



# **UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN  
ENERGÍAS RENOVABLES**

## **TESIS**

**“CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES  
SEDIMENTARIOS PARA SU APLICACIÓN COMO  
AISLANTE TÉRMICO EN CÁMARAS DE  
COMBUSTIÓN”**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN MATERIALES Y SISTEMAS  
ENERGÉTICOS RENOVABLES**

**PRESENTA**

**ING. JOSÉ EDUARDO AGUILAR JOO**

**DIRECTORES**

**DR. NEÍN FARRERA VÁZQUEZ  
DR. CARLOS ALONSO MEZA AVENDAÑO**

**TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS**

**FEBRERO DE 2022**



# UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

## DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 09 de marzo de 2022

Oficio No. DIP/009/2022

Asunto: Autorización de Impresión de Tesis

**C. José Eduardo Aguilar Joo**

Candidato al Grado de Maestro en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables

Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables

UNICACH

PRESENTE

Con fundamento en la opinión favorable emitida por escrito por la Comisión Revisora que analizó el trabajo terminal presentado por usted, denominado *Caracterización de materiales sedimentarios para su aplicación como aislante térmico en cámaras de combustión* cuyos directores de tesis son el Dr. Neín Farrera Vázquez y Dr. Carlos Alonso Meza Avendaño, quienes avalan el cumplimiento de los criterios metodológicos y de contenido; esta Dirección a mi cargo autoriza la impresión del documento en cita, para la defensa oral del mismo, en el examen que habrá de sustentar para obtener el Grado de Maestro en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables.

Es imprescindible observar las características normativas que debe guardar el documento impreso, así como realizar la entrega en esta Dirección de un ejemplar empastado.

ATENTAMENTE  
"POR LA CULTURA DE MI RAZA"

DRA. CAROLINA ORANTES GARCÍA  
DIRECTORA



- C.c.p. Dr. Pascual López de Paz, Director del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, UNICACH. Para su conocimiento.  
Dr. José Francisco Pola Albores, Coordinador del Posgrado, Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, UNICACH. Para su conocimiento.  
Archivo/minutario.



COG/eco/igp/gtr

Dirección de  
**Investigación**  
y Posgrado

2022 Año de Ricardo Flores Magón  
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

Dirección de Investigación y Posgrado  
Libramiento Norte Poniente No. 1150  
Colonia Lajas Maciel. CP 29039.  
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.  
Tel (961)6170440 Ext.4360  
investigacionyposgrado@unicach.mx

## AGRADECIMIENTOS

En cada etapa de la vida, el ser humano se formula objetivos y metas para salir adelante, sin importar las adversidades en la que están expuestas diariamente. En este caso, el haber cursado un posgrado fue un punto importante para mi formación académica, profesional e incluso personal debido a la grata experiencia de adquirir habilidades científicas teóricas y prácticas que serán un cúmulo más que permanecerá por siempre. Cabe destacar que este proceso no fue por si sólo, sino hubo un acompañamiento indispensable en este lapso de tiempo, por lo cual merecen mi reconocimiento y gratitud.

En primer lugar, agradezco por siempre a Dios por guiarme en esta parte de mi vida personal. Reconozco al Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas por brindarme sus instalaciones y equipos para desarrollar parte del proyecto de investigación.

Asimismo, expreso toda mi gratitud al Dr. Neín Farrera Vázquez, investigador del CIDETEC - UVM, por darme la oportunidad, apoyo y total confianza antes, durante y después del proceso del posgrado, así como enseñarme que toda investigación tiene un significado contribuyente a la sociedad, principalmente a los más desfavorecidos. ¡¡Muchas Gracias!!

Agradezco al Dr. Carlos Alonso Meza Avendaño por brindarme su apoyo y conocimiento en esta gran etapa, principalmente en la operación de diversos equipos y en la revisión de este escrito.

Además, expreso mi gratitud a la M. en Arq. Selene López Camaras, siendo una piedra angular de suma importancia en la investigación, por compartir sus conocimientos acerca del uso de las tierras y los beneficios que conlleva, así como su espacio y herramientas de trabajo. Sin ella, este proceso no se hubiera realizado.

Posteriormente, el reconocimiento al Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables (LNVCS) de la Universidad Autónoma de Chiapas y en especial, al Dr. Raúl Pavel Ruiz Torres, por prestarme su espacio para realizar uno de los estudios pilares en la investigación.

Agradezco al M. en C. Óscar Martínez Aguirre por apoyarme en su experiencia y contribución práctica en la última fase de la investigación, procediendo a la realización experimental de equipos de trabajo. No obstante, expreso mi agradecimiento a los docentes y administrativos del IIIER por su apoyo, así como mis compañeros y amigos del instituto por compartir sus experiencias personales para enfrentar esta etapa.

Gracias profundamente a mi familia por su amor, cariño, guía y apoyo incondicional en cada momento de mi vida. ¡¡Los quiero mucho!!

Por último, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo recibido durante todo el proceso de formación profesional y alcanzar el grado de Maestro en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables.

*“Cada intento en el camino, es un paso a tu destino”*

**Anónimo**

## DEDICATORIA

*“Este trabajo está dedicado en especial a Dios y a mi hermosa familia Aguilar Joo que, a pesar de los obstáculos y adversidades que hemos pasado en todos estos años de vida, se han superado mediante todo el amor, cariño y ejemplo, ofreciendo además su fortaleza para no darse por vencido y apoyarme en todas las decisiones de mi vida. Somos únicos.*

*¡¡¡Los amo mucho!!!*

## RESUMEN

Este trabajo de investigación está enfocado en la caracterización de materiales sedimentarios aplicados en piezas cerámicas a través de diversas técnicas de análisis para su aplicación en cámaras de combustión. Se determinó la conductividad térmica efectiva de las piezas cerámicas, así como sus propiedades físicas y químicas, para el entendimiento de su comportamiento térmico. Además, se aplicó un análisis de comportamiento térmico a temperaturas elevadas.

Los resultados obtenidos dirigieron la atención hacia una mejor comprensión del papel que desempeñan algunos parámetros en la mejora de las propiedades de aislamiento térmico, destacando el papel favorable de la calcita y el cuarzo como minerales aglomerantes en el aislamiento térmico, incluso en la condición de resistencia a altas temperaturas (refractario). Por último, las proporciones volumétricas de material orgánico (aserrín) como agregado formador de poros influye en la disminución de la densidad aparente en las piezas cerámicas y, por ende, en la reducción de la conductividad térmica.

## ABSTRACT

This research work is focused on the characterization of sedimentary materials applied in ceramic pieces through several analysis techniques for their application in fireboxes. The effective thermal conductivity of the ceramic pieces and their physical and chemical properties was determined, to understand their thermal behavior. Furthermore, an analysis of thermal behavior at elevated temperatures was carried out.

The results obtained directed the attention towards a better understanding of the role that some parameters play in improving thermal insulation properties, highlighting the favorable role of calcite and quartz as binder minerals in thermal insulation, even in the resistance condition at high temperatures (refractory). Finally, the volumetric proportions of organic material (sawdust) as pore-forming aggregate influences the decrease in apparent density in ceramic pieces, and therefore, in the reduction of thermal conductivity.

# ÍNDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>PROBLEMÁTICA .....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>OBJETIVOS.....</b>   | <b>4</b>  |
| OBJETIVO GENERAL .....  | 4         |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                       | 4         |
| <b>JUSTIFICACIÓN.....</b>   | <b>5</b>  |
| <br>  |           |
| <b>CAPÍTULO I ANTECEDENTES .....</b>                              | <b>6</b>  |
| 1.1    ORIGEN HISTÓRICO DE LOS MATERIALES AISLANTES TÉRMICOS..... | 6         |
| 1.2    ANTECEDENTES DE ESTUDIOS .....                             | 10        |
| <br>  |           |
| <b>CAPÍTULO II FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>                     | <b>17</b> |
| 2.1    DEFINICIÓN DE LOS MATERIALES TÉRMICOS.....                 | 17        |
| 2.2    CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES TÉRMICOS.....              | 20        |
| 2.3    LAS ROCAS Y SU CLASIFICACIÓN .....                         | 21        |
| 2.4    ESTUDIO DE LOS MATERIALES CERÁMICOS.....                   | 24        |
| 2.4.1    PRODUCTOS DE ARCILLAS .....                              | 25        |
| 2.4.2    PROCESO DE TRATAMIENTO.....                              | 26        |
| 2.5    PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....                         | 28        |
| 2.5.1    PROPIEDADES FÍSICAS BÁSICAS Y TÉRMICAS .....             | 28        |
| 2.5.2    PROPIEDADES QUÍMICAS Y MINERALÓGICAS .....               | 35        |
| 2.6    CÁMARAS DE COMBUSTIÓN.....                                 | 38        |
| <br>  |           |
| <b>CAPÍTULO III METODOLOGÍA .....</b>                             | <b>39</b> |
| 3.1    MUESTREO Y PREPARACIÓN DE PIEZAS.....                      | 39        |
| 3.1.1    RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS .....                        | 40        |
| 3.1.2    TRATAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA.....                     | 41        |
| 3.1.3    ELABORACIÓN DE LAS PIEZAS CERÁMICAS .....                | 42        |

|  |  |           |
|--|--|-----------|
| 3.2  | CARACTERIZACIÓN QUÍMICA.....   | 43        |
| 3.2.1  | IDENTIFICACIÓN DE MINERALES POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X (XRD) .....                  | 43        |
| 3.2.2  | ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X (XRF).....                 | 45        |
| 3.3  | CARACTERIZACIÓN FÍSICA.....  | 46        |
| 3.3.1  | ENSAYO DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.....   | 46        |
| 3.3.2  | DETERMINACIÓN DE ABSORCIÓN Y POROSIDAD APARENTE .....                              | 48        |
| 3.4  | DETERMINACIÓN DE COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LAS PIEZAS CERÁMICAS...                 | 50        |
| <b>CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>         |  | <b>52</b> |
| 4.1  | CARACTERIZACIÓN QUÍMICA.....   | 52        |
| 4.1.1  | IDENTIFICACIÓN DE MINERALES POR ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X...               | 52        |
| 4.1.2  | ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X (XRF).....                 | 58        |
| 4.2  | CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y TÉRMICA.....  | 59        |
| 4.2.1  | ESTUDIO DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA .....   | 59        |
| 4.2.2  | DENSIDAD Y POROSIDAD APARENTE .....  | 62        |
| 4.3  | RELACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS CON LA CONDUCTIVIDAD<br>TÉRMICA..... | 65        |
| 4.4  | ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LAS PIEZAS CERÁMICAS .....                   | 67        |
| <b>CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b> |  | <b>70</b> |
| 5.1  | CONCLUSIONES FINALES .....   | 70        |
| 5.2  | TRABAJOS FUTUROS.....  | 72        |
| <b>REFERENCIAS.....</b>                                |  | <b>73</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>                                    |  | <b>79</b> |
|  | ANEXO 1. PARÁMETROS DE OPERACIÓN PARA LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA .....               | 79        |
|  | ANEXO 2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA CONDUCTIVIDAD Y RESISTENCIA TÉRMICA ...      | 81        |
|  | ANEXO 3. PARÁMETROS OBTENIDOS DE LA DENSIDAD Y POROSIDAD APARENTE.....             | 82        |
|  | ANEXO 4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA DENSIDAD Y POROSIDAD APARENTE .....          | 84        |
|  | ANEXO 5. OBTENCIÓN DE DATOS PARA SIMULACIÓN DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....         | 85        |

## LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1.1.</b> Resultados de conductividad térmica para muestras de materiales (Lira – Cortés et al., 2008)..... | 10 |
| <b>Tabla 1.2.</b> Densidad aparente de los materiales y conductividad térmica (Gutiérrez y González, 2012).....     | 11 |
| <b>Tabla 1.3.</b> Propiedades térmicas de rocas (Rawlings y Sykulski, 1999).....                                    | 12 |
| <b>Tabla 1.4.</b> Valores prácticos de la conductividad térmica y densidad (Cedeño Valdiviezo, 2010).....           | 13 |
| <b>Tabla 1.5.</b> Relación de conductividad térmica con flujo de calor en polvos (Mena-Novelo et al., 2015).....    | 13 |
| <b>Tabla 1.6.</b> Rangos de porosidad y conductividad térmica en los materiales (Bhattacharjee et al., 2004).....   | 14 |
| <br>  |    |
| <b>Tabla 2.1.</b> Clasificación de los materiales de aislamiento respecto a su composición .....                    | 20 |
| <b>Tabla 2.2.</b> Características petrográficas relacionadas con la calidad de la roca .....                        | 23 |
| <br>  |    |
| <b>Tabla 3.1.</b> Ubicación de muestras recolectadas .....  | 40 |
| <b>Tabla 3.2.</b> Matriz de combinación propuesta de materiales para la fabricación de piezas cerámicas ..          | 42 |
| <br>  |    |
| <b>Tabla 4.1.</b> Determinación de compuestos químicos en relación a su porcentaje de masa. ....                    | 58 |
| <b>Tabla 4.2.</b> Valores de operación obtenidos en la medición de conductividad térmica. ....                      | 59 |
| <b>Tabla 4.3.</b> Resultados de la conductividad y resistencia térmica de las piezas cerámicas .....                | 60 |
| <b>Tabla 4.4.</b> Valores obtenidos en el estudio de densidad y porosidad aparente.....                             | 62 |
| <b>Tabla 4.5.</b> Resultados de la densidad y porosidad aparente de las piezas cerámicas .....                      | 62 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 2.1.</b> Escala de conductividad térmica para diversos materiales a temperatura ambiente .....   | 18 |
| <b>Figura 2.2.</b> Criterios de clasificación de las rocas .....   | 22 |
| <b>Figura 2.3.</b> Proceso de fabricación de cerámicos de arcillas .....   | 26 |
| <b>Figura 3.1.</b> Muestras recolectadas de sedimentos .....   | 40 |
| <b>Figura 3.2.</b> Muestras de los materiales sedimentarios separados entre sus partículas gruesas y finas.....  | 41 |
| <b>Figura 3.3.</b> Distribución de las muestras tratadas por capas en la pieza .....   | 42 |
| <b>Figura 3.4.</b> Equipo de difracción de rayos X.....  | 43 |
| <b>Figura 3.5.</b> Colocación de la muestra en el difractor de rayos X .....   | 44 |
| <b>Figura 3.6.</b> Espectrómetro de fluorescencia de rayos X secuencial (WDXRF) .....  | 45 |
| <b>Figura 3.7.</b> Equipo de medición de conductividad térmica .....   | 47 |
| <b>Figura 3.8.</b> Prueba de absorción en tres muestras representativas .....  | 48 |
| <b>Figura 3.9.</b> Horno convencional .....  | 50 |
| <b>Figura 3.10.</b> Monitoreo de temperatura dentro del horno y en la cara exterior de la pieza cerámica...  | 51 |
| <b>Figura 4.1.</b> Difracción de rayos X de la muestra no.1 .....  | 53 |
| <b>Figura 4.2.</b> Difracción de rayos X de la muestra no.2. ....  | 54 |
| <b>Figura 4.3.</b> Difracción de rayos X de la muestra no.3 .....  | 55 |
| <b>Figura 4.4.</b> Difracción de rayos X de la muestra no.4 .....  | 56 |
| <b>Figura 4.5.</b> Difracción de rayos X de la muestra no.5 .....  | 57 |
| <b>Figura 4.6.</b> Comparación de la conductividad térmica de las muestras con algunos materiales utilizados en construcción. Modificado de González–Cruz (2015) [79].....         | 61 |
| <b>Figura 4.7.</b> Comparación de la densidad aparente promedio de las muestras con algunos materiales utilizados en construcción. Modificado de González – Cruz (2015) [79]. .... | 63 |
| <b>Figura 4.8.</b> Conductividad térmica en función con (a) densidad aparente y (b) porosidad .....  | 65 |

**Figura 4.9.** Conductividad térmica en relación al porcentaje de (a) SiO<sub>2</sub>, (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (c) CaO y (d) MgO..... 66

**Figura 4.10.** Evolución de las temperaturas promedios registradas de las muestras representativas y dentro de la cámara del horno con respecto al tiempo..... 68

**Figura 4.11.** Gradientes de temperaturas promedios entre las piezas cerámicas y dentro de la cámara del horno con respecto al tiempo. .... 69

# NOMENCLATURA

| <b>Símbolo</b> | <b>Significado</b>  |
|----------------|---|
| APCG           | <i>Aparato de placa caliente con guarda</i>                       |
| A              | <i>Área de la sección (m<sup>2</sup>)</i>                         |
| C <sub>p</sub> | <i>Calor específico (J/kg °C)</i>                                 |
| k              | <i>Conductividad térmica (W/m °C)</i>                             |
| $\rho_w$       | <i>Densidad del líquido (g/cm<sup>3</sup>)</i>                    |
| $\rho_d$       | <i>Densidad del material (g/cm<sup>3</sup>)</i>                   |
| $\Delta T$     | <i>Diferencia de Temperatura (°C)</i>                             |
| XRD            | <i>Difracción de rayos X</i>                                      |
| $\Delta x$     | <i>Espesor de la sección (m)</i>                                  |
| Q              | <i>Flujo de calor (W)</i>   |
| WDXRF          | <i>Fluorescencia de rayos X de dispersión de longitud de onda</i> |
| JCPDS          | <i>Joint Committee on Powder Diffraction Standards</i>            |
| $m_w$          | <i>Masa de muestra en condición saturada (g)</i>                  |
| $m_D$          | <i>Masa de muestra en condición seca (g)</i>                      |
| P (%)          | <i>Porcentaje de porosidad</i>                                    |
| $\lambda$      | <i>Resistencia térmica (W/m °C)</i>                               |
| V <sub>v</sub> | <i>Volumen de absorción de líquido (cm<sup>3</sup>)</i>           |
| V <sub>T</sub> | <i>Volumen total de la muestra (cm<sup>3</sup>)</i>               |

# INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los materiales utilizados para el aislamiento térmico son derivados de los materiales no renovables y de los combustibles fósiles, generando un incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Ante estos impactos ambientales, el agotamiento de los recursos y la necesidad de un uso eficiente de la energía, se está conduciendo a una evaluación integral de los materiales térmicos mediante el desarrollo de tecnologías que faciliten al aprovechamiento de recursos naturales, con el propósito de hacer conciencia hacia el medio ambiente [1].

La eficiencia de un material se evalúa actualmente en función de una variedad de factores, no solo el espesor del aislamiento térmico, sino también de acuerdo con la demanda económica, las reducciones de CO<sub>2</sub> y las características ecológicas. Satisfacer estas propiedades esenciales y críticas para una evaluación holística es la elección de materias primas reciclables, renovables, disponibles localmente y respetuosas con el medio ambiente. Por esa razón, su aplicación es cada vez más común debido a las discusiones promulgadas sobre el manejo apropiado de materiales aislantes sintéticos como el poliestireno y el poliuretano [1, 2].

Cabe señalar que los materiales aislantes térmicos son fundamentales para evitar pérdidas de energía. El uso de materias primas renovables son la mejor opción para promover el uso racional de los recursos naturales y la preservación ambiental. Actualmente, la creación de nuevos materiales está enfocada a la caracterización de materiales sedimentarios existentes en el estado de Chiapas para el aprovechamiento como aislante térmico para cámaras de combustión. Por tanto, es necesario conocer sus propiedades físicas, químicas y térmicas como determinantes en su eficiencia.

# PROBLEMÁTICA

Las propiedades térmicas de los materiales se logran medir con precisión, calculando la cantidad de calor transmitido a través de sus estructuras. Sin embargo, han existido intentos de desarrollar estos materiales mediante diversos tratamientos o técnicas con el fin de establecer una barrera a la transferencia de calor entre dos medios que naturalmente tenderían a equilibrar uniformemente la temperatura, evitando que el calor traspase los separadores del sistema que interactúa con el ambiente que lo rodea [1]. Entonces los materiales aislantes térmicos se convierten en una novedad, porque realizan la labor de reducir el elevado consumo de energía y de esta forma, su eficiencia es un aspecto en términos de sostenibilidad, intentando conseguir su ahorro energético.

Sin embargo, esta clase de materiales tienen un elevado precio en el mercado debido a que los puntos de fabricación no están localizados en zonas con alta demanda, aumentando así el costo de transporte. Asimismo, a pesar que en su aplicación existe una disminución energética, en su proceso de fabricación que es de orden industrial implican una gran cantidad de energía y elementos contaminantes que afectan en gran medida al medio ambiente.

En este marco, surge el estímulo de desarrollar la investigación, estableciendo criterios que contribuyen a la identificación y caracterización de materiales sedimentarios en el estado de Chiapas, como la finalidad de responder a dos cuestionamientos descritos a continuación:

- ❖ ¿Cuáles son los materiales sedimentarios que funcionen como aislamiento térmico para su aplicación en cámaras de combustión?
- ❖ ¿Bajo qué condiciones demuestran que esta clase de materiales presentan un óptimo funcionamiento térmico como aislante para resistencia a altas temperaturas?

Para eso, se centra en un estudio de las propiedades de esta clase de materiales, así como sus procesos de extracción y fabricación para determinar una serie de criterios para una

propuesta de combinación y hacer comparaciones entre todos ellos, destacando una de las características básicas, que es la resistencia a altas temperaturas (refractario). Tras un recorrido por el entendimiento de la investigación, se sintetiza en cinco capítulos.

El capítulo uno se centra en la revisión de los antecedentes de estudio realizados a lo largo de la historia sobre los materiales sedimentarios, para tener un mejor sustento del trabajo realizado en esta investigación.

El capítulo dos describe los fundamentos teóricos que argumentan las características relacionadas con los materiales aislantes térmicos, mediante su conceptualización y el conocimiento de su clasificación de acuerdo a su origen y estructura para el entendimiento del mismo.

El capítulo tres muestra la metodología aplicada en la investigación, es decir, las técnicas aplicadas en campo y en laboratorio, desde la obtención de la materia prima, sus combinaciones acordes con sus propiedades, las caracterizaciones físicas y químicas hasta su evaluación final en una cámara de combustión

En el capítulo cuatro presenta los resultados obtenidos a partir de las técnicas de análisis y los métodos de ensayo realizados, así como la interpretación y discusión de los mismos.

