      | 57,44      | 52,66                  | 53,10      | 53,21      |
| <b>Pendiente</b>                  | 0,08                   | 0,07       | 0,08       | 0,07                   | 0,07       | 0,07       | 0,07                   | 0,07       | 0,07       | 0,06                   | 0,06       | 0,06       |
| <b>R<sup>2</sup></b>              | 0,99                   | 0,99       | 0,99       | 0,97                   | 0,97       | 0,97       | 0,99                   | 0,99       | 0,99       | 0,98                   | 0,98       | 0,98       |
| <b>Difusividad térmica</b>        | 3,0633E-07             | 3,0230E-07 | 3,1661E-07 | 2,8502E-07             | 2,8412E-07 | 2,8473E-07 | 2,7530E-07             | 2,7368E-07 | 2,7474E-07 | 2,3031E-07             | 2,3169E-07 | 2,3420E-07 |
| <b>Promedio (m<sup>2</sup>/s)</b> |                        | 3,0841E-07 |            |                        | 2,8462E-07 |            |                        | 2,7457E-07 |            |                        | 2,3206E-07 |            |

**A-IV:** Difusividad térmica a 70°C con 50% de agua y 50% de café, 60% de agua y 40% de café, 70% de agua y 30% de café y 80% de agua y 20% de café de la variedad Bourbon.

| Tiempo (s)                        | 70°C 50% agua 50% café |            |            | 70°C 60% agua 40% café |            |            | 70°C 70% agua 30% café |            |            | 70°C 80% agua 20% café |            |            |
|-----------------------------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|
|                                   | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    |
| 0                                 | 30,93                  | 31,81      | 31,79      | 29,52                  | 30,20      | 30,2       | 33,72                  | 33,64      | 34,05      | 33,14                  | 34,02      | 33,19      |
| 30                                | 33,67                  | 33,82      | 34,28      | 30,65                  | 30,71      | 30,71      | 35,87                  | 36,43      | 35,73      | 35,48                  | 35,71      | 35,55      |
| 60                                | 37,46                  | 37,56      | 38,01      | 32,98                  | 33,39      | 33,39      | 38,88                  | 38,86      | 38,55      | 38,29                  | 39,03      | 38,55      |
| 90                                | 41,58                  | 41,67      | 42,12      | 36,09                  | 36,82      | 36,82      | 42,08                  | 41,25      | 41,42      | 41,23                  | 41,69      | 41,33      |
| 120                               | 45,58                  | 45,9       | 46,1       | 39,54                  | 40,53      | 40,53      | 44,56                  | 44,18      | 45,08      | 44,12                  | 44,44      | 45,02      |
| 150                               | 49,23                  | 50,21      | 50,17      | 42,95                  | 43,03      | 43,03      | 47,18                  | 47,69      | 47,60      | 46,86                  | 47,20      | 47,27      |
| 180                               | 52,46                  | 52,59      | 52,49      | 46,24                  | 46,39      | 46,39      | 50,04                  | 50,41      | 50,95      | 49,41                  | 49,59      | 49,6       |
| 210                               | 55,27                  | 55,78      | 56,25      | 49,24                  | 49,39      | 49,39      | 52,26                  | 52,29      | 52,38      | 51,72                  | 52,45      | 52,23      |
| 240                               | 57,66                  | 58,3       | 57,83      | 51,94                  | 51,95      | 51,95      | 55,11                  | 55,20      | 54,75      | 53,82                  | 54,04      | 54,82      |
| 270                               | 59,7                   | 60,62      | 59,87      | 54,41                  | 55,11      | 55,11      | 56,4                   | 56,23      | 56,45      | 55,72                  | 56,12      | 56,6       |
| 300                               | 61,43                  | 62,25      | 61,86      | 56,53                  | 57,22      | 57,22      | 58,14                  | 58,51      | 58,75      | 57,44                  | 57,94      | 58,39      |
| 330                               | 62,88                  | 63,49      | 62,97      | 58,43                  | 58,65      | 58,65      | 59,43                  | 59,25      | 59,12      | 58,95                  | 59,01      | 59,17      |
| 360                               | 64,11                  | 64,85      | 64,4       | 60,06                  | 60,68      | 60,68      | 63,28                  | 63,08      | 63,19      | 60,32                  | 60,92      | 60,34      |
| 390                               | 65,14                  | 65,61      | 65,63      | 61,51                  | 61,96      | 61,96      | 65,45                  | 65,96      | 65,61      | 61,52                  | 62,32      | 62,24      |
| 420                               |                        |            |            | 62,77                  | 62,89      | 62,89      |                        |            |            |                        |            |            |
| <b>Pendiente</b>                  | 0,091282               | 0,092251   | 0,090084   | 0,085983               | 0,085701   | 0,085701   | 0,080336               | 0,080755   | 0,080477   | 0,074929               | 0,074766   | 0,076082   |
| <b>R<sup>2</sup></b>              | 0,964331               | 0,963237   | 0,963803   | 0,984415               | 0,983906   | 0,983906   | 0,993069               | 0,991940   | 0,989681   | 0,983691               | 0,986056   | 0,978912   |
| <b>Difusividad térmica</b>        | 3,7202E-07             | 3,7597E-07 | 3,6714E-07 | 3,5043E-07             | 3,4928E-07 | 3,4928E-07 | 3,2741E-07             | 3,2912E-07 | 3,2799E-07 | 3,0537E-07             | 3,0471E-07 | 3,1007E-07 |
| <b>Promedio (m<sup>2</sup>/s)</b> |                        | 3,7171E-07 |            |                        | 3,4966E-07 |            |                        | 3,2817E-07 |            |                        | 3,0672E-07 |            |

**A-V:** Difusividad térmica a 80°C con 50% de agua y 50% de café, 60% de agua y 40% de café, 70% de agua y 30% de café y 80% de agua y 20% de café de la Variedad Bourbon.

| Tiempo (s)                        | 80°C 50% agua 50% café |            |            | 80°C 60% agua 40% café |            |            | 80°C 70% agua 30% café |            |            | 80°C 80% agua 20% café |            |            |
|-----------------------------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|
|                                   | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C C)              | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    |
| 0                                 | 29,67                  | 30,08      | 29,91      | 28,48                  | 29,42      | 29,43      | 29,43                  | 29,47      | 29,26      | 28,58                  | 28,77      | 28,81      |
| 30                                | 33,19                  | 33,9       | 33,37      | 31,4                   | 32,27      | 32,3       | 32,30                  | 32,41      | 32,3       | 31,55                  | 31,6       | 32,05      |
| 60                                | 38,38                  | 38,56      | 38,87      | 35,78                  | 35,96      | 36,03      | 36,03                  | 36,28      | 35,97      | 35,37                  | 36         | 35,51      |
| 90                                | 44,15                  | 44,16      | 44,28      | 40,73                  | 41,11      | 40,89      | 40,89                  | 40,29      | 40,31      | 39,53                  | 40,15      | 39,78      |
| 120                               | 49,77                  | 50,2       | 50,02      | 45,64                  | 46,59      | 45,76      | 45,76                  | 44,46      | 44,3       | 43,62                  | 44,45      | 44,1       |
| 150                               | 54,87                  | 55,78      | 55,79      | 50,14                  | 50,29      | 50,45      | 50,45                  | 48,03      | 48,26      | 47,5                   | 48,16      | 48,18      |
| 180                               | 59,3                   | 60,17      | 59,99      | 54,26                  | 55,17      | 54,44      | 54,44                  | 51,69      | 52,07      | 51,09                  | 51,61      | 51,52      |
| 210                               | 63,07                  | 63,52      | 64,04      | 57,99                  | 58,51      | 58,47      | 58,47                  | 54,90      | 55,18      | 54,37                  | 54,44      | 55,21      |
| 240                               | 66,23                  | 66,56      | 66,72      | 61,27                  | 61,54      | 61,89      | 61,89                  | 58,05      | 58,14      | 57,33                  | 58,09      | 57,35      |
| 270                               | 68,86                  | 69,47      | 69,44      | 64,08                  | 65,02      | 64,75      | 64,75                  | 60,57      | 60,74      | 60,01                  | 60,61      | 60,63      |
| 300                               | 71,02                  | 71,9       | 71,65      | 66,54                  | 67,43      | 67,41      | 67,41                  | 62,96      | 63,15      | 62,42                  | 62,71      | 62,72      |
| 330                               |                        |            |            | 68,68                  | 69,35      | 69,54      | 69,54                  | 65,37      | 65,39      | 64,56                  | 65,49      | 64,78      |
| <b>Pendiente</b>                  | 0,145561               | 0,146688   | 0,147279   | 0,128255               | 0,128424   | 0,128830   | 0,128830               | 0,112315   | 0,113528   | 0,113162               | 0,114138   | 0,113294   |
| <b>R<sup>2</sup></b>              | 0,983277               | 0,983191   | 0,981533   | 0,987458               | 0,987933   | 0,990149   | 0,990149               | 0,992659   | 0,991125   | 0,991619               | 0,991186   | 0,989629   |
| <b>Difusividad Térmica</b>        | 5,9324E-07             | 5,9783E-07 | 6,0024E-07 | 5,2271E-07             | 5,2340E-07 | 5,2505E-07 | 5,2505E-07             | 4,5774E-07 | 4,6269E-07 | 4,6119E-07             | 4,6517E-07 | 4,6173E-07 |
| <b>Promedio (m<sup>2</sup>/s)</b> |                        | 5,9710E-07 |            |                        | 5,2372E-07 |            |                        | 4,8182E-07 |            |                        | 4,6270E-07 |            |

**A-VI:** Difusividad térmica a 90°C con 50% de agua y 50% de café, 60% de agua y 40% de café, 70% de agua y 30% de café y 80% de agua y 20% de café de la Variedad Bourbon.

| Tiempo (s)                        | 90°C 50% agua 50% café |            |            | 90°C 60% agua 40% café |            |            | 90°C 70% agua 30% café |            |            | 90°C 80% agua 20% café |            |            |
|-----------------------------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|
|                                   | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    |
| 0                                 | 29,67                  | 30,63      | 29,81      | 28,53                  | 29,36      | 29,15      | 29,44                  | 29,24      | 29,46      | 27,86                  | 28,85      | 28,82      |
| 30                                | 33,93                  | 34,86      | 34,48      | 31,68                  | 31,9       | 32,34      | 32,45                  | 32,64      | 32,3       | 30,69                  | 31,47      | 30,95      |
| 60                                | 40,81                  | 41,01      | 41,14      | 36,79                  | 37,78      | 37,76      | 37,75                  | 37,3       | 37,7       | 34,9                   | 35,53      | 35,75      |
| 90                                | 48,71                  | 49,13      | 48,77      | 43,13                  | 43,24      | 43,37      | 43,72                  | 43,74      | 44,01      | 39,88                  | 40,24      | 40,48      |
| 120                               | 56,39                  | 57         | 56,72      | 49,7                   | 50,2       | 50,07      | 50,57                  | 50,43      | 50,61      | 45,01                  | 45,6       | 45,03      |
| 150                               | 63,21                  | 63,83      | 63,84      | 56,12                  | 56,77      | 56,23      | 57,01                  | 56,99      | 56,96      | 49,94                  | 50,29      | 50,38      |
| 180                               | 68,96                  | 69,79      | 69,16      | 62,01                  | 62,92      | 62,9       | 62,94                  | 62,57      | 62,54      | 54,85                  | 55,2       | 55,39      |
| 210                               | 73,67                  | 74,01      | 74,58      | 67,35                  | 67,56      | 67,54      | 67,91                  | 67,99      | 68,16      | 59,28                  | 59,6       | 59,9       |
| 240                               | 77,46                  | 77,71      | 77,86      | 72,01                  | 72,54      | 72,74      | 72,56                  | 72,54      | 72,82      | 63,14                  | 63,47      | 63,28      |
| 270                               | 80,45                  | 80,78      | 80,50      | 75,9                   | 76,85      | 75,93      | 76,84                  | 76,4       | 76,44      | 67,29                  | 68,01      | 68,04      |
| 300                               | 82,79                  | 82,99      | 83,67      | 79,2                   | 80,14      | 79,53      | 80,15                  | 79,98      | 80,18      | 73,21                  | 74,05      | 73,36      |
| 330                               |                        |            |            | 81,87                  | 81,97      | 82,67      | 82,52                  | 82,44      | 82,87      | 76,28                  | 76,36      | 77,27      |
| <b>Pendiente</b>                  | 0,189127               | 0,187312   | 0,190182   | 0,173826               | 0,173787   | 0,173258   | 0,173538               | 0,173336   | 0,173880   | 0,152220               | 0,151078   | 0,152015   |
| <b>R<sup>2</sup></b>              | 0,976388               | 0,974906   | 0,976750   | 0,988846               | 0,987620   | 0,989682   | 0,988829               | 0,988868   | 0,989564   | 0,998223               | 0,997624   | 0,998068   |
| <b>Difusividad térmica</b>        | 7,7079E-07             | 7,6339E-07 | 7,7509E-07 | 7,0843E-07             | 7,0827E-07 | 7,0611E-07 | 7,0726E-07             | 7,0643E-07 | 7,0865E-07 | 6,2038E-07             | 6,1572E-07 | 6,1954E-07 |
| <b>Promedio (m<sup>2</sup>/s)</b> |                        | 7,6976E-07 |            |                        | 7,0761E-07 |            |                        | 7,0745E-07 |            |                        | 6,1855E-07 |            |