Finalmente, el capítulo cinco da a conocer las conclusiones que contribuyen al entendimiento de la investigación y las posibles líneas de trabajo a futuro.

# OBJETIVOS

## OBJETIVO GENERAL

Caracterizar materiales sedimentarios existentes en el estado de Chiapas en piezas cerámicas para su uso como aislante térmico en cámaras de combustión.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Identificar muestras de materiales sedimentarios que puedan cumplir con las características térmicas óptimas.
- ❖ Analizar las propiedades de las muestras a través de su caracterización física y química.
- ❖ Evaluar y seleccionar los materiales con mejores características para su implementación en una cámara de combustión.

## JUSTIFICACIÓN

La contaminación que recientemente se vive en el planeta a causa de los gases de efecto invernadero que se generan al fabricar materiales derivados del petróleo y los costos que implican su reciclado, ofrece a la necesidad de buscar otras alternativas para la elaboración de productos térmicos accesibles. Además, con la creciente concientización sobre políticas ambientales y el cuidado del planeta crece el interés en evaluar opciones sustentables que reduzcan el consumo de energía y disminuyan el impacto ambiental [1].

El desarrollo de la tecnología ha propiciado la aparición de elementos novedosos que cada día crecen para solucionar problemas que surgen cotidianamente. Los fabricantes han sido motores del cambio en distintas áreas de producción y consumo, contando con una variedad de productos basados en materias primas sostenibles que permiten el desarrollo de aislantes térmicos.

Desde esa perspectiva, es importante elegir materias primas renovables disponibles localmente y respetuosas con el medio ambiente. La baja conductividad térmica y las características fibrosas y/o porosas de la mayoría de materiales de aislamiento térmico mejoran significativamente su rendimiento cuando se incorpora a un sistema. Además, tienen una mayor capacidad calorífica específica y sensibilidad a la humedad [3].

En este punto nace la motivación de la investigación, realizando un análisis minucioso de los materiales sedimentarios de Chiapas que ayuden a su selección para cumplir con características térmicas óptimas de las cámaras de combustión. Con el fin de encontrar materiales alternativos sostenibles y métodos de baja tecnología, se realizará esfuerzos para cumplir con los estándares requeridos actualmente. Por lo tanto, las soluciones resultantes pueden ser adaptadas por la industria hacia una sociedad futura sustentable. Además, una vez que aumente el uso de materiales naturales, los costos de producción y consumo se reducirán.

# CAPÍTULO I

## ANTECEDENTES

El consumo energético se encuentra actualmente en estado crítico, particularmente desde el punto de vista ambiental, lo que promueve la búsqueda y desarrollo de materiales con propiedades de aislamiento térmico [4]. Varios estudios se han dedicado a entender el rendimiento térmico de algunos materiales derivados del suelo terrestre, tales como las rocas o sedimentos superficiales. En este caso, los resultados obtenidos dirigen la atención hacia una mejor comprensión del comportamiento en el material a través de sus parámetros de medición.

En este capítulo se presentan los antecedentes de materiales aislantes térmico desarrollados a lo largo de la historia, así como investigaciones internacionales recientes, centrándose en la identificación, caracterización y evaluación de materiales sedimentarios naturales y procesados en la industria que tengan una conductividad térmica baja y su correlación con sus características físicas y químicas.

### 1.1 ORIGEN HISTÓRICO DE LOS MATERIALES AISLANTES TÉRMICOS

Los orígenes de la ciencia del aislamiento térmico han sido difíciles de identificar. El uso de los primeros materiales aislantes fue en la época de la prehistoria, cuando el estilo de vida del hombre era nómada, utilizando las cuevas como medida de protección ante las condiciones climáticas [1].

Los primeros pueblos prehistóricos construyeron viviendas temporales a partir de mismos materiales que usaron para la ropa. Los materiales más comunes eran de origen orgánicos que sirvieron como prototipo natural para aislantes térmicos; entre ellos incluyen pieles de animales,

lana y productos relacionados con plantas como caña, lino o paja, pero su vida útil era limitada. Luego por el estilo de vida sedentaria y el desarrollo de la agricultura necesitaban materiales más duraderos para la vivienda, como la piedra, madera y tierra.

Tanto las casas protegidas por la tierra como las viviendas en cuevas fueron construidas a la par y parece que fueron muy populares debido a sus beneficios inherentes. Su implementación fue barata y la cobertura de la tierra garantizó una excelente debido a la alta densidad de la tierra, provoca que la temperatura interior cambie muy lentamente. Este fenómeno se llama retraso térmico, por el cual mantiene el interior cálido en invierno y fresco en verano. Por ejemplo, las casas en el pueblo neolítico de Skara Brae, Escocia son las más antiguas: casi 5000 años de antigüedad, pero podemos encontrar edificaciones similares en zonas climáticas frías como Escandinavia, Islandia, Rusia, Groenlandia y Alaska [5].

Además, se destaca que las fibras vegetales siempre estuvieron ampliamente disponibles. Por miles de años, los habitantes nativos de las zonas tropicales construyeron refugios de hierba seca o caña. Mientras en los siglos XII y XIII, la paja de trigo de tallo largo se usó particularmente para los techos, y las paredes a menudo estaban construidas de arcilla y paja. Estos materiales naturales proporcionan un excelente nivel de resistencia térmica, por lo que se extendieron de manera rápida especialmente en el norte de Europa y América [5].

Era evidente que la tarea pronto se convirtió en cómo mantener el calor, con el papel del aislamiento térmico se estaba volviendo significativo. Los equipos de calefacción y ventilación mostraron extraordinarios cambios en la década de 1880 y la calibración de ellos se convirtió en necesidad. El cálculo de la pérdida y ganancia de calor en los edificios se volvió en problema clave para la construcción, con las primeras teorías sobre aislamiento térmico y física de edificios apareciendo al mismo tiempo. Entonces las sociedades comenzaron a utilizar aislantes térmico artificiales a partir de materiales naturales, mediante la aplicación de sustancias que suplieran estas carencias; como ejemplo, comenzaron a manipular polímeros naturales: el ámbar, la goma laca y la gutapercha.

A finales del siglo XIX se desarrollaron proyectos para aligerar y mejorar las cualidades de aislamiento térmico de los elementos de albañilería. El primer intento fue el ladrillo de Bischweiler, que era un elemento cerámico formado de dos partes, una inferior hueca llena de cenizas y una sección superior sólida. Lamentablemente, la capacidad de aislamiento no era tan buena como se esperaba, además tenía una resistencia mecánica deficiente [5].

Los primeros intentos fallidos inspiraron a los fabricantes a proponer otras innovaciones, por lo que a principios del siglo XX aparecieron los primeros ladrillos de construcción huecos. Los primeros productos tenían poca resistencia mecánica y cualidades aislantes, pero su calidad mejoró progresivamente y ahora se producen en grandes cantidades. Después se fabricaron ladrillos porosos que fueron horneados junto con polvo de carbón o toba. Estos aditivos que se quemaron en el fuego dejaron pequeños poros en los ladrillos, lo que resultó en mejorar su calidad mecánica y su homogeneidad [5].

Citando lo anterior, se comenzó a estudiar las propiedades térmicas de la materia prima con que los ladrillos fueron fabricados: el suelo. La primera documentación acerca de uso del suelo como fuente de calor ocurre en 1912 en Suiza, pero en ese momento la eficiencia para su aplicación en bombas de calor era pobre y los precios de la energía en esa época eran bajos, por lo que la idea no fue seguida [6]. Entonces, a mediados de la década de 1940 se retomó el estudio del suelo como almacenador de calor, comenzando con el desarrollo de bombas para la calefacción de espacios en una casa de una planta en Reino Unido, donde se han visto resultados significativos en el rendimiento térmico del material [7].

Por otra parte, otros nuevos materiales de aislamiento térmico se introdujeron, siendo algunos de ellos espumas plásticas o derivados de petróleo a partir de la década de 1950, tales como la espuma de poliéster y la espuma de polietileno; posteriormente, la espuma fenólica, la espuma formaldehído y la espuma de melanina surge en la década de 1970 [8].

Con la llegada de la crisis del petróleo en 1973, los materiales aislantes derivados de esta materia prima disminuyeron considerablemente, comenzando a surgir la idea de utilizar materiales menos contaminantes debido a las grandes emisiones de CO<sub>2</sub> causadas por los polímeros. Sin embargo, los materiales aislantes artificiales siguen dominando el 95 % del mercado global, de la cual 40 % son productos derivados del petróleo y el resto, a pesar que tienen como materia prima algunos minerales térreos, su proceso de fabricación es relativamente costoso [5].

A pesar del estado de la situación, se contempla un interés creciente por varios países en el potencial para reducir el consumo de energía primaria y, por lo tanto, reducir la emisión de gases de efecto invernadero y otros contaminantes. Por ejemplo, en 1979 se introdujo un intercambiador de calor de tierra vertical en Europa, observando que las eficiencias generales son altas porque el suelo mantiene una temperatura de fuente relativamente estable, lo que permite que éste funcione cerca de su punto de diseño óptimo. Actualmente, este sistema se utiliza en diversas formas, principalmente en Suecia, Alemania, Suiza y Austria [9].

En la actualidad, las investigaciones se han enfocado en el desarrollo de nuevos materiales aislantes con componentes menos contaminantes al medio ambiente tales como aislantes nano celulares, paneles al vacío y aislantes térmicos transparentes, así como otros derivados de materiales naturales como los paneles de lana en animales o de celulosa vegetal. Asimismo, los métodos de explotación del suelo como fuente de calor para su aplicación en sistemas energéticos que se realizan hoy en día son investigados profundamente, principalmente en Estados Unidos.

## 1.2 ANTECEDENTES DE ESTUDIOS

En cualquier sistema que lo requiera, los materiales térmicos juegan un papel primordial en el ahorro energético. En el caso de sistemas térmicos, como deshidratadores, calentadores solares o cámaras de combustión, el espesor utilizado en las envolventes es cada vez mayor para lograr la mayor resistencia térmica posible, lo que significa problemas económicos y de espacio. La selección de materiales supone una fase primordial en el proceso de creación de sistemas eficientes, siendo uno de los más comunes los materiales procedentes del suelo por su facilidad de manipular sus propiedades que mejore el aislamiento térmico.

Lira – Cortés et al. (2008) presentaron los resultados de la conductividad térmica de muestras en placa de materiales tales como poliestireno, yeso, PVC con relleno de aislante y un bloque de piedra pómez con grava, tendiendo como factores para su selección el tamaño, diámetro y espesor de la muestra. Para la medición se ocupó un Aparato de Placa Caliente con Guarda (APCG), basada sobre la técnica de transferencia de calor por conducción en estado permanente entre dos placas frías y una placa caliente central que tiene la guarda. Los resultados son valores promedio de las corridas mostrados en la Tabla 1.1 [10]:

*Tabla 1.1. Resultados de conductividad térmica para muestras de materiales (Lira – Cortés et al., 2008)*

| Muestra                          | Espesor (mm) | Temperatura (°C) | Conductividad térmica (W/m*K) |
|----------------------------------|--------------|------------------|-------------------------------|
| Poliestireno                     | 23.50        | 22.02            | 0.0326                        |
| Yeso                             | 17.50        | 28.08            | 0.1780                        |
| Policloruro de vinilo (PVC)      | 78.00        | 22.20            | 0.0569                        |
| Bloque de piedra pómez con grava | 100.50       | 29.45            | 0.3980                        |

Gutiérrez y González (2012) analizaron la correlación entre la conductividad térmica y la densidad de algunos materiales naturales y de reciclado con un equipo de geometría cilíndrica. Para su análisis, se ensayaron con la piedra pómez, el aserrín, el cartón corrugado, el papel picado, la paja de cereal de avena, y la cámara de aire. Los valores absolutos encontrados de

conductividad térmica, como aparecen en la Tabla 1.2, resultó proporcional a la densidad del material, con un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0.83 [11].

**Tabla 1.2.** Densidad aparente de los materiales y conductividad térmica (Gutiérrez y González, 2012)

| Material            | Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | Conductividad térmica (W/m <sup>2</sup> *K) |
|---------------------|-------------------------------|---|
| Cartón corrugado    | 47                            | 0.065                                       |
| Paja de avena       | 58                            | 0.091                                       |
| Paja de avena densa | 76                            | 0.079                                       |
| Papel picado        | 127                           | 0.091                                       |
| Papel picado denso  | 165                           | 0.088                                       |
| Aserrín             | 175                           | 0.092                                       |
| Piedra pómez        | 345                           | 0.130                                       |

Por su parte, Alarcón Aguirre et al. (2015) evaluaron elementos de construcción de las zonas andinas del Perú, donde se determinaron valores de la conductividad térmica mediante mediciones indirectas utilizando el instrumento Thermal Conductivity Apparatus en bloques de 12 \* 12 \* 1.8 centímetros, cuyas superficies opuestas están a diferente temperatura de los focos caliente y fría,  $T_c = 87^\circ\text{C}$  y  $T_f = 0^\circ\text{C}$ , respectivamente. Los resultados obtenidos de los materiales, como el adobe, yeso, madera, son de 0.176, 0.149 y 0.274 W/m<sup>2</sup>\*K, respectivamente [12].

Con los resultados de los estudios expuestos previamente, se destaca que los materiales fabricados con rocas provenientes de la corteza terrestre, como el yeso, el adobe y la piedra pómez, tienen valores aceptables para ser considerados aislantes térmicos en usos específicos. Sin embargo, otras investigaciones han profundizado con dichos materiales para verificar la relación entre sus propiedades y cumplir con esa particularidad.

Rawlings y Sykulski (1999) analizaron bibliográficamente las propiedades térmicas del suelo para su aplicación de un sistema de bomba de calor, considerando a la temperatura un parámetro importante, ya que es la diferencia entre esto y la temperatura del fluido que circula en el sistema impulsa la transferencia de calor. Además, consideran que las propiedades de suelo

que más afectan al diseño de un sistema son la conductividad y la difusividad térmica, siendo la arcilla seca y la caliza con los valores más bajos en ambos casos (Tabla 1.3) [7].

**Tabla 1.3.** Propiedades térmicas de rocas (Rawlings y Sykulski, 1999)

| Material   | Conductividad térmica (W/m*K) | Calor específico (KJ/kg* K) | Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | Difusividad térmica (m <sup>2</sup> /día) |
|------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---|
| Granito    | 2.1 – 4.5                     | 0.84                        | 2646                          | 0.078 – 0.18                              |
| Caliza     | 1.4 – 5.2                     | 0.88                        | 2480                          | 0.056 – 0.20                              |
| Mármol     | 2.1 – 5.5                     | 0.80                        | 2560                          | 0.084 – 0.23                              |
| Arenisca   |                               |                             |                               |   |
| • Seca     | 1.4 – 5.2                     | 0.71                        | 2240                          | 0.074 – 0.28                              |
| • Húmeda   | 2.1 – 5.2                     |                             |                               | 0.11 – 0.28                               |
| Arcilla    |                               |                             |                               |   |
| • Húmeda   | 1.4 – 1.7                     | 1.3 – 1.7                   | 1440 - 1920                   | 0.046 – 0.056                             |
| • Saturada | 1.7 – 2.4                     | 1.7 - 1.9                   |                               | 0.056 – 0.074                             |
| Arena      |                               |                             |                               |   |
| • Húmeda   | -----                         | 1.3 – 1.7                   | 1440 - 1920                   | 0.074 – 0.28                              |
| • Saturada | 2.1 – 2.6                     | 1.7 - 1.9                   |                               | 0.11 – 0.28                               |

Cedeño Valdiviezo (2010) muestra los parámetros de densidad y conductividad térmica de algunos materiales utilizados para la construcción a partir de una revisión bibliográfica para la determinación de la eficacia de los elementos constructivos en el control de las condiciones térmicas. En la Tabla 1.4 especifica que el tezontle, la fibra de vidrio y la lana mineral tienen baja conductividad térmica; en cambio el ladrillo, el adobe, la piedra y la tierra seca tienen un valor intermedio que son viables para un uso característico [13].

**Tabla 1.4.** Valores prácticos de la conductividad térmica y densidad (Cedeño Valdiviezo, 2010)

| Material        | Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | Conductividad térmica (W/m* °C) |
|-----------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Piedra natural  | 2700                          | 3.00                            |
| Concreto        | 2300                          | 1.70                            |
| Ladrillo        | 1700                          | 0.60                            |
| Lana mineral    | 50                            | 0.04                            |
| Tezontle        | ----                          | 0.16                            |
| Adobe           | ----                          | 0.50 – 0.70                     |
| Tierra seca     | ----                          | 0.50                            |
| Fibra de vidrio | ----                          | 0.03                            |

Mena – Novelo et al. (2015) realizaron un estudio de la conductividad térmica con relación a otros parámetros, como la temperatura, de algunos materiales rocosos en polvo endémicos de la Península de Yucatán utilizando una cámara adiabática con paredes de poliestireno de diez centímetros de espesor y un foco incandescente con potencia controlada a través de un autotransformador variable. Se descubrió que el yeso era el material con conductividad térmica menor, siendo apropiado para ser utilizado como aislante térmico como lo muestra la Tabla 1.5 [14].

**Tabla 1.5.** Relación de conductividad térmica con flujo de calor en polvos (Mena-Novelo et al., 2015)

| Material             | Conductividad térmica (W/m* °C) | Flujo de calor promedio (W) |
|----------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Arena de mar         | 0.57                            | 8.05                        |
| Polvo de piedra      | 0.85                            | 8.13                        |
| Tierra negra         | 0.57                            | 8.22                        |
| Yeso comercial       | 0.40                            | 8.21                        |
| Cemento maya         | 0.85                            | 8.20                        |
| Cerámica comercial   | 0.59                            | 8.22                        |
| Polvo de piedra fino | 0.84                            | 8.22                        |
| Tierra roja          | 0.58                            | 8.20                        |

Cabe destacar que, con base a los estudios experimentales, se aprecia que la conductividad térmica de un aislante térmico fabricado con material producto de la corteza terrestre está definida por las propiedades físico – químicas, debido a que su composición mineralógica y sus características petrográficas, así como las variaciones de la presión y temperatura relacionadas con el material, afectan significativamente las características térmicas.

En una investigación realizado por Bhattacharjee et al. (2004) se estudió la influencia de la porosidad y su naturaleza en la conductividad térmica en condiciones secas y húmedas de materiales de construcción. Las muestras fueron bloques fabricados in situ y analizadas con el método de alambre caliente transitorio de fuente lineal. Los resultados en ambas condiciones son expresados en rangos, como lo señala la Tabla 1.6; interpretando que la conductividad térmica es inversamente proporcional a la porosidad del material [15].

**Tabla 1.6.** Rangos de porosidad y conductividad térmica en los materiales (Bhattacharjee et al., 2004)

| Material             | Conductividad térmica (W/m* K) |                 | Rango de porosidad (%) |
|----------------------|--------------------------------|-----------------|------------------------|
|                      | Estado seco                    | Estado saturado |                        |
| Concreto             | 1.43 – 3.08                    | 2.00 – 4.14     | 19.2 – 30.4            |
| Ladrillo refractario | 0.98 – 1.48                    | 1.40 – 2.48     | 24.9 – 33.3            |
| Ladrillo de arcilla  | 0.41 – 0.84                    | 1.54 – 1.99     | 30.1 – 45.7            |
| Concreto celular     | 0.094 – 0.27                   | 0.68 – 1.04     | 38.9 – 85.9            |

Dondi et al. (2004) abordaron un estudio enfocado a esos materiales, midiendo la conductividad térmica en 29 muestras de ladrillos elaborados con arcilla y correlacionando el rendimiento con las características de composición química, física y micro estructural de las partículas que lo contenían. Este estudio trajo la atención debido a que sus resultados promovieron a un entendimiento en los parámetros que intervienen, es decir, los componentes mineralógicos, distribución del tamaño de poro y densidad aparente, para mejorar las propiedades aislantes de los ladrillos. Sin embargo, estos parámetros por sí solo no son capaces de describir y comprender con precisión el comportamiento térmico de los ladrillos de arcilla. Se

obtuvieron valores de entre 0.39 y 0.63 W/m\*K con un rango de tamaño de poro de entre 0.01 – 100  $\mu\text{m}$  [16].

Gualtieri et al. (2010) aplicaron esa misma idea mediante el estudio e identificación de propiedades físicas, químicas y mineralógicas en ladrillos de arcillas italianas comerciales representativas mediante la técnica por difracción de rayos X en polvo, granulometría láser, fluorescencia de rayos X, espectroscopia y calcimetría. Los resultados indicaron que el efecto de formación de poros del material orgánico y la distribución del tamaño de grano influyeron significativamente en la conductividad térmica efectiva, debido a que este último aumentaba si el tamaño de las partículas decrecían, posiblemente debido a una velocidad de sinterización o un empaquetamiento de partículas mejorado en la estructuración durante su cocción [4].

Laaroussi et al. (2014) elaboraron una medición de propiedades térmicas de ladrillos hechos a base de mezclas de arcillas en una fábrica de Marruecos, destacando que sus propiedades térmicas están influenciadas por el contenido químico y mineral de las materias primas. Los experimentos fueron realizados en dos muestras utilizando el método de placa caliente (HPS) en estado estacionario, obteniendo parámetros como la conductividad térmica de 0.350 W/m\*K y capacidad térmica volumétrica de  $1.458 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$  [17]:

Diana Portillo et al. (2018) hicieron un estudio del suelo en la Ciudad de México a distintas profundidades con el método transitorio de la aguja térmica. Se encontraron valores de conductividad térmica relativamente baja, con valores promedios de entre 0.7265 y 0.7852 W/m\*°C y sin relación proporcional con la profundidad de las muestras recolectadas [18].