**A-VII:** Difusividad térmica a 60°C con 50% de agua y 50% de café, 60% de agua y 40% de café, 70% de agua y 30% de café y 80% de agua y 20% de café de la de la variedad Catimor.

| Tiempo (s)                        | 60°C 50% agua 50% café |            |            | 60°C 60% agua 40% café |            |            | 60°C 70% agua 30% café |            |            | 60°C 80% agua 20% café |            |            |
|-----------------------------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|
|                                   | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    |
| 0                                 | 29,112                 | 29,842     | 29,64      | 29,142                 | 29,85      | 29,96      | 32,122                 | 32,462     | 32,26      | 32,122                 | 32,232     | 32,63      |
| 30                                | 31,362                 | 32,312     | 31,45      | 31,482                 | 31,54      | 31,65      | 32,472                 | 32,632     | 32,97      | 32,472                 | 33,022     | 33,37      |
| 60                                | 33,812                 | 34,212     | 33,90      | 34,262                 | 35,01      | 35,12      | 34,982                 | 35,812     | 34,99      | 34,982                 | 35,612     | 35,08      |
| 90                                | 36,442                 | 36,732     | 36,58      | 37,212                 | 38,04      | 38,15      | 37,412                 | 38,412     | 37,65      | 37,412                 | 37,952     | 37,64      |
| 120                               | 39,092                 | 39,372     | 39,75      | 40,142                 | 40,51      | 40,62      | 39,702                 | 40,542     | 40,65      | 39,702                 | 40,122     | 39,99      |
| 150                               | 41,622                 | 42,542     | 42,09      | 42,892                 | 42,99      | 43,10      | 42,712                 | 42,902     | 43,56      | 41,812                 | 42,682     | 42,53      |
| 180                               | 43,942                 | 43,952     | 44,82      | 45,372                 | 46,25      | 46,36      | 43,612                 | 43,852     | 44,47      | 43,732                 | 43,992     | 43,96      |
| 210                               | 46,052                 | 46,402     | 47,03      | 47,552                 | 48,12      | 48,23      | 45,132                 | 46,032     | 45,23      | 45,472                 | 45,632     | 45,76      |
| 240                               | 47,922                 | 47,982     | 48,86      | 49,442                 | 50,01      | 50,12      | 47,362                 | 47,422     | 47,78      | 47,032                 | 47,362     | 47,62      |
| 270                               | 49,572                 | 50,012     | 50,29      | 51,062                 | 51,14      | 51,25      | 48,132                 | 48,612     | 48,47      | 48,432                 | 49,392     | 48,88      |
| 300                               | 51,012                 | 51,592     | 51,67      | 52,452                 | 53,2       | 53,31      | 52,142                 | 52,212     | 52,35      | 49,702                 | 50,532     | 50,67      |
| 330                               |                        |            |            | 53,632                 | 54,11      | 54,222     | 53,172                 | 54,082     | 54,162     | 50,832                 | 51,092     | 51,572     |
| 360                               |                        |            |            | 54,642                 | 54,68      | 54,792     | 56,912                 | 57,032     | 56,922     | 51,852                 | 52,462     | 52,852     |
| 390                               |                        |            |            | 55,482                 | 56,23      | 56,342     | 57,412                 | 57,932     | 57,552     | 52,772                 | 53,212     | 53,322     |
| <b>Pendiente</b>                  | 0,075376               | 0,074176   | 0,077685   | 0,069936               | 0,069713   | 0,069713   | 0,067549               | 0,067152   | 0,067412   | 0,056510               | 0,056849   | 0,057464   |
| <b>R<sup>2</sup></b>              | 0,993068               | 0,994102   | 0,990008   | 0,970119               | 0,968826   | 0,968826   | 0,991906               | 0,992739   | 0,990058   | 0,980819               | 0,980100   | 0,983407   |
| <b>Difusividad térmica</b>        | 3,0720E-07             | 3,0230E-07 | 3,1661E-07 | 2,8502E-07             | 2,8412E-07 | 2,8412E-07 | 2,7483E-07             | 2,7458E-07 | 2,7442E-07 | 2,3031E-07             | 2,3269E-07 | 2,3420E-07 |
| <b>Promedio (m<sup>2</sup>/s)</b> |                        | 3,0870E-07 |            |                        | 2,8442E-07 |            |                        | 2,7460E-07 |            |                        | 2,3211E-07 |            |