Bajo los argumentos citados se han progresado con obtener la cualidad de aislante térmico en las piezas creadas con materiales de la corteza terrestre a partir de técnicas y nuevos agregados que optimicen las características deseadas. Al-Rim et al. (1999) introdujeron polvo de madera para conocer la influencia en el desempeño térmico y mecánico de un compuesto de arcilla – cemento, demostrando que la adición del primero a éste mejora sus características de

aislamiento térmico, pero reduce su resistencia mecánica e incrementa su deformación debido al aumento en la porosidad impartida por la madera [19].

Por su parte, Sutcu et al. (2012) investigaron las propiedades físicas y térmicas en piezas hechas con dos arcillas, residuos de papel reciclado y aserrín. Se comprobó que el porcentaje de porosidad estaba relacionada inversamente con la densidad aparente, resistencia mecánica y conductividad térmica, ya que este último disminuía de 0.25 a 0.13 W/m\*K con 30 % de aserrín en la masa de la pieza a una temperatura estable de 1100° C, suficiente para producir una cerámica porosa con presencia de álcalis [20].

Siguiendo el estudio, Muñoz et al. (2014) estudiaron ladrillos de arcilla hechos con orujos de desecho de vino como aditivo, limitado la cantidad máxima de 5 % de acuerdo con la normativa ASTM para empleo en construcción. Los resultados arrojaron que se consiguió un mejor aislamiento sin perder su capacidad mecánica, obteniendo una conductividad de 0.63 W/m\*K, es decir, una reducción en un 10 % motivado por la obtención de poros en el material [21].

En cambio, Rahman et al. (2015) analizaron algunas cualidades en ladrillos refractarios de arcilla con polvo de carbón de petróleo como agregado, demostrando que la resistencia a compresión y la conductividad térmica disminuyen a medida que el porcentaje de porosidad aumenta al elevar la cantidad de carbón [22].

Ibrahim et al. (2018) observaron las propiedades físicas y térmicas de ladrillos refractarios de arcilla caolín con adición de magnesita en una proporción de hasta 20 % en su masa a diferentes temperaturas, obteniendo una gran disminución de la conductividad térmica en un rango de hasta 0.15 W/m\*K con una temperatura de cocción óptima de 1300 °C [23]. Finalmente, Hassan et al. (2018) prepararon ladrillos refractarios aislantes mezclando caolín y grog con perlas de poliestireno (PS) y bagazo de caña de azúcar, concluyendo que a 1 % y 3 % de su masa, respectivamente, cumplían la condición de refractario con una conductividad térmica de 0.37 W/m\*K a 800 °C [24].

# CAPÍTULO II

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

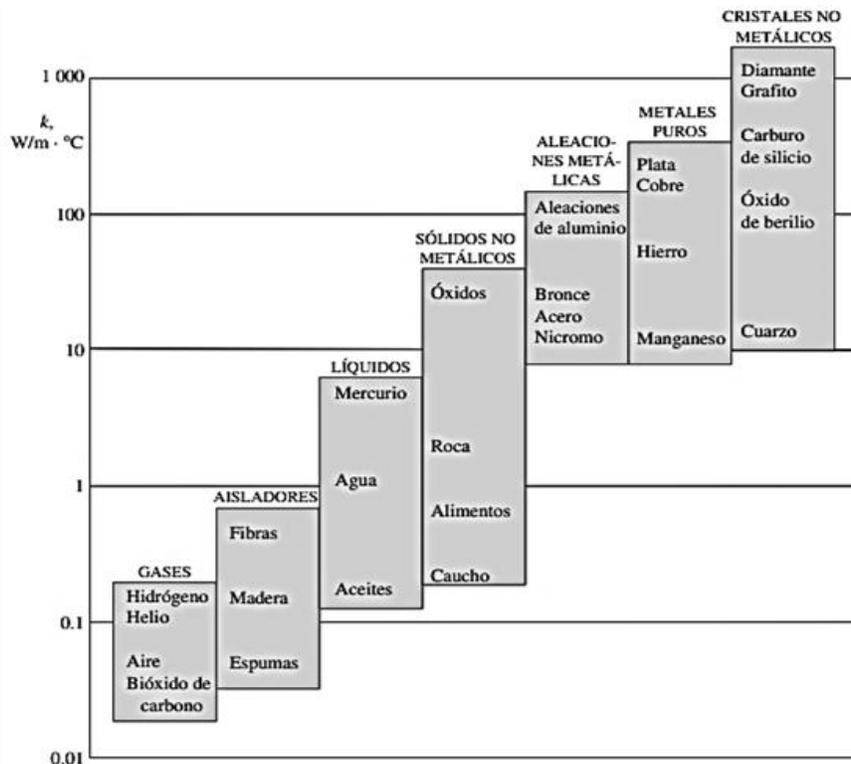
El almacenamiento térmico es de gran interés en las últimas décadas mediante la búsqueda y fabricación de materiales, con la finalidad de mantener constante la temperatura en el cambio de fase mientras intercambia energía. Sin embargo, el mayor problema ante este hecho es la gran cantidad de masa o de volumen que se necesita y las pérdidas energéticas que se producen, vinculadas a la variación de temperatura de la masa acumuladora. Su uso está asociado en el área de energías renovables para ajustar los periodos de suministro a los de demanda [25].

En el capítulo se presentan las bases teóricas y las características relacionados con los materiales aislantes térmicos. Primero se conceptualiza la definición y el conocimiento de su clasificación de acuerdo a su origen y estructura. Luego, menciona el origen y uso del suelo como materia prima para el estudio y su posible entendimiento. Después se ofrece una descripción del proceso de tratamiento en el material para el mejoramiento de sus propiedades. Enseguida se presentan conceptos básicos relacionados con la determinación de las propiedades térmicas, físicas y químicas en los materiales aislantes térmico. Además, se describe a una cámara de combustión con la finalidad de conocer los elementos empleados en su diseño y de esa manera ver si se puede emplear los materiales analizados en su implementación

### 2.1 DEFINICIÓN DE LOS MATERIALES TÉRMICOS

Los materiales térmicos se definen como aquellos que presentan una elevada resistencia a la transferencia de calor, reduciéndose en su cara opuesta. El objetivo de estos materiales es obtener una eficiencia energética, con lo que se reducirá la demanda de energía sin renunciar al uso adecuado que los usuarios dispongan [26].

Los materiales térmicos se pueden determinar mediante su conductividad térmica  $\lambda$  ( $W/m^*K$ ) y el factor de resistencia a la difusión del vapor de agua; asimismo, se puede definir la densidad ( $kg/m^3$ ) y el calor específico ( $J/kg^*K$ ). Se considera un aislante térmico a cualquier material que tiene una conductividad térmica menor a  $1 W/m^*K$  [27]. Los materiales con mejores propiedades de aislamiento suelen ser los gases y los de mayor conductividad térmica son los metales, como se aprecia en la Figura 2.1.



**Figura 2.1.** Escala de conductividad térmica para diversos materiales a temperatura ambiente

FUENTE: [28]

Es necesario hablar del calor cuando se está desarrollando el concepto de aislamiento térmico. La capacidad de un material para acumular calor se puede medir de dos maneras, por su calor específico y por su capacidad calorífica; de esta manera se desplace de las zonas más calientes a las más frías para buscar el equilibrio. Este puede suceder mediante la transferencia por conducción, por convección o por radiación, o por una combinación de los tres modos. A continuación, se procede a explicar cada concepto [29] [30]:

- **Conducción:** Es la transmisión de energía calorífica entre partículas a través de un material. Para que el calor se transmita por conducción, tendrá que haber contacto físico entre partículas y cierta diferencia de temperatura. De esta forma, la conductividad térmica es el tamaño de la rapidez a la que el flujo de calor pasa de una partícula a otra. La tasa de flujo de calor por medio de un material específico va a estar definida por la diferencia de temperatura y la conductividad térmica del material.
- **Convección:** Es la transmisión de calor debida al movimiento de un gas o un líquido calentado de un lugar a otro, llevando consigo el calor que contiene. La tasa de flujo de calor varía en función de la temperatura de la materia en movimiento y de su caudal. Este mecanismo puede ser forzada cuando está influida por el movimiento de las superficies en contacto con el fluido.
- **Radiación:** La energía calorífica se transmite en forma de luz, como radiación infrarroja u otro tipo de ondas electromagnéticas. Esta energía proviene de un cuerpo caliente y sólo puede transmitirse libremente a través de medios completamente transparentes. emiten una gran cantidad de calor radiante, que se absorbe cuando incide en la superficie.

Cabe destacar que el aislamiento térmico contribuye a la eficiencia energética, ofreciendo las siguientes ventajas [29]:

- Mejorar el rendimiento de las instalaciones térmicas, ya que el aislamiento evita las pérdidas energéticas en las redes de distribución haciendo que mejore el rendimiento de los equipos con el consiguiente ahorro.
- Disminuir las emisiones de gases con efecto invernadero (principalmente CO<sub>2</sub>), las calderas de gas, derivados del petróleo o carbón emiten gases en su combustión.

## 2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES TÉRMICOS

En la actualidad existen una variedad de materiales de aislamiento térmico utilizados en diversas áreas de ingeniería principalmente en arquitectura, ingeniería civil, equipos de edificación, instalaciones industriales y en sistemas térmicos – solares. Las pérdidas de calor pueden reducirse con la ayuda del aislamiento térmico y de esta manera, buscar la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el mismo [5].

Los materiales térmicos presentan diferentes propiedades físicas, químicas y biológicas que dependen de su origen y estructura, dividiéndose en tres familias: Los orgánicos, los inorgánicos y la combinación de ambos (**Tabla 2.1**) [31]. Dentro de los orgánicos se encuentran los derivados del petróleo llamados orgánicos sintéticos y los derivados de plantas o animales llamados orgánicos naturales. Además, los materiales térmicos pueden presentar estructuras fibrosas, celulares o granulares, que determinará sus propiedades físicas y térmicas [26].

**Tabla 2.1.** Clasificación de los materiales de aislamiento respecto a su composición

| Origen                    | Fibra  | Espuma   | Granular   |
|---------------------------|--|--|--|
| <b>Inorgánico</b>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lana de vidrio</li> <li>• Lana de roca</li> </ul>                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Espuma de vidrio</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Perlita expandida</li> <li>• Vermiculita expandida</li> </ul> |
| <b>Orgánico Sintético</b> | -----  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Poliuretano expandido</li> <li>• Poliuretano extruido</li> <li>• Espuma de poliuretano</li> </ul> | -----  |
| <b>Orgánico Natural</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Celulosa</li> <li>• Lana de oveja</li> <li>• Lana de algodón</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Corcho</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Corcho granular</li> </ul>                                    |
| <b>Combinaciones</b>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lana de madera</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Espuma de yeso</li> <li>• Calcio siliconado</li> </ul>  | -----  |

Cabe mencionar que las posibilidades en los aislantes térmicos son variadas, por lo que será conveniente conocer las propiedades del material para hacer un uso adecuado en función de las necesidades que la investigación requiera.

## 2.3 LAS ROCAS Y SU CLASIFICACIÓN

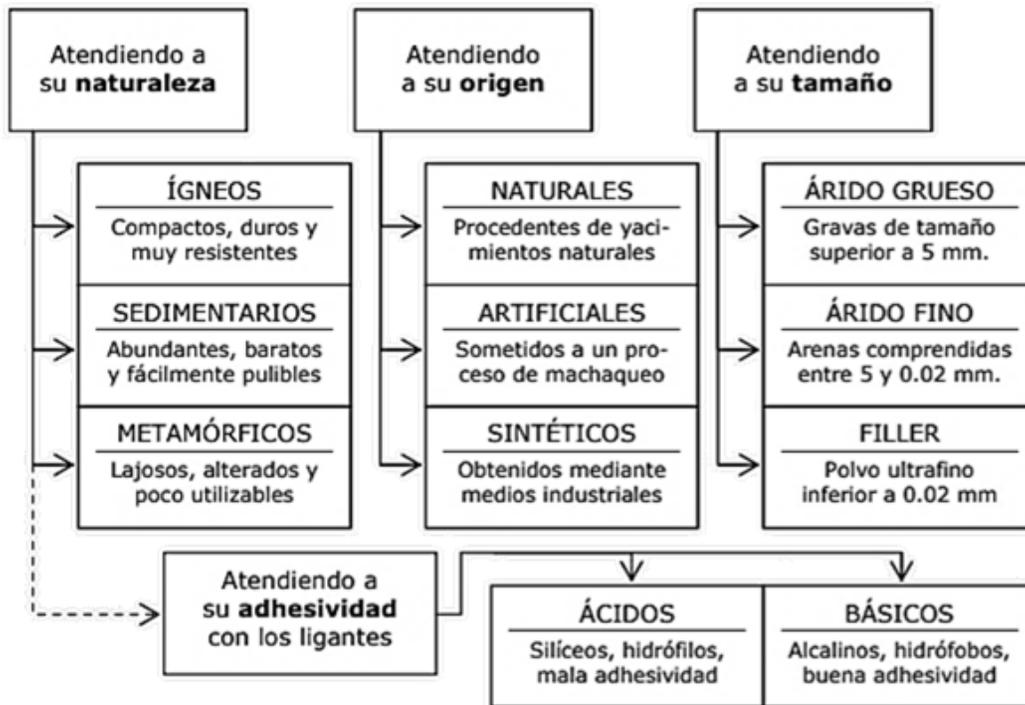
Las rocas son agregados de minerales formados por procesos naturales y abundantes en la corteza terrestre, en la que sus condiciones de explotación son favorables debido a que se extrae en minas abiertas y las propiedades que las caracterizan se mantienen a largo plazo [32].

El proceso de extracción y manipulación mencionado previamente genera los materiales pétreos, definidos como un conjunto de partículas minerales de distintos tamaños y formas, que proceden de la fragmentación de las rocas. Aunque suelen considerarse como partículas discretas y de naturaleza inerte, hay que tener en cuenta que estos materiales pueden reaccionar en contacto con el agua y sus productos en disolución [33].

Los diferentes tipos de rocas se establecen en función de tres cualidades que se conocen como *características petrográficas*: los componentes minerales (mineralogía), modo de agregación (textura) y relación de vacíos (porosidad), dando lugar al aspecto distintivo que muestran las rocas en los procesos ocurridos de su formación geológica. Por esa razón, es necesario realizar un estudio de la caracterización en rocas con la finalidad de conocer su naturaleza y obtener una aproximación de su durabilidad, constitución y organización de los elementos que éstas conformen [32].

Dichas rocas están formadas de un agregado poliminérico de forma que, entre sus constituyentes cristalinos, existen una serie de características que condicionan el componente petrográfico esencial de una roca, definidas en su aspecto externo o su comportamiento, como condición de los cambios que ha sufrido por la exposición en el ambiente [34].

Bajo esta circunstancia se establecen diferentes criterios de clasificación atendiendo a distintos aspectos, como son su composición, su procedencia o el tamaño de sus partículas, mostradas en la Figura 2.2.



**Figura 2.2.** Criterios de clasificación de las rocas

FUENTE: [33]

Cabe destacar que la idoneidad de una roca depende de factores relacionados con sus características intrínsecas, aunque pueden influir otros aspectos como su fabricación y transporte. Una clasificación se basa en la naturaleza de la roca que se meteorizan por la acción de los agentes atmosféricos, dividiendo en tres grupos: *rocas ígneas*, *metamórficas* y *sedimentarias* [35].

- **Rocas ígneas:** Son rocas generadas por el enfriamiento de una masa líquida de composición silícea que procede del interior de la Tierra. Cuando se enfría durante su ascenso hacia la superficie de la Tierra, en zonas cercanas a la superficie se originan las rocas plutónicas; en cambio, cuando se solidifica sobre la superficie se forman las rocas volcánicas.
- **Rocas metamórficas:** Estas se generan a partir de rocas preexistentes que, como consecuencia de sufrir un aumento importante de temperatura y de presión por procesos geológicos, sufren reajustes que ocasiona cambios en sus minerales y composición

química. La mayoría de ella se caracterizan por un aplastamiento general de sus minerales que hace que aparezcan orientados de forma plana dando lugar a una laminación de la roca.

- **Rocas sedimentarias:** Son rocas originadas por el transporte y deposición de materiales como consecuencia de la acción del viento, el agua, el hielo o depositadas químicamente a partir de un fluido acuoso.

La variabilidad de las rocas es grande, siendo las características petrográficas como las condiciones de sus propiedades que influyen en su comportamiento y calidad, mostrado en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2.** Características petrográficas relacionadas con la calidad de la roca

| Macroscópicas  | Composición  | Microscópicas  |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aspecto general</li> <li>• Color</li> <li>• Compacidad</li> <li>• Coherencia</li> <li>• Orientación</li> <li>• Homogeneidad</li> <li>• Estructuras</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Granos / Cristales</li> <li>• Fase de unión</li> <li>• Composición química</li> <li>• Mineralogía</li> <li>• Espacios vacíos (poros)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de textura</li> <li>• Tamaño de grano / cristal</li> <li>• Forma de grano / cristal</li> <li>• Orientación y distribución</li> <li>• Discontinuidades</li> <li>• Tamaño y forma de vacíos</li> <li>• Alteración</li> </ul> |

Para el desarrollo de la investigación, resulta práctico clasificar a las rocas sedimentarias que aborden una composición mineralógica y estructura similar, donde su selección deberá basarse en sus características físicas y químicas, su extracción o su durabilidad. Al reducir la conductividad térmica, se necesitará menos aislante para una determinada capacidad de conservación de calor y se dispondrá de un mayor volumen útil [26].

## 2.4 ESTUDIO DE LOS MATERIALES CERÁMICOS

Las cerámicas son compuestos químicos constituidos por metales y no metales, como los óxidos, nitruros y carburos, que incluyen minerales como las arenas, arcillas, cemento y el vidrio [36]. Estos poseen la característica de aislantes térmicos y eléctricos, además que a elevadas temperaturas o en ambientes agresivos, son más resistentes que los metales [37].

Los materiales cerámicos son de naturaleza dura y a la vez quebradiza debido a que la unión molecular es mixta, teniendo características iónicas y covalentes. Además, la mayoría tienen estructuras cristalinas por lo que son de mayor facilidad en su procesamiento para obtener partículas finas llamadas polvos. Estos materiales poseen propiedades específicas que coinciden con las expectativas que lo constituyen [38, 39]

- **Fragilidad:** La razón que la mayoría de las cerámicas son frágiles a tensión es por su unión mixta iónico – covalente que mantienen unidos los átomos constituyentes. En altas temperaturas, tiene un comportamiento de líquido viscoso.
- **Conductividad eléctrica y térmica baja:** Los electrones de valencia están atados en enlaces y no son libres como son en los metales. De esa forma, los cerámicos cuentan con propiedades semiconductoras que tienen muchas aplicaciones importantes en la industria.
- **Fuerza de compresión:** Las cerámicas son más fuertes en compresión que en tensión. Además, debido a que estos materiales tienden a ser porosos, las imperfecciones microscópicas actúan como concentradores de tensión, disminuyendo aún más la tenacidad y reduciendo la resistencia a tensión.

- **Insensibilidad química:** Una gran cantidad de cerámica es estable en ambientes químicos y térmicos agresivos. Esto es explicado en base a la baja energía libre que presentan los cerámicos comparada con la de las estructuras metálicas.

La alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y la sílice ( $\text{SiO}_2$ ) son compuestos químicos de mayor aplicación en una gama de tecnologías relacionadas con la electrónica, el magnetismo, la óptica y la energía, debido a que son más abundantes en la corteza terrestre; por ejemplo, se han fabricado bujías, dieléctrico para capacitores o sensores. Además, se han desempeñado en funcionar como refractarios para el procesamiento de metales y aplicaciones de consumo [40].

#### 2.4.1 PRODUCTOS DE ARCILLAS

Según la nomenclatura de la Asociación Internacional para el Estudio de Arcillas (AIPEA) y de Clay Minerals Society (CMS), la arcilla es un material natural con una constitución de minerales de grano fino, que se comporta plásticamente con el agua y que endurece con el secado u horneado. En ocasiones, este material es definidos por una fracción fina o sedimentaria del suelo que se encuentra en una serie de minerales cristalinos con estructura laminar en los filosilicatos [41].

Los productos de arcilla forman un grupo de cerámicas cristalinas tradicionales que desempeña dos papeles fundamentales:

- Cuando se añade agua, forma un aglutinante con una propiedad denominada *hidroplasticidad*, siendo importante en la creación de piezas con suficiente resistencia durante el proceso de conformado y transporte [36].
- Esta clase de materiales son resistentes a elevadas temperaturas, apropiadas para diversas aplicaciones tales como material refractario en recubrimientos para hornos, aislantes térmicos y acústicos, colectores de polvos y membranas para filtros [42].

En el proceso de secado se elimina el exceso de humedad y ocurren grandes cambios dimensionales. Inicialmente, el agua existente entre las partículas de arcilla se evapora y produce la mayor parte de la contracción, debido a que la distancia entre ellas disminuye, obteniendo un *cuerpo verde*. Posteriormente, se funde en un amplio intervalo de temperaturas hasta conseguir una cerámica densa y fuerte sin fusión completa, soportando temperaturas altas de hasta 1400 °C; sin embargo, en mezclas de arcillas con alta pureza de alúmina o sílice ha llegado a alcanzar hasta 1587 °C [36]. En la Figura 2.3 se muestra un diagrama de flujo del proceso de elaboración para piezas de arcilla.



**Figura 2.3.** Proceso de fabricación de cerámicos de arcillas

FUENTE: [43]

## 2.4.2 PROCESO DE TRATAMIENTO

Para los materiales sedimentarios en el estudio, se propone realizar un tratamiento a su condición física para alcanzar el objetivo deseado. La intención es que, al someterse a tratamientos térmicos, se formen estructuras resistentes a la corrosión con aplicaciones relevantes a nivel doméstico e industrial. De esta manera las propiedades que más llaman la atención en estos campos para las cerámicas están la estabilidad química, la resistencia, la dureza, la porosidad y la absorción, entre otras [44].