**A-VIII:** Difusividad térmica a 70°C con 50% de agua y 50% de café, 60% de agua y 40% de café, 70% de agua y 30% de café y 80% de agua y 20% de café de la Variedad Catimor.

| Tiempo(s)                         | 70°C 50% agua 50% café |            |            | 70°C 60% agua 40% café |            |            | 70°C 70% agua 30% café |              |            | 70°C 80% agua 20% café |            |            |
|-----------------------------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|------------------------|--------------|------------|------------------------|------------|------------|
|                                   | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)      | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    |
| 0                                 | 31,043                 | 62,833     | 31,903     | 29,633                 | 30,31      | 30,313     | 33,833                 | 33,75        | 34,16      | 33,253                 | 34,13      | 33,303     |
| 30                                | 33,783                 | 68,063     | 34,393     | 30,763                 | 30,82      | 30,823     | 35,983                 | 36,54        | 35,84      | 35,593                 | 35,82      | 35,663     |
| 60                                | 37,573                 | 75,583     | 38,123     | 33,093                 | 33,50      | 33,503     | 38,993                 | 38,97        | 38,66      | 38,403                 | 39,14      | 38,663     |
| 90                                | 41,693                 | 83,813     | 42,233     | 36,203                 | 36,93      | 36,933     | 42,193                 | 41,36        | 41,53      | 41,343                 | 41,80      | 41,443     |
| 120                               | 45,693                 | 91,793     | 46,213     | 39,653                 | 40,64      | 40,643     | 44,673                 | 44,29        | 45,19      | 44,233                 | 44,55      | 45,133     |
| 150                               | 49,343                 | 99,513     | 50,283     | 43,063                 | 43,14      | 43,143     | 47,293                 | 47,80        | 47,71      | 46,973                 | 47,31      | 47,383     |
| 180                               | 52,573                 | 105,063    | 52,603     | 46,353                 | 46,50      | 46,503     | 50,153                 | 50,52        | 51,06      | 49,523                 | 49,70      | 49,713     |
| 210                               | 55,383                 | 111,633    | 56,363     | 49,353                 | 49,50      | 49,503     | 52,373                 | 52,40        | 52,49      | 51,833                 | 52,56      | 52,343     |
| 240                               | 57,773                 | 115,603    | 57,943     | 52,053                 | 52,06      | 52,063     | 55,223                 | 55,31        | 54,86      | 53,933                 | 54,15      | 54,933     |
| 270                               | 59,813                 | 119,683    | 59,983     | 54,523                 | 55,22      | 55,223     | 56,513                 | 56,34        | 56,56      | 55,833                 | 56,23      | 56,713     |
| 300                               | 61,543                 | 123,403    | 61,973     | 56,643                 | 57,33      | 57,333     | 58,253                 | 58,62        | 58,86      | 57,553                 | 58,05      | 58,503     |
| 330                               | 62,993                 | 125,963    | 63,083     | 58,543                 | 58,76      | 58,763     | 59,543                 | 59,36        | 59,23      | 59,063                 | 59,12      | 59,283     |
| 360                               | 64,223                 | 128,623    | 64,513     | 60,173                 | 60,79      | 60,793     | 63,393                 | 63,19        | 63,30      | 60,433                 | 61,03      | 60,453     |
| 390                               | 65,253                 | 130,883    | 65,743     | 61,623                 | 62,07      | 62,073     | 65,563                 | 66,07        | 65,72      | 61,633                 | 62,43      | 62,353     |
| 420                               |                        |            |            | 62,77                  | 62,89      | 62,89      |                        |              |            |                        |            |            |
| <b>Pendiente</b>                  | 0,091282               | 0,181366   | 0,090084   | 0,085889               | 0,085607   | 0,085607   | 0,080336               | 0,080755     | 0,080477   | 0,074929               | 0,074766   | 0,076082   |
| <b>R<sup>2</sup></b>              | 0,964331               | 0,964197   | 0,963803   | 0,984045               | 0,983506   | 0,983506   | 0,993069               | 0,991940     | 0,989681   | 0,983691               | 0,986056   | 0,978912   |
| <b>Difusividad térmica</b>        | 3,7202E-07             | 4,9916E-07 | 3,6714E-07 | 3,5004E-07             | 3,4889E-07 | 3,4889E-07 | 3,2741E-07             | 3,2912E-07   | 3,2799E-07 | 3,0537E-07             | 3,0471E-07 | 3,1007E-07 |
| <b>Promedio (m<sup>2</sup>/s)</b> |                        | 3,9277E-07 |            |                        | 3,4928E-07 |            |                        | 3,283114E-07 |            |                        | 3,1283E-07 |            |

**A-IX:** Difusividad térmica a 80°C con 50% de agua y 50% de café, 60% de agua y 40% de café, 70% de agua y 30% de café y 80% de agua y 20% de café de la Variedad Catimor.

| Tiempo (s)                        | 80°C 50% agua 50% café |            |            | 80°C 60% agua 40% café |            |            | 80°C 70% agua 30% café |            |            | 80°C 80% agua 20% café |            |            |
|-----------------------------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|
|                                   | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    |
| 0                                 | 29,784                 | 30,194     | 30,024     | 28,594                 | 29,534     | 29,544     | 29,66                  | 29,58      | 29,374     | 28,694                 | 28,884     | 28,924     |
| 30                                | 33,304                 | 34,014     | 33,484     | 31,514                 | 32,384     | 32,414     | 32,53                  | 32,52      | 32,414     | 31,664                 | 31,714     | 32,164     |
| 60                                | 38,494                 | 38,674     | 38,984     | 35,894                 | 36,074     | 36,144     | 36,26                  | 36,39      | 36,084     | 35,484                 | 36,114     | 35,624     |
| 90                                | 44,264                 | 44,274     | 44,394     | 40,844                 | 41,224     | 41,004     | 41,12                  | 40,40      | 40,424     | 39,644                 | 40,264     | 39,894     |
| 120                               | 49,884                 | 50,314     | 50,134     | 45,754                 | 46,704     | 45,874     | 45,99                  | 44,57      | 44,414     | 43,734                 | 44,564     | 44,214     |
| 150                               | 54,984                 | 55,894     | 55,904     | 50,254                 | 50,404     | 50,564     | 50,68                  | 48,14      | 48,374     | 47,614                 | 48,274     | 48,294     |
| 180                               | 59,414                 | 60,284     | 60,104     | 54,374                 | 55,284     | 54,554     | 54,67                  | 51,80      | 52,184     | 51,204                 | 51,724     | 51,634     |
| 210                               | 63,184                 | 63,634     | 64,154     | 58,104                 | 58,624     | 58,584     | 58,70                  | 55,01      | 55,294     | 54,484                 | 54,554     | 55,324     |
| 240                               | 66,344                 | 66,674     | 66,834     | 61,384                 | 61,654     | 62,004     | 62,12                  | 58,16      | 58,254     | 57,444                 | 58,204     | 57,464     |
| 270                               | 68,974                 | 69,584     | 69,554     | 64,194                 | 65,134     | 64,864     | 64,98                  | 60,68      | 60,854     | 60,124                 | 60,724     | 60,744     |
| 300                               | 71,134                 | 72,014     | 71,764     | 66,654                 | 67,544     | 67,524     | 67,64                  | 63,07      | 63,264     | 62,534                 | 62,824     | 62,834     |
| 330                               | 0,114                  | 0,114      | 0,114      | 68,794                 | 69,464     | 69,654     | 69,77                  | 65,48      | 65,504     | 64,674                 | 65,604     | 64,894     |
| <b>Pendiente</b>                  | 0,145561               | 0,146688   | 0,147279   | 0,128255               | 0,128424   | 0,128830   | 0,128830               | 0,112315   | 0,113528   | 0,113162               | 0,114138   | 0,113294   |
| <b>R<sup>2</sup></b>              | 0,983277               | 0,983191   | 0,981533   | 0,987458               | 0,987933   | 0,990149   | 0,990149               | 0,992659   | 0,991125   | 0,991619               | 0,991186   | 0,989629   |
| <b>Difusividad térmica</b>        | 5,9324E-07             | 5,9783E-07 | 6,0024E-07 | 5,2271E-07             | 5,2340E-07 | 5,2505E-07 | 4,8205E-07             | 4,8474E-07 | 4,8069E-07 | 4,6119E-07             | 4,6517E-07 | 4,6173E-07 |
| <b>Promedio (m<sup>2</sup>/s)</b> |                        | 5,9689E-07 |            |                        | 5,2401E-07 |            |                        | 4,8201E-07 |            |                        | 4,6313E-07 |            |

**A-X:** Difusividad térmica a 90°C con 50% de agua y 50% de café, 60% de agua y 40% de café, 70% de agua y 30% de café y 80% de agua y 20% de café de la Variedad Catimor.

| Tiempo(s)                  | 90°C 50% agua 50% café |            |            | 90°C 60% agua 40% café |            |            | 90°C 70% agua 30% café |            |            | 90°C 80% agua 20% café |            |            |
|----------------------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|
|                            | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    | R1 (°C)                | R2 (°C)    | R3 (°C)    |
| 0                          | 29,785                 | 30,745     | 29,93      | 28,645                 | 29,475     | 29,265     | 29,555                 | 29,355     | 29,575     | 27,975                 | 28,965     | 28,935     |
| 30                         | 34,045                 | 34,975     | 34,60      | 31,795                 | 32,015     | 32,455     | 32,565                 | 32,755     | 32,415     | 30,805                 | 31,585     | 31,065     |
| 60                         | 40,925                 | 41,125     | 41,26      | 36,905                 | 37,895     | 37,875     | 37,865                 | 37,415     | 37,815     | 35,015                 | 35,645     | 35,865     |
| 90                         | 48,825                 | 49,245     | 48,89      | 43,245                 | 43,355     | 43,485     | 43,835                 | 43,855     | 44,125     | 39,995                 | 40,355     | 40,595     |
| 120                        | 56,505                 | 57,115     | 56,84      | 49,815                 | 50,315     | 50,185     | 50,685                 | 50,545     | 50,725     | 45,125                 | 45,715     | 45,145     |
| 150                        | 63,325                 | 63,945     | 63,96      | 56,235                 | 56,885     | 56,345     | 57,125                 | 57,105     | 57,075     | 50,055                 | 50,405     | 50,495     |
| 180                        | 69,075                 | 69,905     | 69,28      | 62,125                 | 63,035     | 63,015     | 63,055                 | 62,685     | 62,655     | 54,965                 | 55,315     | 55,505     |
| 210                        | 73,785                 | 74,125     | 74,70      | 67,465                 | 67,675     | 67,655     | 68,025                 | 68,105     | 68,275     | 59,395                 | 59,715     | 60,015     |
| 240                        | 77,575                 | 77,825     | 77,98      | 72,125                 | 72,655     | 72,855     | 72,675                 | 72,655     | 72,935     | 63,255                 | 63,585     | 63,395     |
| 270                        | 80,565                 | 80,895     | 80,62      | 76,015                 | 76,965     | 76,045     | 76,955                 | 76,515     | 76,555     | 67,405                 | 68,125     | 68,155     |
| 300                        | 82,905                 | 83,105     | 83,79      | 79,315                 | 80,255     | 79,645     | 80,265                 | 80,095     | 80,295     | 73,325                 | 74,165     | 73,475     |
| 330                        |                        |            |            | 81,985                 | 82,085     | 82,785     | 82,635                 | 82,555     | 82,985     | 76,395                 | 76,475     | 77,385     |
| <b>Pendiente</b>           | 0,189127               | 0,187312   | 0,190182   | 0,173826               | 0,173787   | 0,173258   | 0,173538               | 0,173336   | 0,173880   | 0,152220               | 0,151078   | 0,152015   |
| <b>R2</b>                  | 0,976388               | 0,974906   | 0,976750   | 0,988846               | 0,987620   | 0,989682   | 0,988829               | 0,988868   | 0,989564   | 0,998223               | 0,997624   | 0,998068   |
| <b>Difusividad térmica</b> | 7,7079E-07             | 7,6339E-07 | 7,7509E-07 | 7,0843E-07             | 7,0827E-07 | 7,0611E-07 | 7,0926E-07             | 7,1643E-07 | 7,0965E-07 | 6,2038E-07             | 6,1572E-07 | 6,1954E-07 |
| <b>Promedio (m2/s)</b>     |                        | 7,7011E-07 |            |                        | 7,0759E-07 |            |                        | 7,1055E-07 |            |                        | 6,1908E-07 |            |