Una de las opciones que se pretende es la obtención de piezas de material con características porosas, debido a que tienen grandes aplicaciones tecnológicas como colectores de partículas sólidas, aislantes térmicos y acústicos, e inclusive en catalizadores. Adicionalmente, las estructuras porosas cerámicas han desplazado a las metálicas en la aplicación de quemadores, ya que poseen mejor resistencia al operar a altas temperaturas y por tiempos prolongados, manteniendo la integridad de la misma sin presentar fracturas o degradación [45].

Cabe destacar que estas piezas cuentan con una alta eficiencia en la transferencia de calor por radiación en el momento de atrapar la llama que se genera en la superficie. Por esta razón y también por ventajas económicas y operacionales, sectores de la industria han acoplado este sistema a sus procesos [46].

Para elaborar las piezas se utilizan las muestras extraídas de los bancos de materiales existentes. El método a realizar es denominado como técnica de moldeo, y se destaca por seguir el siguiente procedimiento [47]:

- Se realiza la barbotina, una suspensión cerámica que consiste en diluir el barro en agua pura, normalmente con la adición de aglomerados con la finalidad de hacerla más fluida.
- Después, se vierte en moldes fabricados de un material que absorbe la humedad, quedando adherido a las paredes del molde hasta formarse el espesor deseado.
- Luego, se realiza un tratamiento térmico a temperatura ambiente en un lapso de 15 a 20 días.
- Finalmente, se sinteriza la pieza para la consolidación de la estructura.

## **2.5 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES**

Los materiales térmicos están definidos por parámetros que los hacen ser únicos. Analizar sus características comunes, así como las propiedades que los establecen como singulares dentro del conjunto de los aislantes térmicos, se aproxima al entendimiento de la investigación. Cada parámetro debe aparecer en las especificaciones de los productos y quedar recopiladas en la información suministrada por el fabricante en formato de etiquetas para su adecuada aplicación [29].

Las propiedades térmicas de los aislantes térmicos y de otros materiales comunes pueden medirse con precisión; por ejemplo, calcular la cantidad de calor transmitido a través de una pared realizada con ladrillos o una combinación con otro material [30]. No obstante, para conocerlo es necesario saber términos técnicos determinados y comprender tanto éstos como los factores que influyen en el material, como su composición, la naturaleza de enlace, la estructura cristalina y los defectos que presentan [40].

Hay que destacar que el conocimiento de las propiedades físicas y químicas del material permite realizar materiales que beneficien a la industria según las necesidades de operación.

### **2.5.1 PROPIEDADES FÍSICAS BÁSICAS Y TÉRMICAS**

Las propiedades físicas que se deben considerar al seleccionar un aislante térmico es la conductividad térmica efectiva, pero la densidad, el límite superior de la temperatura, la degradación, la rigidez estructural y el costo también son factores importantes. Para su obtención, se recurre a manuales que dictan el proceso de muestreo en el material [48].

La Secretaría de Energía de México dicta normas de ahorro y eficiencia de energía a través de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), que son de carácter obligatorio relacionado con la

eficiencia de energía. Para la determinación de las propiedades físicas de los materiales se requieren de las NOM-008-2001, NOM-018-1997 y NOM-020-2008, que son presentadas a continuación:

#### ❖ Conductividad térmica

Mills (1999) menciona que la conductividad térmica es un parámetro utilizado para diseñar, predecir o proponer dispositivos y metodologías en un mejor uso de la energía consumida, donde su valor depende de muchos factores, sobre todo de las propiedades físicas del material [49]. Para un sólido, esta magnitud se define como la *razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área y por unidad de diferencia de temperatura* [28]. La conductividad térmica puede expresarse en  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  o  $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ .

Una manera común de determinar el valor de este parámetro es a través de la Ley de Fourier para la conducción del calor, donde implica a un material en geometría de placa plana que se le hace pasar un flujo de calor en proporción al gradiente de temperatura en cualquier dirección. Está planteada por la Ecuación 2.1 [49]:

$$Q = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde **Q** es el flujo de calor que atraviesa la pared, **A** es el área transversal al flujo de calor,  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre las paredes del material y  $\Delta x$  es el espesor de la pared del material por el cual atraviesa el flujo de calor. Para determinar el valor de la conductividad térmica **k** de un material, es necesario controlar las variables de la ecuación anterior. La cantidad de calor transferido está controlada por la cantidad de energía técnica presente, la naturaleza del flujo de calor en el material y el calor disipado a través de los medios de conducción [39].

En el caso de los materiales cerámicos, el medio principal de transporte de calor son los fotones y la radiación, donde se llegan a tener vibraciones simples en la red cristalina; por ende, la conductividad térmica depende del nivel de porosidad. De esta forma, la conductividad térmica es una propiedad importante que sirve para determinar si un material se puede utilizar en cierta aplicación. Por ejemplo, las bajas conductividades térmicas y alta estabilidad térmica son requeridas en la construcción de hornos utilizados en la producción de muchos materiales indispensables para la vida moderna, tales como el cemento, el acero, el vidrio o el procesamiento de componentes electrónicos, entre otros [40].

Cada material que se encuentran en una variedad de formas, típicamente suelto, bloque y rígido, tiene un valor de conductividad térmica específico que permite determinar su eficacia como aislante del calor [49].

#### ❖ Otras propiedades térmicas

- **Resistencia térmica ( $\lambda$ ):** Es la capacidad que ejerce un material determinado al oponerse flujo de calor. Un buen material aislante tendrá una resistencia térmica alta. En el caso de materiales homogéneos, es la razón entre el espesor  $\Delta x$  y la conductividad térmica  $k$  (Ecuación 2.2) [30].

$$\lambda = \frac{\Delta x}{k}$$

Ecuación 2.2

- **Capacidad calorífica ( $C_p$ ):** Es la energía requerida para elevar la temperatura de un material y se reporta en unidades de  $J/kg \cdot ^\circ C$ . La capacidad calorífica de un material cerámico se incrementa con la temperatura hasta alrededor de los  $1000 \text{ } ^\circ C$ , después de esta temperatura ocurren incrementos pequeños de esta magnitud [39].

- **Difusividad térmica ( $\alpha$ ):** Se concibe como la razón entre el calor conducido a través del material y el calor almacenado por unidad de volumen. En el caso de un material que tiene una alta conductividad térmica o una baja capacidad calorífica tiene una gran difusividad térmica. La Ecuación 2.3 relaciona este parámetro con la conductividad térmica  $k$ , el calor específico  $c_p$  y la densidad  $\rho$ , expresado en unidades  $m^2/s$  [28].

$$\alpha = \frac{k}{\rho * c_p}$$

Ecuación 2.3

## ❖ Densidad

La densidad es una medida de la masa de material que existe por unidad de volumen y se reporta en unidades de kilogramo por metro cúbico ( $kg/m^3$ ). Esta magnitud física se puede interpretar de varias maneras, así es de que se debe dar una mayor descripción del mismo para asegurar que dicha interpretación sea la adecuada, por lo que se analiza tres tipos [39].

- **Densidad real o cristalográfica:** Es la densidad ideal que podría ser calculada a partir de la composición en una red cristalina libre de defectos.
- **Densidad teórica o mineral:** Es similar que la densidad cristalográfica. pero tomando en consideración las soluciones sólidas y las fases múltiples.
- **Densidad total o aparente:** Es la densidad medida en un cuerpo, que incluye todos los defectos de la red, fases presentes y porosidad debida al proceso de fabricación.

La densidad está determinada por el tamaño, el peso de los elementos y por el empaquetamiento de la estructura. Un material con baja densidad, significa que existe una mayor concentración de poros u oquedades, lo que los hace ser ligeros. En estos poros el calor se

conduce por convección y radiación, provocando que la conductividad térmica del material sea efectiva [39].

Cabe resaltar que la densidad de un material varía por los cambios de temperatura y la presión. Por ejemplo, cuando aumenta la presión, la densidad de cualquier material estable incrementa; sin embargo, al elevar la temperatura, la densidad disminuye. Además, la variación de la densidad en líquidos y sólidos por esos cambios es muy pequeña debido al coeficiente de compresibilidad y de dilatación térmica en estas sustancias [50].

#### ❖ **Absorción**

Si bien para la mayoría de los sedimentos es habitual conocer sus propiedades térmicas, tradicionalmente la caracterización de su comportamiento frente a la humedad ha sido menos investigada [51]. Las razones son por la diferencia en el desarrollo de una teoría matemática que formula el flujo de calor con relación a una función analítica del flujo de humedad en medios porosos, a la naturaleza de dicho flujo a través de los materiales, y a la dificultad de establecer métodos y técnicas de ensayo que permitan cuantificar los coeficientes de transporte difusivo y capilar de la humedad a través de su estructura porosa [52].

Los materiales térmicos tienen diferente capacidad de almacenamiento de humedad que está en función del tiempo, la temperatura y las propiedades del material. Si el agua penetra en dicho material, causaría daños físicos y afectará negativamente su rendimiento al aumentar su conductividad térmica [53]. La absorción de humedad se expresa por la cantidad de agua presente en un sólido y se representa en términos de masa en condición seca y saturada [54]:

- **Absorción en condición saturada:** Es el cociente entre la masa del líquido y masa total del material en condición saturada (Ecuación 2.4).

$$\% A_W = \frac{m_s}{m_T} * 100 \quad \text{Ecuación 2.4}$$

- **Absorción en condición seca:** Es el cociente entre la masa del líquido y la masa seca del material (Ecuación 2.5).

$$\% A_D = \frac{m_s}{m_D} * 100 \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Donde %A<sub>W</sub> es el porcentaje de líquido en condición saturada, %A<sub>D</sub> es el porcentaje de líquido en condición seca, m<sub>s</sub> es la masa del líquido, m<sub>T</sub> es la masa total, y m<sub>D</sub> es la masa seca. Es importante conocer esta propiedad en los materiales empleados, ya que las bases de datos actuales ofrecen valores genéricos que discrepan con el comportamiento real del material en cuestión frente a la humedad [51].

#### ❖ Porosidad

Los poros representan el defecto de mayor importancia presente en los materiales cerámicos debido a que afectan sus propiedades. Por ende, su presencia puede resultar útil para incrementar la resistencia al impacto térmico [40]. Esta característica física se define como el volumen de los espacios vacíos (V<sub>V</sub>) por unidad de volumen total (V<sub>T</sub>), y se expresa en porcentaje con la Ecuación 2.6 [55]:

$$P (\%) = \frac{V_V}{V_T} * 100 \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Se especifica que los valores reales de porosidad pueden oscilar entre 15 y 95 % de su volumen [56]. Los materiales contienen frecuentemente porosidad que cubren un rango, desde la porosidad interconectada hasta cerrada, estableciendo dos criterios [40] [55]:

- **La porosidad abierta o aparente ( $P_a$ ):** Se define como el volumen de poros abiertos o comunicados entre sí y con el exterior por unidad de volumen total. Esta se determina mediante técnicas experimentales, basadas en introducir un fluido en los poros y calcular su volumen. El procedimiento más común es el ensayo hidrostático, aplicando la Ecuación 2.7:

$$P_a = \frac{W_w - W_D}{W_w - W_S} * 100 \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Donde  $W_D$  es el peso del material cerámico seco,  $W_S$  es el peso del material suspendido en el líquido y  $W_w$  es el peso retirado de dicha suspensión.

- **La porosidad total o verdadera ( $P_t$ ):** Se determina como el volumen total de vacíos por unidad de volumen total de roca. En este caso deben contabilizarse todos los espacios vacíos presentes: interconectados y cerrados. Su valor no puede obtenerse de forma experimental, ya que incluye entre los espacios vacíos los no comunicados con el exterior, por lo que su determinación se realiza de forma indirecta a partir del valor de ambas densidades mediante la siguiente relación:

$$P_T = \frac{\rho - B}{\rho} * 100 \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Donde:

$$B = \frac{W_D}{W_w - W_S} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

**B** es la densidad volumétrica y  $\rho$  es el peso específico retirado del material cerámico

A pesar de observaciones sobre la porosidad y sus efectos en las propiedades y comportamiento de las piezas, no parece haber una definición básica que permita predeterminar el rango porosidad en función de las características del material alcanzable, ni qué tipos de parámetros de porosidad son necesarios para determinar el comportamiento de los cuerpos [57].

## 2.5.2 PROPIEDADES QUÍMICAS Y MINERALÓGICAS

Los materiales son reconocidos por ciertas propiedades químicas que presentan, como son los elementos que están conformados y cómo reaccionan con determinados reactivos. Cabe destacar que las cerámicas se constituyen por minerales arcillosos, acompañados por materia orgánica [58].

En esta clase de materiales, después de moldeado y secado, se somete a un proceso de secado donde parte de estos minerales sufren una serie de transformaciones de reestructuración molecular, así como pérdida de agua que dan lugar al desarrollo de cambios tales como la destrucción de la estructura cristalina y formación de nuevas fases cristalinas, hasta la aparición de una fase vítrea [59]. Pero si en el proceso no se somete a algún tratamiento con agregados químicos, mantiene un mismo comportamiento que un sedimento debido a que sus componentes no sufren ningún cambio en su composición [60].

Para identificar y determinar la composición relativa de los cerámicos, será estudiado a través de la química analítica cuantitativa y cualitativa a través de métodos instrumentales descritos a continuación.

### ❖ **Espectroscopia de fluorescencia de rayos X**

La espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF) es una técnica que permite detectar y cuantificar la composición de una muestra de material desconocido irradiándola con rayos X, se caracteriza por el hecho de que la radiación resultante del análisis se descompone en sus diferentes espectros para el análisis sobre los elementos o compuestos que contiene la muestra [61]. Este método es rápido, exacto y no destructivo, donde su precisión y reproducibilidad son muy altas.

En este método, la radiación X incidente expulsa electrones desde la capa interna del átomo y los electrones en la capa más externa ocupan los lugares vacantes. El exceso de energía generado por esta transición se disipa en forma de radiación X fluorescente, con una longitud de onda característica que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados, y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento en la muestra [62] [63].

El propósito de la espectroscopia de fluorescencia de rayos X es realizar el análisis químico cuantitativo de los elementos en muestras sólidas como metales, rocas, polvo o muestras de tejidos y líquidos, ya que no permite ninguna preparación. La técnica cuenta con una gráfica de intensidad donde cada elemento químico se registrará por una distribución de picos de energía característicos, que será un indicador de su abundancia relativa dentro de la muestra [64].

#### ❖ **Difracción por rayos X**

La difracción de rayos X (XRD) es una técnica que permite identificar cualitativamente los minerales en fase cristalina presentes en muestras de cerámica basándose en los registros de rayos X difractados. Este método funciona cuando un haz de rayos X incide en un material sólido y parte de este se dispersa en todas direcciones a causa de los electrones asociados a los átomos o iones que encuentra en el trayecto, pero el resto se difracta si existe una disposición ordenada de átomos [65].

Cabe señalar que la estructura cristalina de cada mineral es única, por lo que la diferencia de frecuencia de los rayos X difractados también será específica. El equipo donde se aplica la técnica tiene un detector que convierte las lecturas de frecuencia en un espectro, donde el pico de intensidad de frecuencia máxima en una determinada posición en el espectro revela la presencia de minerales y su abundancia relativa, llamado patrón de difracción de rayos X. Esta proporciona datos tales como [63] [66]:

- La posición de los picos expresada en valores de  $2\theta$ .
- La intensidad de pico, que son como alturas de los picos o para trabajos de más precisión las áreas. Al pico más intenso se le asigna un valor de 100 y el resto se escala respecto a éste.
- El perfil de pico que proporciona información importante sobre la muestra analizada.

Los picos de alta intensidad aparecen cuando algún conjunto de planos cristalográficos cumple la condición de difracción de Bragg, estos corresponden a índices de planos. El tamaño y la geometría de la celdilla unidad se deducen de las posiciones angulares de los picos de difracción, y la disposición de los átomos en la celdilla se deduce su intensidad relativa. Cabe resaltar que los rayos X son difractados cuando las condiciones satisfacen la ley de Bragg expresada matemáticamente como [67]:

$$n\lambda = 2 d_{hkl} \sin \theta \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Donde  $n$  es el orden de difracción, que puede ser cualquier número entero siempre que seno de  $\theta$  no exceda la unidad. De esta forma, se obtiene una expresión simple que relaciona la longitud de onda y la distancia interatómica del rayo X con el ángulo de incidencia del haz difractado.

Una fortaleza de la técnica de difracción por rayos X es la posibilidad de identificar variantes en los minerales de las rocas por su exposición a fenómenos atmosféricos. Pero las limitaciones que cuentan son que la penetración de los rayos X es limitada, por lo que el registro mineralógico suele ir en orden descendente desde la superficie hacia el centro de las muestras, llevando a problemas en la estimación cuantitativa de los minerales en la muestra, siendo más útil para registro cualitativo de presencia o ausencia de minerales [64].

## 2.6 CÁMARAS DE COMBUSTIÓN

Una cámara de combustión es un espacio de la estufa donde se mezcla y se quema el combustible a alta presión, en la que su proceso aumenta la energía interna y temperatura dependiendo de la configuración. El diseño y la selección de dispositivos que lo conforman dependen de las condiciones de operación para determinar sus dimensiones y los materiales con que se construirán [68].

La selección de materiales tiene en cuenta varios factores, como la temperatura máxima de funcionamiento, las condiciones de operación, la minimización del calor desperdiciado en la pared de la cámara y la viabilidad económica. El calor transferido por la pared de la cámara de combustión debe minimizarse para mejorar su rendimiento, considerando que se desperdicia casi por completo, pues su aplicación es mantener la cámara de combustión a una elevada temperatura para una combustión rápida y confiable.

Cabe destacar que para realizar la cámara de combustión se utilizan materiales con excelente aislamiento térmico y resistencia al fuego para soportar altas temperaturas, reducir la pérdida de calor a través de la pared y, en ocasiones, utilizarlo como elementos estructurales [69].. Por ejemplo, la arena y la arcilla son sedimentos de alta masa térmica que se encuentran en casi todas las regiones, son económicos, fácil de usar y suelen ser duraderos porque no se gastan con el calor intenso producido por el fuego [70].

Las cerámicas aislantes aplicadas en estufas pasan por ciclos repetidos de caliente y frío, que eventualmente llegan a producir fracturas pequeñas que debilitan su estructura, dando el sustento de que parecen durar bien bajo ciclos térmicos. Sin embargo, la única prueba verdadera es instalarlo en una estufa o un horno para usarla durante un tiempo determinado y en condiciones actuales de cocinar, donde el comportamiento de los aislantes térmicos depende de los gradientes de temperatura en el interior del horno y en la cara opuesta de dicho aislante, generando dos curvas de perfiles de temperatura [70].

# CAPÍTULO III

## METODOLOGÍA

En este capítulo se especifican los procedimientos y las técnicas empleadas para definir las propiedades de los materiales en estudio y, por ende, cumplir con los objetivos propuestos en el proyecto de investigación. Para iniciar, se determinan los materiales sedimentarios y su ubicación en los puntos de extracción, así como la fabricación de piezas con el propósito de conocer sus características correspondientes.

En el análisis de cada material se aplican técnicas de caracterización física y térmica, donde es indispensable estudiar su comportamiento y establecer propiedades como la conductividad térmica, densidad y porosidad. Además, se presenta un análisis químico – mineralógico que definan los componentes químicos de estos materiales, utilizando técnicas de difracción y espectroscopia de fluorescencia de rayos X. Por último, se establece una serie de criterios con la finalidad de evaluar la resistencia a temperaturas elevadas para su utilización prevista en esta investigación.

### 3.1 MUESTREO Y PREPARACIÓN DE PIEZAS

De acuerdo con la información consultada en bibliografía acerca de la línea de materiales cerámicos, se tiene un panorama para la selección y extracción de la materia prima que debe cumplir con ciertas características para el proceso de fabricación de piezas cerámicas y obtener resultados favorables en el desarrollo de la investigación.

### 3.1.1 RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS

El muestreo se realizó directamente en los depósitos o banco de materiales, utilizando medios mecánicos convencionales para su extracción, presentados en la Tabla 3.1. Las muestras vistas en la Figura 3.1.



**Figura 3.1.** Muestras recolectadas de sedimentos

**Tabla 3.1.** Ubicación de muestras recolectadas

| Muestra | Tipo                | Ubicación                            | Municipio        | Coordenadas geográficas            |
|---------|---------------------|--------------------------------------|------------------|------------------------------------|
| 1       | Arcilla café de río | Fraccionamiento Luis Donaldo Colosio | Chiapa de Corzo  | 16° 41' 47.9" N<br>93° 00' 32.8" O |
| 2       | Arcilla negra       | Libramiento Norte                    | Tuxtla Gutiérrez | 16° 46' 28.5" N<br>93° 09' 48.9" O |
| 3       | Limo - arcilla rojo | Pasté                                | Zinacantán       | 16° 41' 31.5" N<br>92° 45' 31.3" O |
| 4       | Limo – arena crema  | Las Lajas                            | Tzimol           | 16° 10' 10.7" N<br>92° 11' 23.3" O |
| 6       | Limo – arena caliza | Libramiento Norte                    | Tuxtla Gutiérrez | 16° 46' 28.5" N<br>93° 09' 48.9" O |

Cabe destacar que, para su selección, se realizaron ensayos para el reconocimiento e identificación de las características fundamentales de las muestras mediante pruebas sensoriales.

### 3.1.2 TRATAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA

La preparación de los materiales sedimentarios empleados en el estudio consistió con el siguiente proceso [71]:

- Se hizo el *secado* de las muestras a temperatura ambiente durante una semana para eliminar todo rastro de humedad.
- Una vez seca la muestra, se procedió al *triturado* mediante golpeteos con un mazo hasta que el material alcanzara cierta uniformidad de partículas.
- Se efectuó el *tamizado* manual durante una hora en cada muestra representativa para clasificar las partículas y separar a aquellos de un tamaño igual o menor a una malla mosquitera de acero galvanizado (abertura de 0.7 mm), como se aprecia en la Figura 3.2.



**Figura 3.2.** Muestras de los materiales sedimentarios separados entre sus partículas gruesas y finas

### 3.1.3 ELABORACIÓN DE LAS PIEZAS CERÁMICAS

Para elaborar las piezas se utilizaron las muestras tamizadas de cada material. En este caso se aplica la técnica de moldeo siguiendo el procedimiento correspondiente:

- Se realizó la combinación de los materiales seleccionados siguiendo las propiedades de cada muestra, como una propuesta de acuerdo a lo especificado en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Matriz de combinación propuesta de materiales para la fabricación de piezas cerámicas

| Materiales |   | Suelos |   |   |
|------------|---|--------|---|---|
|            |   | 1      | 2 | 3 |
| Suelos     | 4 | A      | C | E |
|            | 5 | B      | D | F |

- Se aplicó la dosificación de los materiales de acuerdo a las proporciones propuestas en la Figura 3.3



**Figura 3.3.** Distribución de las muestras tratadas por capas en la pieza

- Después, se vertió la mezcla en moldes fabricados con madera con un espesor de 7 centímetros y un error de precisión máxima de 5%, de acuerdo con la norma NMX-C-038-ONNCCE-2013. Estas se adhirieron a las paredes hasta formar un cuerpo poroso [72].
- Luego, se llevó las piezas a secado natural a temperatura ambiente en un tiempo relativo de 15 a 20 días.

En este proceso se fabricaron seis piezas cerámicas por cada muestra recolectada para su caracterización posterior. Dichos elementos fueron elaborados con asesoramiento técnico – metodológico a través de la empresa Hábitats Sostenibles Lumex S.A. de C.V.

## 3.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

### 3.2.1 IDENTIFICACIÓN DE MINERALES POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X (XRD)



*Figura 3.4. Equipo de difracción de rayos X*

El análisis por difracción de rayos X (XRD) permite identificar a los minerales por su estructura cristalina y la distribución regular en el espacio de sus componentes mediante sus redes cristalinas que manifiestan la repetición periódica de la celda del mineral captada por un

detector y convertida en impulsos eléctricos que se traducen en un patrón de difracción característico del material analizado. En esta técnica se incide un haz de rayos X monocromático sobre la muestra sólida a analizar, teniendo lugar cuando el espaciado entre las capas de los átomos sea aproximadamente de la misma magnitud que la longitud de onda de la radiación utilizada y así exista una distribución regular de los centros de dispersión.

Para este análisis se empleó un difractómetro de rayos X modelo *Rigaku Ultima IV* con tubo de rayos X en condiciones de operación de 40 kV, 44 mA y 1.76 kW, con radiación Cu- $\alpha_1$ : 1.5418 Å. El análisis se aplicó en el Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (IIIER) de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) (Figura 3.4)

Primero, se tomó aproximadamente un gramo de cada muestra cribada. Luego, se molieron, y se extendió individualmente en una porta muestras de cristal para montarlo sobre el goniómetro giratorio acoplado a un detector (Figura 3.5).



**Figura 3.5.** Colocación de la muestra en el difractómetro de rayos X

Situado en posición, giró respecto a la trayectoria del haz colimado de rayos X utilizando la geometría de Bragg - Brentano mientras captó las señales difractadas de los mismos. El barrido

para cada muestra se aplicó en un intervalo de  $5^{\circ}$  a  $70^{\circ}$  con una velocidad de  $2^{\circ}/\text{min}$  y precisión de  $0.02^{\circ}$  con la finalidad de obtener patrones definidos de difracción.

Una vez que se obtuvo el difractograma, el cual es un gráfico que en abscisas indica el ángulo de difracción y en ordenadas la intensidad correspondiente, y los datos de la muestra analizada, la identificación consistió buscar el mineral en la base de datos cuyo difractograma corresponda, por lo que fue necesario utilizar un método sistemático.

### 3.2.2 ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X (XRF)

Los espectrómetros de fluorescencia de rayos X secuenciales usan un detector móvil en un goniómetro para moverlo en un rango angular con la finalidad de medir las distintas intensidades de longitudes de onda. Si se identifica la energía de cada una de las radiaciones características de cada muestra representativa, se pueden conocer sus elementos o componentes químicos que conforman, a través de sus respectivas concentraciones porcentuales.



**Figura 3.6.** Espectrómetro de fluorescencia de rayos X secuencial (WDXRF)

Para la obtención de la composición química de las muestras en combinación, según las características de cada material de acuerdo con la matriz mostrada en la tabla 3.2, se empleó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X secuencial (WDXRF) de sobremesa de alta potencia marca *Rigaku Supermini200*, equipado con un generador de rayos X de 50 kV, 4 mA y tubos de rayos X Pd – ánodo, 200 W refrigerado por aire (Figura 3.6).

Las muestras de material en polvo seco fueron etiquetadas y acondicionadas para asegurar su identificación, integridad y conservación. Por limitaciones instrumentales, fue necesaria una cantidad suficiente para cubrir una porta muestras para su aplicación. El análisis se realizó en el Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (IIER) de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH)

### **3.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA**

#### **3.3.1 ENSAYO DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA**

Se determinó la conductividad térmica de las piezas realizadas por cada material en estado permanente a 25 °C en el aparato de placa caliente con guarda (APCG) con doble lado de medición, acompañado de un equipo de baño térmico marca ThermoFisher Scientific. El conjunto tiene un alcance para medir valores de conductividad térmica en los materiales que comprenden entre 0.03 y 2 W/m\*°C en espesores menores a 150 mm. Este ensayo se basa en la aplicación de la NMX – C – 189 – ONNCCE – 2010 [73]

La medición se hizo en piezas fabricadas con dimensiones de 30 x 30 centímetros y un espesor propuesto de 7 centímetros, secadas previamente a temperatura ambiente en condición seca. Cada pieza se requirió de tres mediciones con un intervalo de duración de 12 horas cada una. Este ensayo fue aplicado en el Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades

Sustentables, localizado en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) (Figura 3.7).



**Figura 3.7.** Equipo de medición de conductividad térmica

El APCG se operó para alcanzar las condiciones de temperatura de prueba y posteriormente se calculó el valor de conductividad térmica utilizando la ecuación mediante las mediciones de las variables obtenidas del software LabView por intervalos de 10 segundos. Luego se obtuvo el área y el espesor de cada pieza midiendo las dimensiones con un calibrador vernier digital.

$$k = \frac{Q \Delta x}{A \Delta T} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde

***k*** es la conductividad térmica aparente de la muestra (W/m °C)

***Q*** es el flujo de calor en la muestra (W),

**$\Delta T$**  es la diferencia de temperatura aplicada en la muestra (°C)

**$\Delta x$**  es el espesor de la muestra (m)

***A*** es el área efectiva de la sección transversal (m<sup>2</sup>)

### 3.3.2 DETERMINACIÓN DE ABSORCIÓN Y POROSIDAD APARENTE

El comportamiento de la humedad es importante debido a que es un parámetro que influye significativamente en la conductividad térmica. La prueba se realizó mediante la aplicación dada por Moret – Fernández et al. (2015), donde se destinó un mínimo de tres piezas de 7 centímetros por lado, con un error de precisión máxima de 5% en cada muestra representativa [74]. Este procedimiento es una adaptación de la norma NMX-C-228-ONNCCE-2005 debido a la condición del procesamiento de las piezas cerámicas [75].

Las muestras se midieron con un calibrador vernier digital y se secaron en a temperatura ambiente durante dos semanas. Después, se retiraron periódicamente y se pesaron en una balanza con capacidad adecuada y sensibilidad no menor de 0.2% de la masa de la pieza hasta que la diferencia en masa no fuera mayor de ese porcentaje.



*Figura 3.8. Prueba de absorción en tres muestras representativas*

Posteriormente, se sumergieron en un envase con alcohol etílico 96 ( $\rho = 0.797 \text{ g/cm}^3$ ) a temperatura ambiente (entre 17 y 23 °C) por un tiempo de 30 minutos (Figura 3.8). La baja tensión superficial del líquido impide la desintegración del material sedimentario por explosión a medida

que el líquido va ocupando los poros de la muestra. El burbujeo observado en la superficie de la pieza sumergida indicó que el aire atrapado está siendo liberado. Una vez saturado, se eliminó el agua superficial con un paño absorbente y se procedió a determinar su masa [74].

Finalmente, se obtuvo el volumen de absorción con la Ecuación 3.2:

$$V_V = \frac{m_W - m_D}{p_W} * 100 \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde

$V_V$  es el volumen de absorción de líquido (cm<sup>3</sup>)

$m_W$  es la masa de la muestra en condición saturada (g)

$m_D$  es la masa seca (g)

$p_W$  es la densidad del líquido (Alcohol: 0.797 g/cm<sup>3</sup>)

Cabe destacar que la densidad aparente es una característica de importancia directa para los cerámicos por indicar su grado de transformación físico - química, e indirectamente para calcular la porosidad total. Con esta sección del procedimiento se calculó la densidad aparente con la Ecuación 3.3:

$$p_D = \frac{m_D}{V_T} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde

$p_D$  es la densidad del material (g/cm<sup>3</sup>)

$V_T$  es el volumen total de la muestra (cm<sup>3</sup>)

Por último, se calculó el valor de la porosidad en porcentaje, determinado según la Ecuación 3.4:

$$P (\%) = \frac{V_V}{V_T} * 100 \quad \text{Ecuación 3.4}$$

### 3.4 DETERMINACIÓN DE COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LAS PIEZAS CERÁMICAS

Para comprobar el comportamiento térmico de las piezas cerámicas, se realizó una experimentación empírica basada en la metodología propuesta por Cantavella et al. (2006). Este procedimiento consiste en generar curvas de perfiles de temperatura dentro de un horno y en la superficie exterior de cada muestra representativa, en la cual se obtendrán gradientes de temperatura por lapsos de tiempos determinados [76].

Para esta prueba, consiste en montar un horno convencional cilíndrica cerrada construido a base de láminas de acero galvanizado y fibra cerámica como capa de aislante de dicho horno, teniendo como base de transmisión de calor una resistencia eléctrica con una temperatura de operación de  $415^{\circ}\text{C}$ , y una variación de  $\pm 6^{\circ}\text{C}$ ., como se muestra en la Figura 3.9



*Figura 3.9. Horno convencional*

Para realizar las mediciones de temperatura, se utilizaron dos termopares con sus respectivos multímetros de lectura descritos a continuación (Figura 3.10):

- Un sensor termocupla marca PerfectPrime TL1815 Tipo K de cabeza de acero inoxidable, y una barrera formada por una capa de fibra cerámica, con temperatura de operación de 0 – 800 °C. Esta fue ubicada dentro del horno a una distancia central de 3 centímetros debajo de la cara interna de la muestra analizada. Las lecturas se realizaron con un lector de temperatura digital marca TES 1300 Thermometer con rangos de -50°C – 1300°C y un error de precisión de 0.75% + 1 °C.
- Una sonda termopar tipo K de alambre con sensor de temperatura, ubicada a 3 milímetros dentro en la cara exterior de la pieza cerámica. Las lecturas se hicieron con un multímetro digital contra impactos marca Sanelec modelo 1586 con rangos de -40 °C – 1000 °C.



**Figura 3.10.** Monitoreo de temperatura dentro del horno y en la cara exterior de la pieza cerámica

Las lecturas de temperatura se realizaron cada 5 minutos durante 4 horas. Posteriormente, con los resultados reportados se obtuvieron diferencia entre la temperatura interna del horno y en la cara opuesta de la pieza, según el sentido de avance de operación del horno. La simulación se realizó en el Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (IIIER) de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH).

# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

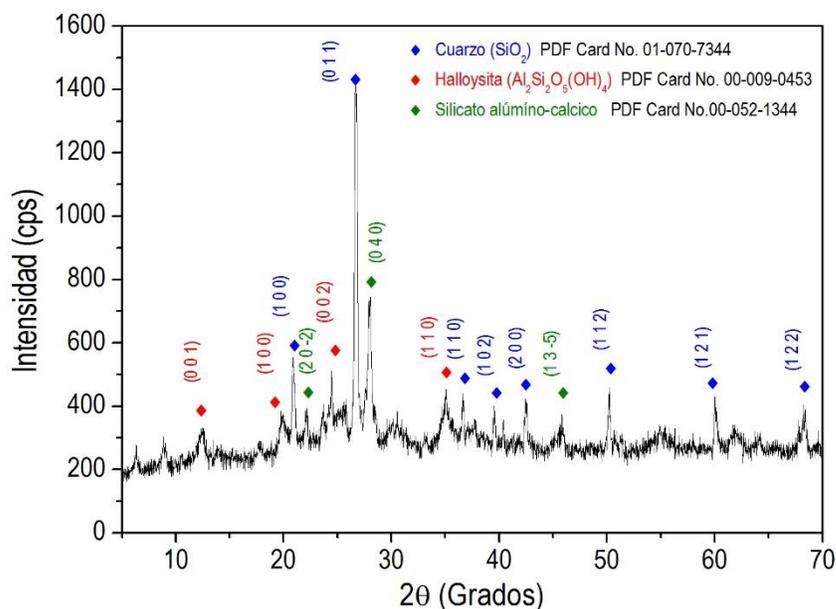
A continuación, se presentan los resultados de la caracterización en los materiales utilizados en piezas para su uso como aislamiento térmico. A través de la metodología utilizada en el estudio, los resultados obtenidos muestran el comportamiento de los materiales sedimentarios sobre diversos parámetros, por lo que se puede evaluar la posibilidad de utilizarlos como aislante térmico de la cámara de combustión (condición de refractario). Los resultados se presentan de acuerdo a los objetivos planteados al inicio de esta investigación, se realizó una breve discusión y se comparó el desempeño obtenido en cada prueba con respecto a otros estudios sustentados en la misma.

### 4.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

#### 4.1.1 IDENTIFICACIÓN DE MINERALES POR ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

A través del análisis de difracción de rayos X, el polvo en estado seco se analizó cualitativamente de acuerdo con las características del equipo y las condiciones de medición descritas en la sección 3.2.1, donde se determinó las principales composiciones mineralógicas en las seis muestras representativas mostradas en la sección 3.1.1.

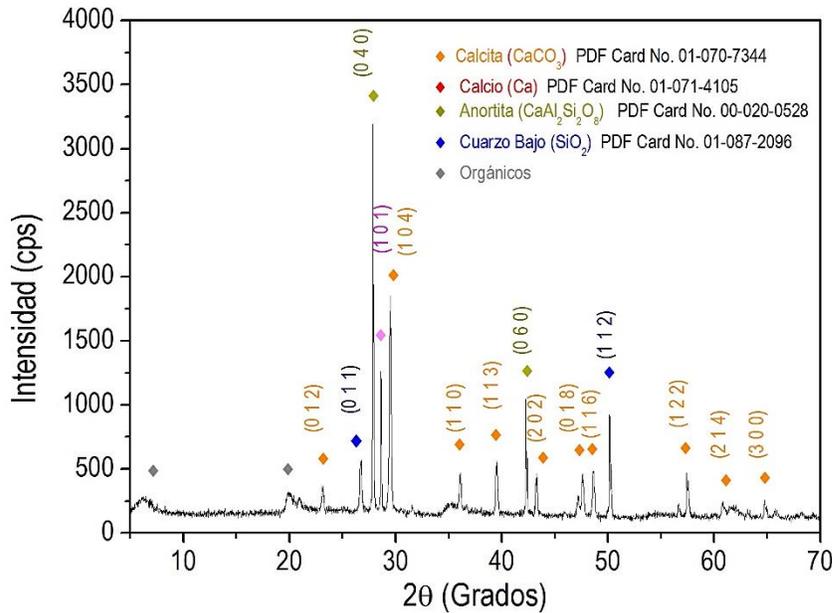
La presencia de la fase mineral se determina analizando el patrón de difracción de rayos X, donde la relación de intensidad se expresa en función del ángulo de difracción. A continuación, se explica con detalle esas fases características de cada muestra.



**Figura 4.1.** Difracción de rayos X de la muestra no.1

La fase mineral principal en la muestra no. 1 (Figura 4.1) es el  $\alpha$ -cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) en los planos cristalográficos (1 0 0), (0 1 1), (1 1 0), (1 0 2), (2 0 0), (1 1 2), (1 2 1) y (2 0 3) ubicados en  $2\theta$  igual a  $20.85^\circ$ ,  $26.69^\circ$ ,  $36.61^\circ$ ,  $39.52^\circ$ ,  $42.47^\circ$ ,  $50.17^\circ$ ,  $60.03^\circ$  y  $68.20^\circ$  respectivamente, perteneciente al grupo espacial  $P3_221$  (154) del sistema cristalino trigonal, identificado con la tarjeta JCPDS No. 01-070-7344. Otra fase mineral importante es la *halloysita-7A* ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) en los planos cristalográficos (0 0 1), (1 0 0), (0 0 2) y (1 1 0), ubicados en  $2\theta$  igual a  $12.50^\circ$ ,  $19.78^\circ$ ,  $24.49^\circ$  y  $35.00^\circ$  respectivamente, que pertenece al grupo espacial P-3 (147) del sistema cristalino hexagonal, según lo indicado en la tarjeta JCPDS No. 00-009-0453. Estos dos minerales son silicatos y aluminosilicatos respectivamente que, de acuerdo con Bernal et al (2003), predominan en la corteza terrestre y se destacan por su cristalización perfecta [58].

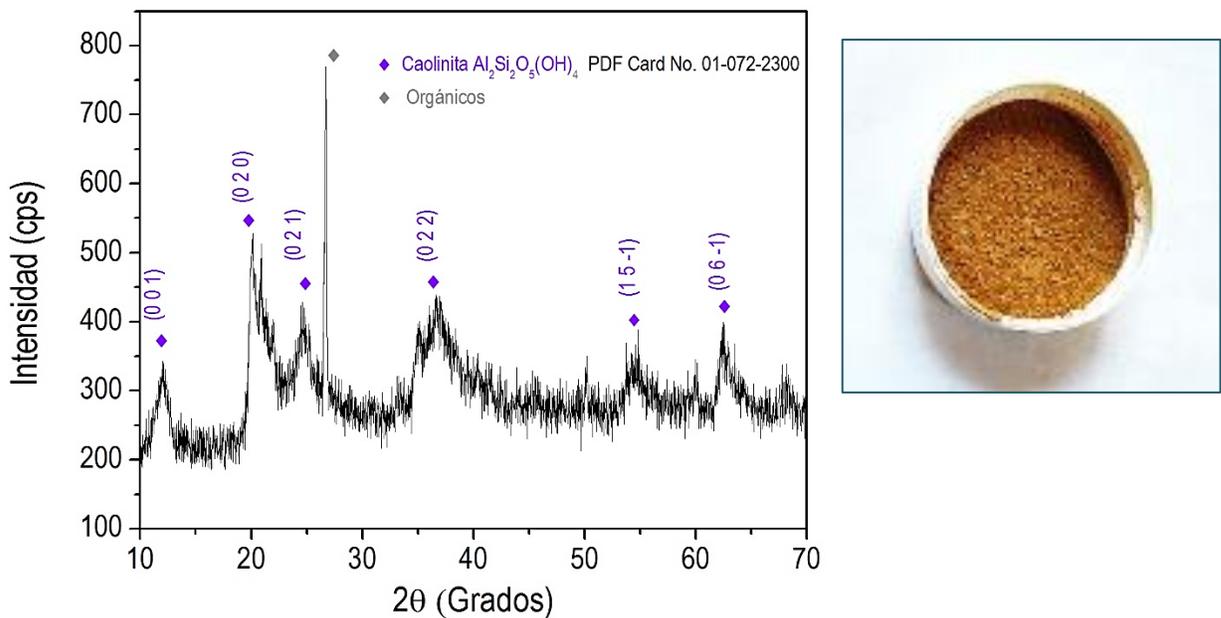
Sin embargo, se encontraron otros minerales tales como los silicatos aluminio cálcico ( $\text{Al}_{1.77}\text{Ca}_{0.88}\text{O}_8\text{Si}_{2.23}$ ) en los planos (2 0 2), (0 4 0) y (1 3 -5) localizados en  $2\theta$  igual a  $22.10^\circ$ ,  $28.06^\circ$  y  $46.08^\circ$  respectivamente, según lo indicado en la tarjeta JCPDS No. 00-052-1344.



**Figura 4.2.** Difracción de rayos X de la muestra no.2.

En la muestra no. 2 (Figura 4.2) se reconoció a la *calcita* (CaCO<sub>2</sub>) como fase mineral predominante en los planos cristalográficos (0 1 2), (1 0 4), (1 1 3), (1 1 6) y (1 2 2) ubicados en 2θ igual a 20.85°, 26.69°, 39.50°, 48.51° y 57.40°, por mencionar algunos, perteneciente al grupo espacial P<sub>3</sub><sub>2</sub>21 (154) del sistema cristalino hexagonal, identificado con la tarjeta JCPDS No. 01-070-7344. Este mineral es un carbonato que aparecen asociados a ciertos minerales arcillosos.

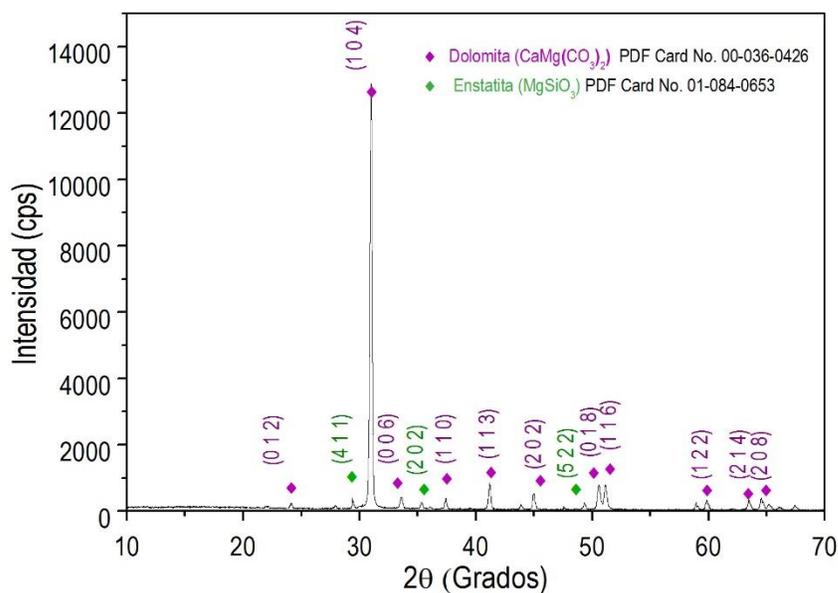
La *anortita* (CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>), un aluminosilicato de calcio, se localizan en los planos (0 4 0) y (0 6 0), en sus ángulos 2θ correspondientes a 27.86° y 42.27°, en el grupo espacial P-1 (2) del sistema cristalino triclinico, descrito en la tarjeta JCPDS No. 00-020-0528. En cambio, el *cuarzo bajo* se ubica en los planos (0 1 1) y (1 1 2) localizados en los ángulos 2θ igual a 26.70° y 50.17°, que pertenece al grupo espacial P<sub>3</sub><sub>2</sub>21 (154) del sistema cristalino trigonal, identificado con la tarjeta JCPDS No. 01-087-2096. En este último caso se comporta como material de relleno, que puede contribuir a disminuir la contracción de la pasta cerámica durante el proceso de secado, como lo menciona Linares et al. (1983) [59].