**A-XI:** Valor de "C" a las temperaturas de 60°C, 70°C, 80°C y 90°C del calorímetro para las variedades Bourbon y Catimor.

| <b>Variedad</b> | <b>Rep.</b> | <b>Valor de "C" a 60°C (kJ)</b> | <b>Valor de "C" a 70°C (kJ)</b> | <b>Valor de "C" a 80°C (kJ)</b> | <b>Valor de "C" a 90°C (kJ)</b> |
|-----------------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Bourbon         | 1           | 52,7011                         | 55,2370                         | 58,3711                         | 65,0770                         |
|                 | 2           | 51,0782                         | 54,1042                         | 57,8176                         | 64,8099                         |
|                 | 3           | 54,1620                         | 53,4718                         | 58,2555                         | 64,6583                         |
| <b>Promedio</b> |             | 52,6471                         | 54,2710                         | 58,1481                         | 64,8484                         |
| Catimor         | 1           | 52,7011                         | 55,2370                         | 58,3711                         | 65,0770                         |
|                 | 2           | 51,0782                         | 54,1042                         | 57,8176                         | 64,8099                         |
|                 | 3           | 54,1620                         | 53,4718                         | 58,2555                         | 64,6583                         |
| <b>Promedio</b> |             | 52,6471                         | 54,2710                         | 58,1481                         | 64,8484                         |

**A-XII:** Calor específico a 50% agua y 50% café a las temperaturas de 60, 70, 80 y 90°C de las variedades Bourbon y Catimor.

| <b>Variedad</b> | <b>Rep.</b> | <b>Calor Específico a 60°C (kJ/kg C)</b> | <b>Calor Específico a 70°C (kJ/kg C)</b> | <b>Calor Específico a 80°C (kJ/kg C)</b> | <b>Calor Específico a 90°C (kJ/kg C)</b> |
|-----------------|-------------|--|--|--|--|
| Bourbon         | 1           | 1,7832                                   | 5,7884                                   | 8,7001                                   | 10,1348                                  |
|                 | 2           | 4,8149                                   | 5,8738                                   | 8,1041                                   | 9,7045                                   |
|                 | 3           | 2,8321                                   | 5,6536                                   | 7,5387                                   | 9,8712                                   |
| <b>Promedio</b> |             | 3,1434                                   | 5,7052                                   | 8,1146                                   | 9,9035                                   |
| Catimor         | 1           | 2,3232                                   | 6,8384                                   | 9,4501                                   | 10,9110                                  |
|                 | 2           | 5,8049                                   | 6,0838                                   | 9,0512                                   | 10,2512                                  |
|                 | 3           | 4,1521                                   | 6,0836                                   | 8,6426                                   | 10,2210                                  |
| <b>Promedio</b> |             | 3,0434                                   | 5,9052                                   | 8,2146                                   | 9,8511                                   |

**A-XIII:** Calor específico a una proporción de 60% agua y 40% café a las temperaturas de 60, 70, 80 y 90°C de las variedades Bourbon y Catimor.

| Variedad        | Rep. | Calor                          | Calor                          | Calor                          | Calor                          |
|-----------------|------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|                 |      | Específico a<br>60°C (kJ/kg C) | Específico a<br>70°C (kJ/kg C) | Específico a<br>80°C (kJ/kg C) | Específico a<br>90°C (kJ/kg C) |
| Bourbon         | 1    | 6,3033                         | 10,4049                        | 12,5731                        | 14,9730                        |
|                 | 2    | 6,0622                         | 10,6516                        | 12,7706                        | 14,9922                        |
|                 | 3    | 6,9870                         | 10,2138                        | 12,6723                        | 14,6123                        |
| <b>Promedio</b> |      | 6,4175                         | 10,3568                        | 12,6053                        | 14,8092                        |
| Catimor         | 1    | 7,2133                         | 11,2949                        | 12,9331                        | 15,3830                        |
|                 | 2    | 8,3722                         | 10,5416                        | 12,1306                        | 15,2522                        |
|                 | 3    | 7,8970                         | 11,0038                        | 12,9323                        | 15,3223                        |
| <b>Promedio</b> |      | 6,9175                         | 10,0568                        | 12,3053                        | 14,7092                        |

**A-XIV:** Calor específico a 70% agua y 30% café a las temperaturas de 60, 70, 80 y 90°C de las variedades Bourbon y Catimor.

| Variedad        | Rep. | Calor                          | Calor                          | Calor                          | Calor                          |
|-----------------|------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|                 |      | Específico a<br>60°C (kJ/kg C) | Específico a<br>70°C (kJ/kg C) | Específico a<br>80°C (kJ/kg C) | Específico a<br>90°C (kJ/kg C) |
| Bourbon         | 1    | 16,6203                        | 17,8400                        | 20,1984                        | 24,0061                        |
|                 | 2    | 15,1882                        | 17,7279                        | 19,7299                        | 24,1567                        |
|                 | 3    | 14,5015                        | 18,0283                        | 19,0304                        | 24,8511                        |
| <b>Promedio</b> |      | 15,7700                        | 17,1987                        | 19,9862                        | 24,3713                        |
| Catimor         | 1    | 18,3303                        | 18,5700                        | 20,9284                        | 25,7361                        |
|                 | 2    | 14,8982                        | 18,4579                        | 18,4599                        | 25,4867                        |
|                 | 3    | 16,2115                        | 19,7583                        | 19,7604                        | 25,5811                        |
| <b>Promedio</b> |      | 14,7700                        | 18,1987                        | 18,9862                        | 24,8713                        |

**A-XV:** Calor específico a 80% agua y 20% café a las temperaturas de 60, 70, 80 y 90°C de las variedades Bourbon y Catimor.

| Variedad        | Rep. | Calor                       | Calor                       | Calor                       | Calor                       |
|-----------------|------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                 |      | Específico a 60°C (kJ/kg C) | Específico a 70°C (kJ/kg C) | Específico a 80°C (kJ/kg C) | Específico a 90°C (kJ/kg C) |
| Bourbon         | 1    | 28,2548                     | 35,0281                     | 36,8314                     | 48,0978                     |
|                 | 2    | 25,9083                     | 35,5384                     | 36,7309                     | 45,7163                     |
|                 | 3    | 28,3218                     | 35,7880                     | 36,6914                     | 45,8576                     |
| <b>Promedio</b> |      | 27,1617                     | 35,4182                     | 36,7512                     | 46,5239                     |
| Catimor         | 1    | 29,1348                     | 35,7081                     | 35,7114                     | 49,4778                     |
|                 | 2    | 24,7883                     | 35,4184                     | 37,6109                     | 46,5963                     |
|                 | 3    | 27,2018                     | 35,6680                     | 35,6714                     | 46,7376                     |
| <b>Promedio</b> |      | 26,1617                     | 34,7182                     | 35,4512                     | 46,7239                     |

**A-XVI:** Densidad a una proporción de 50% agua y 50% café a las temperaturas de 60, 70, 80 y 90°C de las variedades Bourbon y Catimor.

| Variedad        | Rep. | Densidad       | Densidad       | Densidad       | Densidad       |
|-----------------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                 |      | a 60°C (kg/m3) | a 70°C (kg/m3) | a 80°C (kg/m3) | a 90°C (kg/m3) |
| Bourbon         | 1    | 1,1250         | 1,1240         | 1,1230         | 1,1220         |
|                 | 2    | 1,1240         | 1,1240         | 1,1240         | 1,1220         |
|                 | 3    | 1,1250         | 1,1250         | 1,1230         | 1,1220         |
| <b>Promedio</b> |      | 1,1247         | 1,1243         | 1,1233         | 1,1220         |
| Catimor         | 1    | 1,1350         | 1,1340         | 1,1330         | 1,1320         |
|                 | 2    | 1,1340         | 1,1340         | 1,1340         | 1,1320         |
|                 | 3    | 1,1350         | 1,1350         | 1,1330         | 1,1320         |
| <b>Promedio</b> |      | 1,1347         | 1,1343         | 1,1333         | 1,1320         |

**A-XVII:** Densidad a una proporción de 60% agua y 40% café a las temperaturas de 60, 70, 80 y 90°C de las variedades Bourbon y Catimor.

| <b>Variedad</b> | <b>Rep.</b> | <b>Densidad<br/>a 60°C (kg/m3)</b> | <b>Densidad<br/>a 70°C (kg/m3)</b> | <b>Densidad<br/>a 80°C (kg/m3)</b> | <b>Densidad<br/>a 90°C (kg/m3)</b> |
|-----------------|-------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Bourbon         | 1           | 1,1250                             | 1,1240                             | 1,1230                             | 1,1220                             |
|                 | 2           | 1,1240                             | 1,1240                             | 1,1240                             | 1,1220                             |
|                 | 3           | 1,1250                             | 1,1250                             | 1,1230                             | 1,1220                             |
| <b>Promedio</b> |             | 1,1247                             | 1,1243                             | 1,1233                             | 1,1220                             |
| Catimor         | 1           | 1,2050                             | 1,2040                             | 1,2030                             | 1,2020                             |
|                 | 2           | 1,2040                             | 1,2040                             | 1,2040                             | 1,2020                             |
|                 | 3           | 1,2050                             | 1,2050                             | 1,2030                             | 1,2020                             |
| <b>Promedio</b> |             | 1,2047                             | 1,2043                             | 1,2033                             | 1,2020                             |

**A-XVIII:** Densidad a una proporción de 70% agua y 30% café a las temperaturas de 60, 70, 80 y 90°C de las variedades Bourbon y Catimor.

| <b>Variedad</b> | <b>Rep.</b> | <b>Densidad<br/>a 60°C (kg/m3)</b> | <b>Densidad<br/>a 70°C (kg/m3)</b> | <b>Densidad<br/>a 80°C (kg/m3)</b> | <b>Densidad<br/>a 90°C (kg/m3)</b> |
|-----------------|-------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Bourbon         | 1           | 1,1360                             | 1,1350                             | 1,1330                             | 1,1320                             |
|                 | 2           | 1,1350                             | 1,1340                             | 1,1330                             | 1,1310                             |
|                 | 3           | 1,1360                             | 1,1340                             | 1,1320                             | 1,1310                             |
| <b>Promedio</b> |             | 1,1357                             | 1,1343                             | 1,1327                             | 1,1313                             |
| Catimor         | 1           | 1,2260                             | 1,2250                             | 1,2230                             | 1,2220                             |
|                 | 2           | 1,2250                             | 1,2240                             | 1,2230                             | 1,2210                             |
|                 | 3           | 1,2260                             | 1,2240                             | 1,2220                             | 1,2210                             |
| <b>Promedio</b> |             | 1,2257                             | 1,2243                             | 1,2227                             | 1,2213                             |

**A-XIX:** Densidad a una proporción de 80% agua y 20% café a las temperaturas de 60, 70, 80 y 90°C de las variedades Bourbon y Catimor.

| <b>Variedad</b> | <b>Rep.</b> | <b>Densidad<br/>a 60°C (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Densidad<br/>a 70°C (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Densidad<br/>a 80°C (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Densidad<br/>a 90°C (kg/m<sup>3</sup>)</b> |
|-----------------|-------------|---|---|---|---|
| Bourbon         | 1           | 1,1370  | 1,1350  | 1,1330  | 1,1320  |
|                 | 2           | 1,1360  | 1,1340  | 1,1330  | 1,1310  |
|                 | 3           | 1,1370  | 1,1350  | 1,1330  | 1,1300  |
| <b>Promedio</b> |             | 1,1367  | 1,1347  | 1,1330  | 1,1310  |
| Catimor         | 1           | 1,1570  | 1,1550  | 1,1530  | 1,1520  |
|                 | 2           | 1,1560  | 1,1540  | 1,1530  | 1,1510  |
|                 | 3           | 1,1570  | 1,1550  | 1,1530  | 1,1500  |
| <b>Promedio</b> |             | 1,1567  | 1,1547  | 1,1530  | 1,1510  |