**Figura 4.3.** Difracción de rayos X de la muestra no.3

La fase mineral principal de la muestra no. 3 (Figura 4.3) es la *caolinita-1A* (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>) en los planos cristalográficos (0 0 1), (0 2 0), (0 2 1), (0 2 2), (1 5 -1) y (0 6 -1) ubicados en 2θ igual a 12.12°, 20.06°, 24.62°, 36.11°, 54.73° y 62.39° respectivamente, que forma parte del grupo espacial C1 (1) del sistema cristalino triclinico, identificado con la tarjeta JCPDS No. 01-072-2300. Este mineral pertenece al grupo de los caolines, siendo arcillas cerámicas por excelencia debido a sus amplias aplicaciones industriales. Por su parte, Bernal et al. (2003) menciona que una arcilla con abundante presencia de caolinita, de hasta un 20%, tiende a aumentar su resistencia a la cocción, es decir, es refractaria, ofrece baja plasticidad y se seca fácilmente [58].

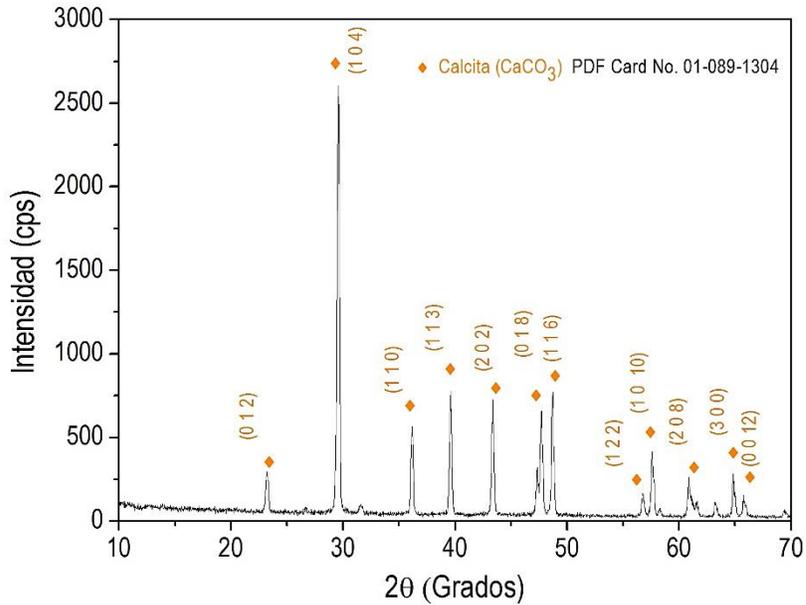
Estas tres primeras muestras son arcillas debido a que posee en su mayor fase mineral filosilicatos (minerales arcillosos), ya que contienen componentes de sílice y alúmina hidratados que se acompañan de iones de magnesio, hierro, potasio y sodio. Estos se caracterizan por tener un comportamiento físico frente al agua denominado plasticidad, e incluso endurecen cuando son secadas al ambiente o mediante tratamientos térmicos a alta temperaturas; sin embargo, el cambio volumétrico al someterse en estos procesos es abrupto, por lo que se sugiere combinarse con otros minerales que estabilicen a estas muestras [77].



**Figura 4.4.** Difracción de rayos X de la muestra no.4

En la muestra no. 4 (Figura 4.4) se reconoció a la *dolomita* ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) como la fase mineral predominante en los planos cristalográficos (0 1 2), (1 0 4), (0 0 6), (1 1 0), (1 1 3), (2 0 2), (0 1 8), (1 1 6), (1 2 2), (2 1 4) y (2 0 8) ubicados en  $2\theta$  igual a  $24.15^\circ$ ,  $30.98^\circ$ ,  $33.56^\circ$ ,  $37.40^\circ$ ,  $41.14^\circ$ ,  $44.95^\circ$ ,  $50.52^\circ$ ,  $51.08^\circ$ ,  $59.83^\circ$ ,  $63.45^\circ$  y  $64.53^\circ$  respectivamente, que forma parte del grupo espacial R-3 (148) del sistema cristalino trigonal, descrita en la tarjeta JCPDS No. 00-036-0426. Este mineral se usa para aplicaciones refractarias, cerámicas, vidrio plano y como fundente en metalurgia. Para su uso en altas temperaturas, es un excelente aislante térmico, por lo que se utiliza como protector del ladrillo refractario en el horno de fundición [78].

Sin embargo, se halló otro mineral denominado *enstatita* ( $\text{MgSiO}_3$ ) en los planos (4 1 1), (2 0 2) y (5 2 2) localizados en  $2\theta$  igual a  $27.88^\circ$ ,  $36.05^\circ$  y  $47.54^\circ$  respectivamente, según lo indicado en la tarjeta JCPDS No. 01-084-0653.



**Figura 4.5.** Difracción de rayos X de la muestra no.5

Por último, en la muestra no. 5 (Figura 4.5) se demostró a la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) como la fase mineral dominante en los planos cristalográficos (0 1 2), (1 0 4), (1 1 0), (1 1 3), (2 0 2), (0 1 8), (1 1 6), (1 2 2), (2 0 8) y (3 0 0) ubicados en  $2\theta$  igual a  $23.2^\circ$ ,  $29.59^\circ$ ,  $36.15^\circ$ ,  $39.60^\circ$ ,  $43.36^\circ$ ,  $47.67^\circ$ ,  $48.68^\circ$ ,  $57.59^\circ$ ,  $61.14^\circ$  y  $64.84^\circ$  respectivamente, que forma parte del grupo espacial R-3c (167) del sistema cristalino trigonal, identificado con la tarjeta JCPDS No. 01-089-1304. Este mineral tiene la ventaja de ejercer una acción de fusión enérgica en las pastas cerámicas rebajando la temperatura de cocción. Cabe destacar que bajo la influencia del calor se descompone en óxido de calcio y libera dióxido de carbono en forma de gas, por lo que también se utiliza para producir cerámicas porosas, de acuerdo con Bernal et al. (2003) [58].

Las dos últimas muestras forman parte del grupo de los carbonatos, que suelen encontrarse como constituyentes de las rocas sedimentarias químicas. En pastas crudas, estos actúan como anti plástico, es decir, son resistentes al agua, por lo que provee alta estabilidad dimensional en formación de piezas cerámicas tales como ladrillos y tabiques; además no reduce el encogimiento en el secado tanto como la sílice ( $\text{SiO}_2$ ) [78].

Entonces en la investigación se utilizará como aglomerante estabilizador en combinación con las arcillas (filosilicatos) debido a que, en el proceso de interacción con el calor, los carbonatos reaccionan con estos materiales para formar minerales de alta temperatura, como lo cita Linares et al. (1983) [59].

#### 4.1.2 ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X (XRF)

El análisis por fluorescencia de rayos X en la condición de longitud de onda dispersiva se realizó en las seis muestras representativas con las distintas combinaciones de materiales propuestas en la Tabla 3.2, bajo las características de operación del equipo descritas en la sección 3.2.2 de esta investigación. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1.** Determinación de compuestos químicos en relación a su porcentaje de masa.

| Muestras | Composición química (% masa) |                                |       |       |                                |                  |                  |       |
|----------|------------------------------|--------------------------------|-------|-------|--------------------------------|------------------|------------------|-------|
|          | SiO <sub>2</sub>             | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | Otros |
| A        | 32.54                        | 12.32                          | 36.04 | 6.36  | 8.28                           | 2.18             | 1.25             | 1.03  |
| B        | 30.17                        | 10.99                          | 43.58 | 1.36  | 9.51                           | 2.26             | 1.32             | 0.81  |
| C        | 15.77                        | 7.26                           | 59.39 | 11.45 | 4.35                           | 0.41             | 0.89             | 0.48  |
| D        | 9.12                         | 3.55                           | 81.20 | 0.34  | 4.45                           | 0.36             | 0.67             | 0.31  |
| E        | 24.65                        | 19.26                          | 37.15 | 7.61  | 9.00                           | 0.43             | 1.22             | 0.68  |
| F        | 19.04                        | 14.87                          | 50.69 | 0.27  | 12.90                          | 0.32             | 1.55             | 0.36  |

Como primer acercamiento, se aprecia que las muestras tienen un porcentaje de óxido de calcio (CaO), principalmente en aquellas que fueron combinadas y/o tienen como fase mineral dominante la calcita (muestras B, C, D y F), llegando a superar hasta en un 80%. Además, se destaca que el óxido de silicio y óxido de aluminio se encuentran en altas proporciones en las muestras A y E, rondando entre un 43 y 44% de su composición. Estas concentraciones fueron favorables para la elaboración de piezas cerámicas estipulada en la investigación.

## 4.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y TÉRMICA

### 4.2.1 ESTUDIO DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Se determinó la conductividad térmica de cada pieza cerámica preparados utilizando las diferentes mezclas de materiales propuestas en la Tabla 3.2. Toda medición se realizó en estado permanente a 25 °C a través del aparato de placa caliente con guarda (APCG) con doble lado de medición a temperatura ambiente promedio de 27.5°C y humedad relativa de 62%.

El valor de la conductividad térmica se obtuvo mediante el procedimiento descrito en el apartado 3.3.1 a partir de las mediciones de las variables proporcionadas por el software LabView, considerando un área estándar de 0.0392 m<sup>2</sup> y un espesor equivalente a 7 cm, con un error de precisión de ±5%. Los valores promedios para el cálculo por cada muestra estudiada se presentan en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2.** Valores de operación obtenidos en la medición de conductividad térmica.

| Parámetros  | Muestra |        |        |        |        |        |
|---|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
|   | A       | B      | C      | D      | E      | F      |
| Potencia real suministrada por m <sup>2</sup> (W/m <sup>2</sup> ) | 161.43  | 152.92 | 152.63 | 148.67 | 154.88 | 148.77 |
| Temperatura en la placa caliente (°C)                             | 61.76   | 65.13  | 57.75  | 57.62  | 60.04  | 62.16  |
| Temperatura en la placa fría (°C)                                 | 26.60   | 26.79  | 27.36  | 26.81  | 26.74  | 26.75  |
| Gradiente de temperatura en la muestra (°C)                       | 35.16   | 38.34  | 30.39  | 30.81  | 33.30  | 35.41  |
| Espesor de la muestra (m)   | 0.073   | 0.072  | 0.068  | 0.067  | 0.074  | 0.070  |

En la Tabla 4.3 se reporta la conductividad térmica efectiva (k) y la resistencia térmica (R) de cada muestra analizada. Los datos informados son valores promedio y también se muestran los errores estándar con un intervalo de confianza del 95%.

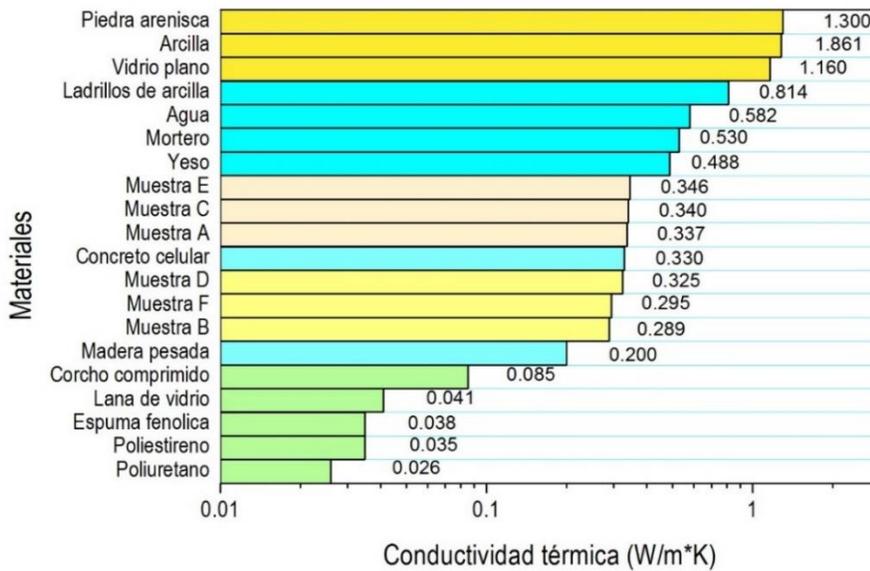
**Tabla 4.3.** Resultados de la conductividad y resistencia térmica de las piezas cerámicas

| Muestras  | Conductividad térmica efectiva<br>(W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ) | Resistencia térmica efectiva<br>(k m <sup>2</sup> W <sup>-1</sup> ) |
|-----------|---|---|
| A (1 – 4) | 0.337 ± 0.0087  | 0.218 ± 0.0054  |
| B (1 – 5) | 0.289 ± 0.0013  | 0.251 ± 0.0011  |
| C (2 – 4) | 0.340 ± 0.0036  | 0.199 ± 0.0021  |
| D (2 – 5) | 0.325 ± 0.0014  | 0.201 ± 0.0008  |
| E (3 – 4) | 0.346 ± 0.0048  | 0.215 ± 0.0029  |
| F (3 – 5) | 0.295 ± 0.0024  | 0.238 ± 0.0019  |

De acuerdo a los resultados proporcionados se ha demostrado que las piezas cerámicas que contienen calcita [CaCO<sub>3</sub>] genera una influencia de hasta 14.5 ± 0.49% de aislamiento térmico en comparación de aquellas que contienen dolomita [CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]. Sin embargo, en las muestras C y D, la diferencia porcentual entre la cantidad de dolomita y calcita de 4.6% debido a que el mineral encontrado en las muestras son relativamente carbonatos de calcio en su fase mineral predominante.

Por otra parte, las piezas con contenido de caolinita [Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>] es 2.32 ± 0.55% en conductividad térmica superior que aquellas con contenido de cuarzo [SiO<sub>2</sub>], debido a que la distribución del tamaño de partícula o grano puede influir significativamente a este parámetro.

Haciendo una comparación con otros materiales, los valores de conductividad térmica proporcionados en cada muestra se ubican en el rango de los materiales de construcción, incluyendo los aislantes bioclimáticos expuestos por González – Cruz (2015), como se aprecia en la Figura 4.6 [79]. En la gráfica se observa que los polímeros (poliestireno y poliuretano), lanas y espumas son los mejores aislantes térmicos, teniendo una conductividad térmica menor a 0.1 W/m\*K. Por ejemplo, la lana de vidrio, que es una fibra conformada de compuestos cerámicos tales como sílice y carbonatos, es aproximadamente 7 veces más aislante térmico con respecto a la muestra analizada de menor valor (muestra B) que tiene una composición similar.



**Figura 4.6.** Comparación de la conductividad térmica de las muestras con algunos materiales utilizados en construcción. Modificado de González-Cruz (2015) [79].

Las piezas cerámicas se encuentran entre los valores de conductividad térmica de la madera pesada y el yeso, es decir, en el rango de 0.200 – 0.488 W/m\*K. Sin embargo, se identificó que el concreto celular, con una conductividad térmica de 0.330 W/m\*K, es el material que separa a las muestras con contenido de calcita y dolomita, respectivamente. Si se aplica un análisis comparativo, las piezas con contenido de calcita son más aislantes que el concreto celular hasta un 12.42%; en cambio aquellas con contenido de dolomita son más conductores con dicho material hasta un 4.85%.

Cabe destacar que las muestras cerámicas elaboradas bajo un mismo régimen contienen un alto volumen de aserrín, lo que genera un mayor aislamiento térmico en todas ellas. Definido este punto, se concreta lo que menciona Dondi et al. (2004) y Gualtieri et. al (2010), que la acción formadora de poros generado por la materia orgánica, tiene una influencia positiva en el aislamiento térmico en las piezas cerámicas [4] [16].

## 4.2.2 DENSIDAD Y POROSIDAD APARENTE

Se determinó la densidad y porosidad aparente de las piezas cerámicas utilizando diferentes combinaciones de materiales propuestas en la Tabla 3.2. El valor de estos parámetros se calculó a través del procedimiento explicado en el apartado 3.3.2 a partir de las variables obtenidas, considerando un espécimen de 7 centímetros por lado, con un error de precisión de  $\pm 5\%$ . Los valores promedios realizados por cada muestra representativa se presentan en la Tabla 4.4.

**Tabla 4.4.** Valores obtenidos en el estudio de densidad y porosidad aparente

| Parámetros                               | Muestra |        |        |        |        |        |
|--|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
|  | A       | B      | C      | D      | E      | F      |
| Masa seca (g)                            | 543.67  | 432.33 | 550.00 | 490.67 | 403.00 | 371.33 |
| Masa húmeda (g)                          | 606.67  | 494.33 | 640.00 | 588.67 | 487.33 | 471.33 |
| Volumen de la muestra (cm <sup>3</sup> ) | 400.57  | 345.40 | 398.67 | 389.43 | 373.22 | 371.71 |
| Volumen de vacíos (cm <sup>3</sup> )     | 79.05   | 77.79  | 112.92 | 122.96 | 105.81 | 125.47 |

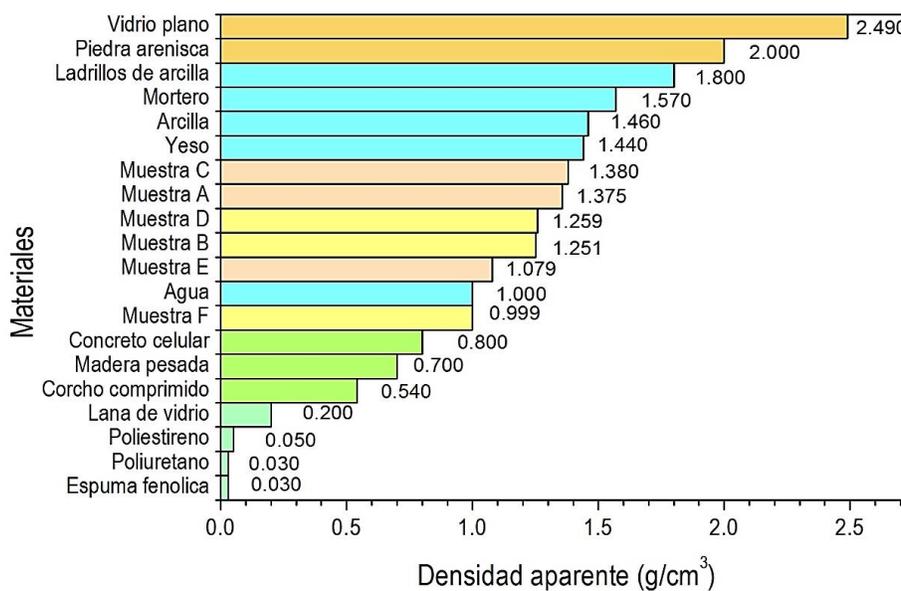
En la Tabla 4.5 se reporta los resultados de densidad aparente ( $\rho$ ) y la porosidad como porcentaje del volumen total (P) de las muestras estudiadas. Los datos informados son valores promedio y también se muestran los errores estándar con un intervalo de confianza del 95%.

**Tabla 4.5.** Resultados de la densidad y porosidad aparente de las piezas cerámicas

| Muestras  | Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> ) | Porosidad (%V)   |
|-----------|--|------------------|
| A (1 – 4) | 1.357 $\pm$ 0.0336                     | 19.73 $\pm$ 0.31 |
| B (1 – 5) | 1.251 $\pm$ 0.0080                     | 22.53 $\pm$ 0.41 |
| C (2 – 4) | 1.380 $\pm$ 0.0532                     | 28.32 $\pm$ 0.56 |
| D (2 – 5) | 1.259 $\pm$ 0.0166                     | 31.61 $\pm$ 1.35 |
| E (3 – 4) | 1.079 $\pm$ 0.0262                     | 28.37 $\pm$ 0.56 |
| F (3 – 5) | 0.999 $\pm$ 0.0063                     | 33.75 $\pm$ 0.26 |

Realizando un análisis comparativo entre los resultados mostrados en la tabla anterior, se aprecia que la densidad aparente de las piezas cerámicas con contenido de calcita [ $\text{CaCO}_3$ ] disminuye hasta  $8 \pm 0.79\%$  en relación con aquellas con contenido de dolomita [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ]. Como primera impresión es importante destacar que la conductividad térmica está en función de la densidad de cada material aplicado, como lo han citado diversos autores tales como Gualtieri et al (2010) [4]. Sin embargo, las densidades de las piezas con contenido de caolinita [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ] presenta una disminución de  $20.32 \pm 0.34 \%$  en comparación que aquellas con contenido de cuarzo [ $\text{SiO}_2$ ], siendo inversamente proporcional al parámetro de conductividad térmica.

Con respecto a otros materiales, los valores de densidad aparente dados en cada muestra se ubican en el rango de los materiales de construcción, incluyendo los aislantes bioclimáticos expuestos por González – Cruz (2015), como se aprecia en la Figura 4.7 [79].



**Figura 4.7.** Comparación de la densidad aparente promedio de las muestras con algunos materiales utilizados en construcción. Modificado de González – Cruz (2015) [79].