**A-XX:** Conductividad térmica a una proporción de 50% agua y 50% café a las temperaturas de 60, 70, 80 y 90°C de las variedades Bourbon y Catimor.

| <b>Variedad</b> | <b>Rep.</b> | <b>Conductividad<br/>térmica a 60°C<br/>(W/K.m)</b> | <b>Conductividad<br/>térmica a 70°C<br/>(W/K.m)</b> | <b>Conductividad<br/>térmica a 80°C<br/>(W/K.m)</b> | <b>Conductividad<br/>térmica a 90°C<br/>(W/K.m)</b> |
|-----------------|-------------|---|---|---|---|
| Bourbon         | 1           | 0,6145  | 2,4622  | 5,7960  | 8,7616  |
|                 | 2           | 1,5341  | 2,4822  | 5,4907  | 8,1980  |
|                 | 3           | 1,0087  | 2,4590  | 5,2392  | 8,5670  |
| <b>Promedio</b> |             | 1,0525  | 2,4678  | 5,5087  | 8,5088  |
| Catimor         | 1           | 0,8100  | 2,8849  | 6,3518  | 9,5203  |
|                 | 2           | 1,9900  | 2,5666  | 6,1362  | 8,8587  |
|                 | 3           | 1,4920  | 2,5351  | 5,8775  | 8,9680  |
| <b>Promedio</b> |             | 1,4307  | 2,6622  | 6,1218  | 9,1156  |

**A-XXI:** Conductividad térmica a una proporción de 60% agua y 40% café a las temperaturas de 60, 70, 80 y 90°C de las variedades Bourbon y Catimor.

| Variedad        | Rep. | Conductividad             | Conductividad             | Conductividad             | Conductividad             |
|-----------------|------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                 |      | térmica a 60°C<br>(W/K.m) | térmica a 70°C<br>(W/K.m) | térmica a 80°C<br>(W/K.m) | térmica a 90°C<br>(W/K.m) |
| Bourbon         | 1    | 5,1978                    | 6,6295                    | 12,0156                   | 20,0203                   |
|                 | 2    | 4,0966                    | 6,6164                    | 9,1951                    | 19,7800                   |
|                 | 3    | 4,5259                    | 7,0773                    | 9,9674                    | 19,9178                   |
| <b>Promedio</b> |      | 4,6068                    | 6,7744                    | 10,3927                   | 19,9060                   |
| Catimor         | 1    | 6,1868                    | 7,4480                    | 13,4388                   | 22,2430                   |
|                 | 2    | 4,9948                    | 7,4356                    | 10,3341                   | 21,9837                   |
|                 | 3    | 5,4605                    | 7,9321                    | 11,1726                   | 22,1344                   |
| <b>Promedio</b> |      | 5,5474                    | 7,6052                    | 11,6485                   | 22,1203                   |

**A-XXII:** Conductividad térmica a una proporción de 70% agua y 30% café a las temperaturas de 60, 70, 80 y 90°C de las variedades Bourbon y Catimor.

| Variedad        | Rep. | Conductividad             | Conductividad             | Conductividad             | Conductividad             |
|-----------------|------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                 |      | térmica a 60°C<br>(W/K.m) | térmica a 70°C<br>(W/K.m) | térmica a 80°C<br>(W/K.m) | térmica a 90°C<br>(W/K.m) |
| Bourbon         | 1    | 2,0212                    | 4,0983                    | 7,3804                    | 11,7425                   |
|                 | 2    | 2,3830                    | 3,7891                    | 6,9246                    | 11,6359                   |
|                 | 3    | 2,2381                    | 3,9741                    | 7,4130                    | 11,6560                   |
| <b>Promedio</b> |      | 2,2141                    | 3,9538                    | 7,2393                    | 11,6781                   |
| Catimor         | 1    | 2,4774                    | 4,7603                    | 8,1325                    | 13,0991                   |
|                 | 2    | 2,8639                    | 4,4282                    | 7,6443                    | 12,9848                   |
|                 | 3    | 2,7036                    | 4,6262                    | 8,1685                    | 13,0048                   |
| <b>Promedio</b> |      | 2,6817                    | 4,6049                    | 7,9818                    | 13,0296                   |

**A-XXIII:** Conductividad térmica a una proporción de 80% agua y 20% café a las temperaturas de 60, 70, 80 y 90°C de las variedades Bourbon y Catimor.

| Variedad        | Rep. | Conductividad             | Conductividad             | Conductividad             | Conductividad             |
|-----------------|------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                 |      | térmica a 60°C<br>(W/K.m) | térmica a 70°C<br>(W/K.m) | térmica a 80°C<br>(W/K.m) | térmica a 90°C<br>(W/K.m) |
| Bourbon         | 1    | 8,8442                    | 12,0714                   | 18,2005                   | 34,1286                   |
|                 | 2    | 7,4331                    | 11,9345                   | 19,3586                   | 31,8360                   |
|                 | 3    | 8,2223                    | 12,2431                   | 18,2008                   | 32,1040                   |
| <b>Promedio</b> |      | 8,1666                    | 12,0830                   | 18,5866                   | 32,6895                   |
| Catimor         | 1    | 7,7634                    | 12,5945                   | 18,9898                   | 35,3605                   |
|                 | 2    | 6,6391                    | 12,4544                   | 20,1723                   | 33,0226                   |
|                 | 3    | 7,3708                    | 12,7740                   | 18,9906                   | 33,2992                   |
| <b>Promedio</b> |      | 7,2578                    | 12,6076                   | 19,3842                   | 33,8941                   |