Al igual que en el parámetro de conductividad térmica, se observa que los polímeros plásticos, lanas y espumas tienen una menor densidad aparente, incluso por debajo de  $0.20 \text{ g/cm}^3$ .

Por ejemplo, la lana de vidrio, siendo una fibra fabricada de compuestos cerámicos tales como sílice y carbonatos, es 5 veces menos denso con respecto a la muestra analizada de menor valor (muestra F) que tiene una composición similar, debido al proceso de conformado especializado del material en forma industrial.

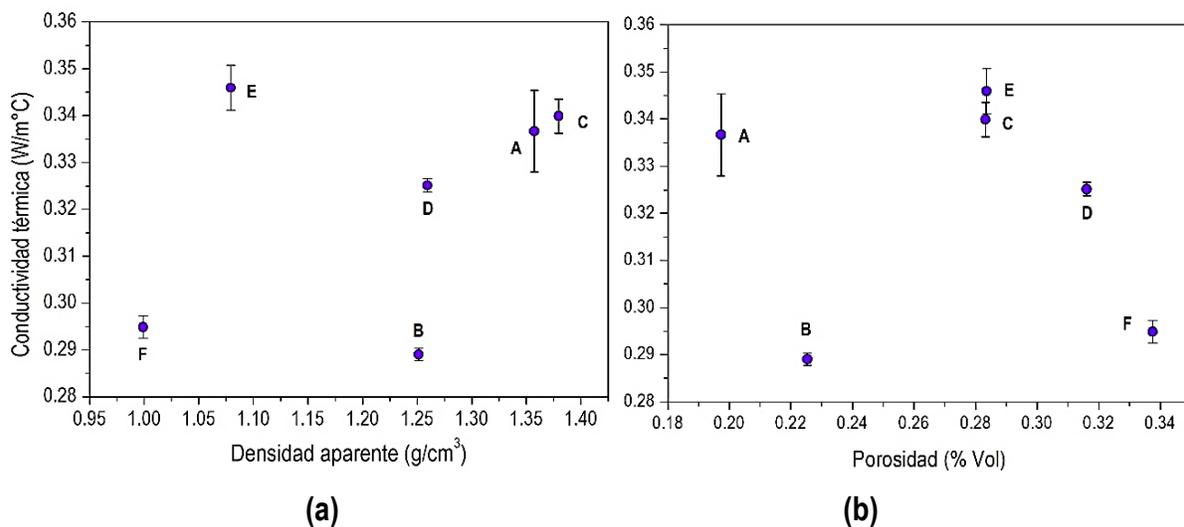
Por otro lado, las piezas cerámicas estudiadas están entre los valores de la densidad del concreto celular y el yeso, es decir, en el rango de 0.80 – 1.44 g/cm<sup>3</sup>. Además, se considera que el agua ( $\rho = 1.00 \text{ g/cm}^3$ ) se ubica dentro del rango estipulado. Si ésta se analiza con respecto a las piezas cerámicas estudiadas, la muestra con la combinación de caolinita y calcita (muestra F) tiene una densidad similar; en cambio, la muestra C es 38% más denso con respecto a este líquido.

Diversos autores en sus publicaciones, como Rocha – Rangel (2004), Bhattacharjee (2004) y Gualtieri et al. (2010) coinciden que la densidad de cualquier material cerámico está inherentemente asociada con la porosidad o cantidad de espacios vacíos en su estructura o esqueleto [15] [39]. Considerando a las piezas examinadas como cerámicos tradicionales, se identificó estas propiedades con su correspondiente relación; en las piezas con contenido de calcita [CaCO<sub>3</sub>] son  $14.92 \pm 4.21\%$  más porosas con respecto a aquellas con contenido de dolomita [CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]. En cambio, la porosidad aparente de las piezas con contenido de caolinita [Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>] presenta un aumento de  $46.80 \pm 4.81\%$  en comparación que aquellas con contenido de cuarzo [SiO<sub>2</sub>].

La tendencia que sigue la porosidad con respecto a la conductividad térmica es similar a la densidad con este segundo parámetro, debido a que la cantidad y proporción volumétrica de material orgánico como agregado generador de poros utilizado en la investigación disminuye el peso de las piezas cerámicas y a su vez influye en la reducción de la conductividad térmica en cada una de ellas. De hecho, el aserrín que fue utilizado en la investigación para generar poros y mejorar el aislamiento térmico, es una práctica común en la producción de ladrillos de arcilla cocida, como lo cita Al – Rimet et al. (1999) [19].

### 4.3 RELACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS CON LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Como se mencionó anteriormente, la conductividad térmica de un material cerámico está intrínsecamente relacionada a la densidad y, por ende, a su porosidad. No obstante, existen otros factores que influyen al primer parámetro y que, según diversos autores, juegan un papel importante en su comportamiento. Por ejemplo, Erker (2002) menciona que en una pieza cerámica con una densidad similar existe una variación importante en la conductividad térmica debido a su composición mineralógica y química, así como la naturaleza, distribución y tamaño del poro y/o del grano en su estructura [80].

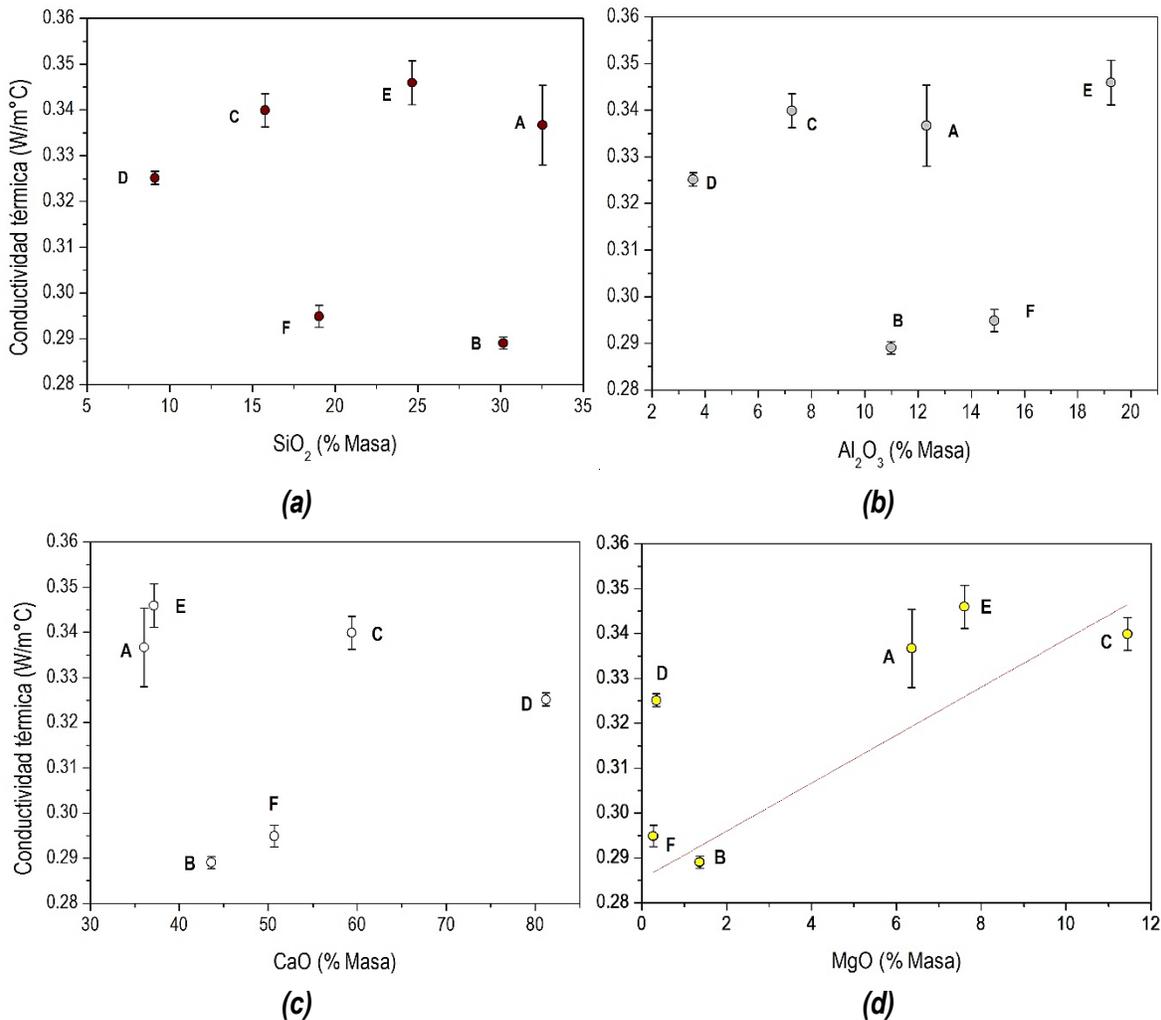


**Figura 4.8.** Conductividad térmica en función con (a) densidad aparente y (b) porosidad

De acuerdo con los argumentos citados, se realiza la primera relación entre las magnitudes físicas (Tabla 4.5) con respecto a la conductividad térmica (Tabla 4.3) obtenidas de las muestras estudiadas, demostrado en la Figura 4.8. En ambos casos no se aprecia una correlación lineal definida entre las variables analizadas; sin embargo, en el caso de la densidad aparente existe una tendencia significativamente positiva con relación a la conductividad térmica que, si se descarta las muestras B y E, obedece la teoría estipulada en el comportamiento térmico de los materiales cerámicos. De igual manera, el porcentaje de porosidad se encuentra

una cierta tendencia negativa con respecto a la última variable que, eliminando la muestra B, se somete a la propia premisa.

En realidad, algunas muestras con una porosidad relativamente baja tienen un mayor valor de aislamiento térmico y viceversa, como sucede en la muestra B. Esto surge posiblemente por en papel contrastante que ejercen la composición mineralógica y química de cada material como lo demostró Dondi et al. (2004) [16], o también su tamaño del grano que influye significativamente en su estructura, de acuerdo con Gualtieri et al. (2010) [4]. Haciendo un análisis, se somete a una correlación de la conductividad térmica con respecto a la composición química principales que definen a los sedimentos utilizados (Tabla 4.1) definida en la Figura 4.9.



**Figura 4.9.** Conductividad térmica en relación al porcentaje de (a) SiO<sub>2</sub>, (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (c) CaO y (d) MgO

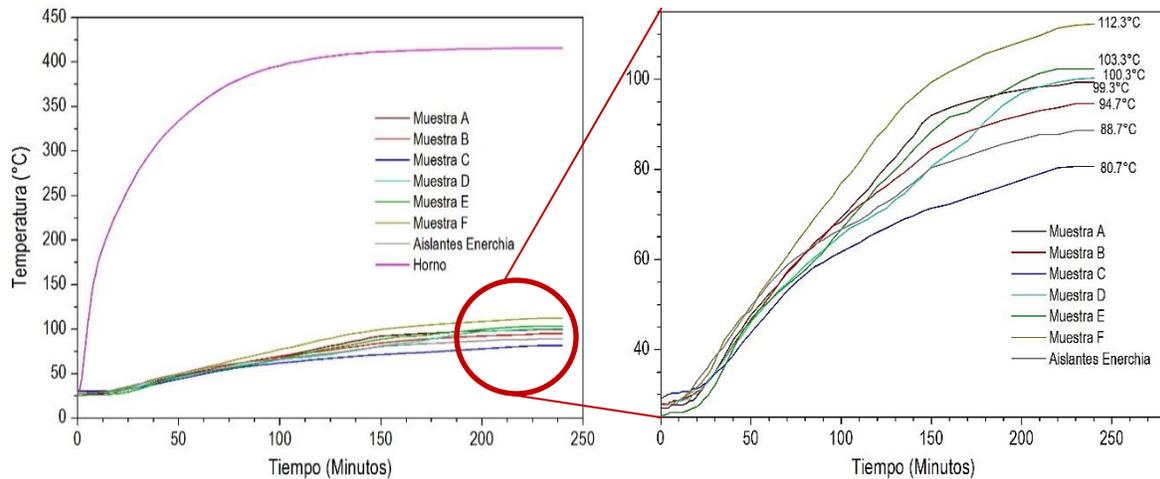
A pesar que se aplicó un ajuste lineal en los parámetros establecidos, el único que incide en una tendencia lineal positiva es la correlación de la cantidad de óxido de magnesio (MgO) con respecto a la conductividad térmica, con un coeficiente  $R^2$  de 0.807, siendo este valor aceptable.

Cabe resaltar que la influencia de los carbonatos en la conductividad térmica de las piezas cerámicas se aborda con frecuencia en investigaciones, principalmente en aquellas que contienen calcita, como se demostró en la sección 4.2.2, porque, además de la materia orgánica, estos minerales generan una cantidad significativa de poros que disminuye la densidad en su estructura [58]. No obstante, eso no significa que tengan un buen aislamiento térmico debido a que los aluminosilicatos tienden a elevar la conductividad térmica, como se expone en la Figura 4.9 (a) y (b), principalmente cuando son sometidos a altas temperaturas, que serán discutidos más adelante [80].

Por último, este cuestionamiento es preliminar debido al universo limitado de muestras estudiadas, la complejidad de interacciones físicas y químicas que influyan su comportamiento térmico y que las piezas cerámicas elaboradas no cuentan con un proceso de cocción o sinterizado, es decir, son cuerpos verdes.

#### **4.4 ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LAS PIEZAS CERÁMICAS**

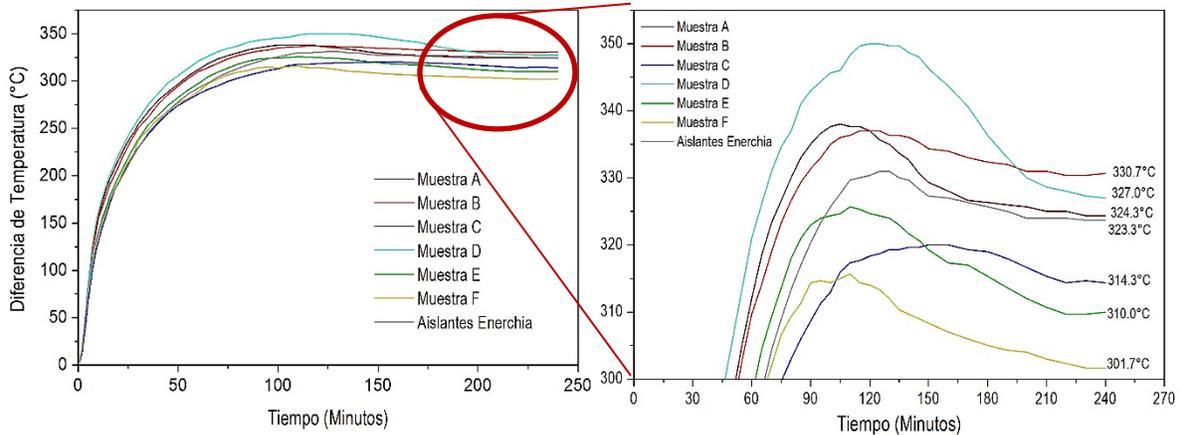
En este estudio se realizó una simulación sobre el comportamiento térmico en cada pieza cerámica, generando curvas de perfiles de temperatura dentro de un horno y en la superficie exterior de las seis muestras representativas, así como una comparación con los aislantes utilizados para la estufa Enerchía que se encuentra en el Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (IIER) de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH). Considerando que la cara frontal fue expuesta a una temperatura máxima de operación controlada de 415°C con un error de  $\pm 6^\circ\text{C}$  dentro de la cámara del horno, se dibujaron estos perfiles con base a los datos reportados por lapsos de 5 minutos, mostrados en la Figura 4.10



**Figura 4.10.** Evolución de las temperaturas promedio registradas de las muestras representativas y dentro de la cámara del horno con respecto al tiempo.

En este análisis, el rango de temperatura en la cara opuesta exterior de las muestras luego de 4 horas de operación estuvo en un intervalo de entre 80.7 – 112.3°C, considerando que la temperatura más alta lo obtuvo la muestra F (combinación de caolinita – calcita). Procediendo en la comparación de las piezas cerámica con respecto al conjunto de aislantes usados en la estufa Enerchia (ladrillo petatillo, lámina de acero galvanizado y fibra cerámica), esta última registró una temperatura de 88.7°C, siendo hasta 21.02% menor respecto a la temperatura más alta. Sin embargo, se presencia un aumento de hasta 9.91% en proporción a la muestra C (combinación calcita – dolomita) que registró una temperatura de 80.7°C.

Cabe resaltar que, al momento que la radiación por calor entra al contacto con la pieza cerámica, la materia orgánica se disipa mediante la reacción por combustión que, según Ibáñez y Sandoval (1996), comienza a efectuarse entre los 280 – 320°C [81]. A raíz de este fenómeno químico, dicha pieza también genera calor, por lo cual existe una variación de temperatura destacable dentro de la cámara del horno. Con esta afirmación, se procede a obtener los perfiles de gradientes de temperatura entre el interior del al cámara y la parte exterior de la pieza cerámica, mostrado en la Figura 4.11.



**Figura 4.11.** Gradientes de temperaturas promedio entre las piezas cerámicas y dentro de la cámara del horno con respecto al tiempo.

En los perfiles mostrados se aprecian que las diferencias de temperatura en 4 horas de operación están en el rango de entre 301.7 – 330.7°C, demostrando que la  $\Delta T$  más alta es la muestra B (cuarzo – calcita), teniendo una mejor respuesta al aislamiento térmico; mientras la menor es la muestra F (caolinita – calcita). Ahora bien, la muestra C (calcita con orgánico) se encontró una  $\Delta T = 350^\circ\text{C}$  en el minuto 125, sin embargo, disminuye hasta  $\Delta T = 327^\circ\text{C}$ . Esto se puede interpretar que sucede por dos factores:

- Al principio las reacciones que se desarrollan en el interior de la pieza por la combustión de materia orgánica y descomposición inicial de carbonatos, que en la pieza mostrada tiene una cantidad relativamente alta, disminuye su densidad y por consiguiente aumenta la porosidad, como lo comenta Cantavella et al. (2006) [76].
- Posteriormente, la disminución de la diferencial ocurre por la deshidroxilación de los minerales de la arcilla y por el aumento del tamaño de las partículas arcillosas [81].

Asimismo, en los aislantes de la estufa Enerchía se observa que llegó a  $\Delta T = 323^\circ\text{C}$  al final de la operación, estando dentro del rango estipulado. Si se coteja con las piezas examinadas, el diferencial de temperatura es 7.30% mayor con relación a la mínima registrada y, por ende, 2.24% menor respecto a la máxima temperatura. Todos los datos están expuestos en el Anexo 5.

# CAPÍTULO V

## CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSIONES FINALES

En esta investigación, los materiales sedimentarios seleccionados se caracterizaron mediante diversas técnicas de análisis para su aplicación en cámaras de combustión. Primeramente, se recolectaron cinco muestras representativas en distintos bancos de materiales en el estado de Chiapas y mediante el análisis de difracción de rayos X se identificaron tres arcillas y dos carbonatos como fases minerales predominantes que, por su condición de estabilizadores, fueron utilizadas como aglomerante para fabricar seis piezas cerámicas. Dichas combinaciones fueron sometidas a un estudio de espectroscopia de fluorescencia de rayos X con el objetivo de conocer el porcentaje en masa de compuestos químicos.

Cada pieza fue elaborada mediante una dosificación propuesta por capas para generar un mayor aislamiento térmico que, debido a estudios previos, el material orgánico es un elemento benéfico para este propósito; dicho material empleado en la investigación fue el aserrín. Para ello se aplicó una combinación de arcilla – carbonato – aserrín en proporción volumétrica 1:1:0 (1.5 cm), 1:1:2 (2.5 cm) y 1:1:3 (3 cm), teniendo un espesor final de 7 centímetros.

Se determinó la conductividad térmica efectiva de las piezas cerámicas elaboradas con estos materiales, así como la obtención de la densidad aparente y porosidad. Además, se procedió a correlacionar la magnitud de la conductividad térmica con respecto a sus propiedades físicas y químicas como punto de discusión, ya que son parámetros determinantes para su comportamiento térmico. Posteriormente, se aplicó una simulación térmica sometido a temperaturas elevada por un tiempo de operación de 4 horas.

Como punto inicial, se destaca el papel favorable del cuarzo y calcita como minerales aglomerantes en el aislamiento térmico ( $k = 0.289 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ), incluso en la condición de resistencia a altas temperaturas (refractario), con un diferencial de  $\Delta T = 330.7^\circ\text{C}$ . Asimismo, las proporciones volumétricas de material orgánico (aserrín) y la cantidad de carbonatos que se aplicaron como agregados formadores de poros influyó en la disminución de la densidad de las piezas cerámicas y, por ende, en la reducción de la conductividad térmica.

Sin embargo, los parámetros físicos y químicos aplicados en el estudio no describen ni comprenden con precisión la premisa acerca del comportamiento térmico de las cerámicas, porque el universo de muestras estudiadas es limitado, las interacciones físicas y químicas que influye las arcillas y los carbonatos en el aislamiento térmico es diverso y las piezas elaboradas no atravesaron por un proceso de cocción o sinterizado inicial. A pesar de ello, el único parámetro que incide a la conductividad térmica es el porcentaje en masa de óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ), en una tendencia lineal positiva.

Por último, a pesar que los materiales sedimentarios son empleados con frecuencia para fabricar cerámicos tradicionales en la región sur – sureste de México a causa de su diversidad y variedad, los estudios sobre su comportamiento térmico son incipientes, por lo que esta tesis abre un camino para ahondar en futuras investigaciones.

## 5.2 TRABAJOS FUTUROS

A continuación, se propone una serie de recomendaciones que se identificaron para futuros trabajos a seguir:

- ❖ Aplicación de diversos materiales orgánicos en la contribución térmica de las piezas cerámicas.
- ❖ Distintos proporcionamiento de materiales sedimentarios para su análisis y aplicación en el aislamiento térmico.
- ❖ Evaluación de piezas cerámicas en condiciones reales para cámaras de combustión.
- ❖ Estudios químicos y microestructurales de los materiales cerámicos posteriores a su aplicación en cámaras de combustión.
- ❖ Estudios morfológicos de los cerámicos y su influencia con el tamaño del grano y porosidad
- ❖ Estudios de degradación de los materiales cerámicos en su interacción a altas temperaturas.

## REFERENCIAS

- [1] N. Dikmen y S. T. E. Okzan, «Unconventional Insulation Materials,» *Insulation Materials in Context of Sustainability*, pp. 1-22, 2016.
- [2] A. Korjenic, P. Vít, J. Zach y J. Hroudova, «Development and Performance Evaluation of Natural Thermal-Insulation Materials Composed of Renewable Resources,» *Energy and Buildings*, vol. 43, nº 9, pp. 18-23, 2011.
- [3] T. W. M. Salih, *Insulation Materials*, Bagdad: Ministry of Higher Education and Scientific Research, 2015.
- [4] M. L. Gualtieri, A. F. Gualtieri, S. Gagliardi y R. Petra, «Thermal conductivity of fired clays: Effects of mineralogical and physical properties of the raw materials,» *Applied Clay Science*, vol. 49, nº 1, pp. 269-275, 2010.
- [5] D. Bozsaky, «The Historical Development of Thermal Insulation Materials,» *Periodica Polytechnica*, vol. 41, nº 2, pp. 2-9, 2011.
- [6] P. Wirth, «History of the development of heat pumps,» *Schweiz Bauzeits*, vol. 73, nº 42, pp. 47-51, 1955.
- [7] R. Rawlings y J. Sykulski, «Ground source heat pumps: A technology review,» *Building Services Engineering Research and Technology*, vol. 20, nº 3, pp. 119-129, 1999.
- [8] S. García, «Referencias históricas y evolución de los plásticos,» *Revista Iberoamericana de Polímeros*, vol. 10, nº 1, pp. 71-80, 2009.
- [9] B. Sanner, R. Hopkirk, F. Kabus, W. Ritter y R. L., «Practical experiences in Europe of the combination of geothermal energy and heat pumps,» de *5th IEA Conference on Heat Pumping Technologies*, Toronto, 1996.
- [10] L. Lira-Cortés, O. J. González Rodríguez y E. Méndez-Lango, «Medición de la conductividad térmica de algunos materiales utilizados en edificios,» de *Simposio de Metrología*, Querétaro, 2008.
- [11] J. Gutiérrez y A. Gonzalez, «Determinación experimental de conductividad térmica de materiales aislantes naturales y de reciclado,» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 16, pp. 41-48, 2012.
- [12] G. Alarcón Aguirre y J. D. Gutiérrez Alberoni, «Confort térmico en una habitación de adobe con sistema de almacenamiento de calor en los Andes de Perú,» *Journal of High Andean Research*, vol. XX, nº 3, pp. 289-300, 2018.

- [13] A. Cedeño Valdiviezo, «Materiales Bioclimáticos,» *Revista de Arquitectura*, vol. 12, pp. 101-110, 2010.
- [14] W. Mena-Novelo, R. Un-Aragon, J. Corona, M. Romero y A. Oliva, «Determinación de la conductividad térmica de materiales en polvo de la Península de Yucatán,» *Ingeniería*, vol. 19, nº 2, pp. 102-109, 2015.
- [15] B. Bhattacharjee y S. Krishnamoorthy, «Permeable Porosity and Thermal Conductivity of Construction Materials,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 16, nº 4, pp. 322-330, 2004.
- [16] M. Dondi, F. Mazzanti, P. Principi, M. Raimondo y G. Zanarini, «Thermal Conductivity of Clay Bricks,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 16, nº 1, pp. 8-14, 2004.
- [17] N. Laaroussi, G. Lauriat, M. Garoum, A. Cherki y Y. Jannot, «Measurement of thermal properties of brick materials based on clay mixtures,» *Construction and Building Materials*, vol. I, nº 70, pp. 351-361, 2014.
- [18] D. M. Portillo Arreguín, N. P. López Acosta, D. F. Barba Galdámez y M. Sánchez, «Determinación de propiedades térmicas de los suelos a partir del método de la aguja,» de *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*, León, 2018.
- [19] K. Al Rim, A. Ledhem, O. Douzane, R. Dheilly y M. Queneudec, «Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites,» *Cement & Concrete Composites*, vol. 21, nº 4, pp. 269-276, 1999.
- [20] M. Sutcu, S. Akkurt, A. Bayram y U. Uluca, «Production of anorthite refractory insulating firebrick from mixtures of clay and recycled paper waste with sawdust addition,» *Ceramics International*, vol. 38, p. 1033–1041, 2012.
- [21] P. Muñoz, M. Morales, M. Mendivil, M. Juárez y M. L., «Using of waste pomace from winery industry to improve thermal insulation of fired clay bricks. Eco-friendly way of building construction,» *Construction and Building Materials*, vol. 71, pp. 181-187, 2014.
- [22] H. Rahman, T. Islam, T. Ibn Minhaj, M. Azad, M. Hasan y R. Haque, «Study of Thermal Conductivity and Mechanical Property of Insulating Firebrick Produced by Local Clay and Petroleum Coal Dust As Raw Materials,» *Procedia Engineering*, vol. 105, nº 10.1016/j.proeng.2015.05.019, pp. 121-128, 2015.
- [23] S. I. Ibrahim, N. M. Ali y T. W. Abood, «Improving the thermal and physical properties of fire clay refractory bricks by added magnesia,» *AIP Conference Proceedings*, vol. 1968, nº 030025, pp. 1-8, 2018.
- [24] A. M. Hassan, H. Moselhy y M. Abadir, «The use of bagasse in the preparation of fireclay insulating bricks,» *Applied Ceramic Technology*, vol. 16, nº 1, pp. 418-425, 2018.

- [25] A. Oliver, F. Neila y A. García-Santos, «Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica,» *Materiales de Construcción*, vol. 62, nº 305, pp. 131-140, 2012.
- [26] M. Palomo Cano, *Aislantes térmicos: Criterios de selección por requisitos energéticos*, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2017, pp. 5 - 20.
- [27] I. Granet y M. Bluestein, *Thermodynamics and Heat Power*, Boca Raton: Pearson Education, Inc., 2015.
- [28] C. Yunus A., *Transferencia de Calor y Masa*, Ciudad de México: McGraw Hill, 2011.
- [29] Y. Massó, «Introducción,» de *Guía sobre Materiales Aislantes y Eficiencia Energética*, Madrid, Gráficas Arias Montano, S. A., 2012, p. 16.
- [30] M. Shawyer y A. Medina Pizzali, «Materiales termoaislantes, características técnicas y criterios de selección,» de *El uso de hielo en pequeñas embarcaciones de pesca*, Roma, FAO, 2005, pp. 57-73.
- [31] A. Papadopoulos, «State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments,» *Energy and buildings*, vol. 37, nº 1, pp. 77-86, 2005.
- [32] F. J. Alonso, R. M. Esbert, J. Ordaz y P. Vázquez, «Análisis del deterioro en los materiales pétreos de edificación,» *Recopar*, nº 3, pp. 23-32, 2006.
- [33] L. Bañón Blázquez y J. F. Beviá García, «Materiales pétreos,» de *Manual de carreteras*, Alicante, Ortiz e Hijos, Contratista de Obras, S.A, 2000, pp. 1-18.
- [34] C. Rodríguez Navarro y E. Sebastian, «Analytical Techniques for pore-system evaluation of ornamental stones: use and limitations,» *Revista Digital Del Cedex*, vol. 130, nº 96, pp. 130-142, 1994.
- [35] Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), «Clasificación de rocas,» Ciudad Ciencia, 2018. [En línea]. Available: <http://www.ciudadciencia.es/talleres/la-geologia-nos-habla/geo-clasificar-rocas/>. [Último acceso: 16 Mayo 2020].
- [36] W. D. Callister, *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, México: Reverté S.A., 2008.
- [37] J. Anderson, K. Leaver, R. Rawlings y A. J.M., *Materials Science*, Singapur: Colset Private Limited, 1990.
- [38] C. B. Carter y M. G. Norton, *Ceramic Materials: Science and Engineering*, Nueva York: Springer Science, 2007.
- [39] E. Rocha Rangel, *Introducción a los materiales cerámicos*, México: Universidad Autónoma Metropolitana, 2004.

- [40] D. R. Askeland, *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Ciudad de México: Grupo E. Iberoamérica, 2013, pp. 197-215.
- [41] S. Guggenheim y R. Martin, «Definition of clay and clay mineral: joint report of the AIPEA Nomenclature And CMS Nomenclature Committees,» *Clays and Clay Minerals*, vol. 43, n° 2, pp. 255-256, 1995.
- [42] H. P. Alves, J. B. Silva, L. F. Campos, S. M. Torres, R. P. Dutra y D. A. Macedo, «Preparation of mullite based ceramics from clay–kaolin waste mixtures,» *Ceramics International*, vol. 42, p. 19086–19090, 2016.
- [43] A. Pinto, «Cerámicos,» de *Materiales y materias primas*, Buenos Aires, Colección Encuentro Inet, 2011, pp. 1-29.
- [44] M. Ferrer y G. Peña Rodríguez, «Construcción y caracterización de cerámicas porosas a partir de espumas de poliuretano y barbotinas de arcillas rojas,» *Revista Colombiana de Física*, vol. 43, n° 2, pp. 446-450, 2011.
- [45] M. Scheffler y P. Colombo, *Cellular ceramics: structure, manufacturing and applications*, New York: Wiley-VCH, 2005.
- [46] A. Herrera, O. Álvarez, J. Escobar, V. Moreno, A. Oliveira Jr. y D. Hotza, «Fabricación y caracterización de espumas de alúmina,» *Revista Materia*, vol. 17, n° 2, pp. 973-987, 2012.
- [47] J. González Ocampo, D. M. Escobar Sierra y C. P. Ossa Orozco, «Métodos de fabricación de cuerpos porosos de hidroxiapatita, revisión del estado del arte,» *Revista ION*, vol. 27, n° 2, pp. 55-70, 2014.
- [48] F. Kreith, M. S. Bohn y R. M. Manglik, *Principios de transferencia de calor*, México: Cengage Learning, 2012.
- [49] A. F. Mills, *Heat and Mass Transfer*, Chicago: Richard D. Irwin, 1995.
- [50] M. M. Day y A. Carpi, «Densidad: Visionlearning,» 2002. [En línea]. Available: <https://www.visionlearning.com/>. [Último acceso: 25 Julio 2020].
- [51] I. Gómez Arriaran, «Determinación de la permeabilidad del bloque de Termoarcilla,» *ConArquitectura*, vol. 20, n° 38, pp. 61-72, 2011.
- [52] J. Carmeliet y S. Roels, «Determination of the Moisture Capacity of Porous Building Materials,» *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, vol. 25, n° 3, pp. 209-237, 2002.
- [53] M. S. Al-Homoud, «Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials,» *Building and Environment*, vol. 40, n° 3, pp. 353-366, 2005.
- [54] E. Martínez L. y L. Lira C., «Análisis y aplicación de expresiones del contenido de humedad en sólidos,» *Centro Nacional de Metrología*, pp. 1-6, 2010.

- [55] F. J. Alonso Rodríguez, «La porosidad como propiedad física,» Octubre 2010. [En línea]. Available: <http://ocw.uniovi.es/>. [Último acceso: 22 Agosto 2020].
- [56] E. Juárez Badillo y A. Rico Rodríguez, *Mecánica de Suelos*, vol. 1, México: Limusa, 2005, p. 55.
- [57] R. W. Rice, «Evaluating Porosity Parameters for Porosity-Property Relations,» *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 76, nº 7, pp. 1801-1808, 1993.
- [58] I. Bernal, H. Cabezas, C. Espitia, J. Mojica y Q. J., «Análisis próximo de arcillas para cerámica,» *Revista Académica Colombiana*, vol. 27, nº 105, pp. 569-578, 2003.
- [59] J. Linares Gonzalez, F. Huertas Garcia y J. Capel Martinez, «La arcilla como material cerámico. Características y comportamiento,» *Cuadernos de Prehistoria de Granada*, pp. 479-490, 1983.
- [60] J. Capel Martinez, J. Linares Gonzalez y F. Huertas Garcia, «Métodos analíticos aplicados a cerámicas de la edad de bronce,» *Cuadernos de Prehistoria de Granada*, vol. 4, pp. 345-360, 1979.
- [61] D. Martínez B., O. D. Gil Novoa y A. J. Barón González, «Espectrometría de fluorescencia de rayos x,» *Revista Colombiana de Física*, vol. 38, nº 2, pp. 790-793, 2006.
- [62] Universidad de Alicante, «Espectroscopía de fluorescencia de rayos X,» Servicios Técnicos de Investigación, [En línea]. Available: <https://ssti.ua.es>. [Último acceso: 2 Septiembre 2020].
- [63] R. Vega Centeno, A. L. Trujillo Quinde, M. E. Mejía Santillan y J. A. Bravo Cabrejos, «Análisis composicional de la cerámica de Huacramarca, cuenca sur del Yanamayo, Ancash,» *Investigaciones sociales*, vol. 18, nº 32, pp. 57-72, 2014.
- [64] P. Rice, *Pottery Analysis. A Sourcebook*, Chicago: The University of Chicago Press, 1987.
- [65] Universidad Politécnica de Cartagena, «Difracción de rayos X,» [En línea]. Available: <https://www.upct.es/>. [Último acceso: 20 Mayo 2020].
- [66] B. Cullity, *Elements of X-Ray Diffraction*, Massachusetts: Addison - Wesley Publishing Company, 1956.
- [67] G. Rohrer, *Structure and Bonding in Crystalline Materials*, Nueva York: Cambridge University Press, 2004.
- [68] J. M. Trejos Valencia, H. A. Vargas Arboleda y J. E. Tibaquirá Giraldo, «Diseño y construcción de una cámara de combustión para una microturbina de gas,» *Scientia Et Technica*, vol. XVII, nº 50, pp. 15-21, 2012.
- [69] J. Bish Takeuchi, *Diseño y construcción de un horno de cerámica*, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [70] M. Bryden, D. Still, P. Scott, G. Hoffa y D. Ogle, *Principios de diseño para estufas de cocción con leña*, BiblioGov, 2002.

- [71] L. M. Romero Guerrero, *Elaboración de cerámicos porosos a partir de materiales arcillosos y roca: Caracterización y estudio del proceso de sinterización.*, Mineral de la Reforma: Tesis Doctoral, 2019.
- [72] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., *Determinación de las dimensiones de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones (NMX-C-038-ONNCCE-2013)*, México : ONNCCE, 2013.
- [73] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., *Materiales termoaislantes - Determinación de la transmisión térmica con aparato de placa caliente aislada (NMX-C-189-ONNCCE-2010)*, México: ONNCCE, 2010.
- [74] D. Moret-Fernández y M. V. López, «Un método sencillo para la estimación de la porosidad de un agregado de suelo,» *Estudios en la Zona No Saturada.*, vol. XII, nº 15, pp. 3 - 6, 2015.
- [75] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., *Determinación de la absorción de humedad y absorción de agua (NMX-C-228-ONNCCE-2010)*, México: ONNCCE, 2010.
- [76] V. Cantavella, A. Moreno, A. Mezquita y J. J.C., «Distribución de temperaturas en el interior de una pieza durante la cocción industrial,» de *IX Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico - Qualicer*, Castellón, 2006.
- [77] L. A. Díaz-Rodríguez y R. Torrecillas, «Arcillas cerámicas: una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones,» *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 41, nº 5, pp. 459-470, 2002.
- [78] Dirección General del Desarrollo Minero, «Perfil de Mercado de la Dolomita,» Secretaría de la Economía, México, 2020.
- [79] E. M. González, *Selección de materiales en la concepción arquitectónica bioclimática*, Maracaibo: Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño, 2015.
- [80] A. Erker, «The thermal conductivity of the brick ceramic body,» *Ziegelindustrie International*, vol. 55, nº 10, pp. 34-42, 2002.
- [81] A. Ibáñez y S. F., «La cocción rápida,» *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* , vol. 35, nº 6, pp. 433-438, 1996.

# ANEXOS

## ANEXO 1. PARÁMETROS DE OPERACIÓN PARA LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

En este anexo se muestran las tablas de valores obtenidos por triplicado de parámetros que incide al cálculo de la conductividad térmica, obtenida de acuerdo al capítulo 3

| PARÁMETROS  | Muestra A |        |            |              |
|---|-----------|--------|------------|--------------|
|   | 1         | 2      | 3          | Promedio     |
| Potencia real suministrada por m <sup>2</sup> (W/m <sup>2</sup> ) | 165.88    | 161.43 | 156.99     | 161.43       |
| Temperatura en la placa caliente (°C)                             | 61.74     | 62.03  | 61.50      | 61.76        |
| Temperatura en la placa fría (°C)                                 | 26.48     | 26.64  | 26.67      | 26.60        |
| Gradiente de temperatura en la muestra (°C)                       | 35.26     | 35.39  | 34.83      | 35.16        |
| Espesor de la muestra (m)   | 0.0734    | 0.0734 | 0.0734     | 0.0734       |
| Área de medición (m <sup>2</sup> )                                | 0.0392    | 0.0392 | 0.0392     | 0.0392       |
|   |           |        | <b>K =</b> | <b>0.337</b> |
|   |           |        | <b>R =</b> | <b>0.218</b> |

| PARÁMETROS  | Muestra B |        |            |              |
|---|-----------|--------|------------|--------------|
|   | 1         | 2      | 3          | Promedio     |
| Potencia real suministrada por m <sup>2</sup> (W/m <sup>2</sup> ) | 150.62    | 152.38 | 155.76     | 152.92       |
| Temperatura en la placa caliente (°C)                             | 64.42     | 64.95  | 66.02      | 65.13        |
| Temperatura en la placa fría (°C)                                 | 26.80     | 26.77  | 26.80      | 26.79        |
| Gradiente de temperatura en la muestra (°C)                       | 37.62     | 38.18  | 39.22      | 38.34        |
| Espesor de la muestra (m)   | 0.072     | 0.072  | 0.072      | 0.072        |
| Área de medición (m <sup>2</sup> )                                | 0.0392    | 0.0392 | 0.0392     | 0.0392       |
|   |           |        | <b>K =</b> | <b>0.289</b> |
|   |           |        | <b>R =</b> | <b>0.251</b> |

| PARÁMETROS  | Muestra C |        |        |          |
|---|-----------|--------|--------|----------|
|   | 1         | 2      | 3      | Promedio |
| Potencia real suministrada por m <sup>2</sup> (W/m <sup>2</sup> ) | 146.73    | 155.72 | 155.43 | 152.63   |
| Temperatura en la placa caliente (°C)                             | 56.23     | 58.53  | 58.50  | 57.75    |
| Temperatura en la placa fría (°C)                                 | 27.34     | 27.36  | 27.38  | 27.36    |
| Gradiente de temperatura en la muestra (°C)                       | 28.89     | 31.17  | 31.12  | 30.39    |
| Espesor de la muestra (m)   | 0.0676    | 0.0676 | 0.0676 | 0.0676   |
| Área de medición (m <sup>2</sup> )                                | 0.0392    | 0.0392 | 0.0392 | 0.0392   |

|            |              |
|------------|--------------|
| <b>K =</b> | <b>0.340</b> |
| <b>R =</b> | <b>0.199</b> |

| PARÁMETROS  | Muestra D |        |            |              |
|---|-----------|--------|------------|--------------|
|   | 1         | 2      | 3          | Promedio     |
| Potencia real suministrada por m <sup>2</sup> (W/m <sup>2</sup> ) | 147.35    | 150.82 | 147.85     | 148.67       |
| Temperatura en la placa caliente (°C)                             | 57.40     | 57.82  | 57.65      | 57.62        |
| Temperatura en la placa fría (°C)                                 | 26.77     | 26.82  | 26.84      | 26.81        |
| Gradiente de temperatura en la muestra (°C)                       | 30.63     | 31.00  | 30.81      | 30.81        |
| Espesor de la muestra (m)   | 0.0673    | 0.0673 | 0.0673     | 0.0673       |
| Área de medición (m <sup>2</sup> )                                | 0.0392    | 0.0392 | 0.0392     | 0.0392       |
|   |           |        | <b>K =</b> | <b>0.325</b> |
|   |           |        | <b>R =</b> | <b>0.207</b> |

| PARÁMETROS  | Muestra E |        |            |              |
|---|-----------|--------|------------|--------------|
|   | 1         | 2      | 3          | Promedio     |
| Potencia real suministrada por m <sup>2</sup> (W/m <sup>2</sup> ) | 157.69    | 157.87 | 149.09     | 154.88       |
| Temperatura en la placa caliente (°C)                             | 60.34     | 60.47  | 59.32      | 60.04        |
| Temperatura en la placa fría (°C)                                 | 26.72     | 26.69  | 26.81      | 26.74        |
| Gradiente de temperatura en la muestra (°C)                       | 33.62     | 33.78  | 32.51      | 33.30        |
| Espesor de la muestra (m)   | 0.0744    | 0.0744 | 0.0744     | 0.0744       |
| Área de medición (m <sup>2</sup> )                                | 0.0392    | 0.0392 | 0.0392     | 0.0392       |
|   |           |        | <b>K =</b> | <b>0.346</b> |
|   |           |        | <b>R =</b> | <b>0.215</b> |

| PARÁMETROS  | Muestra F |        |            |              |
|---|-----------|--------|------------|--------------|
|   | 1         | 2      | 3          | Promedio     |
| Potencia real suministrada por m <sup>2</sup> (W/m <sup>2</sup> ) | 150.60    | 148.44 | 147.27     | 148.77       |
| Temperatura en la placa caliente (°C)                             | 62.34     | 62.02  | 62.11      | 62.16        |
| Temperatura en la placa fría (°C)                                 | 26.74     | 26.71  | 26.80      | 26.75        |
| Gradiente de temperatura en la muestra (°C)                       | 35.60     | 35.31  | 35.31      | 35.41        |
| Espesor de la muestra (m)   | 0.0702    | 0.0702 | 0.0702     | 0.0702       |
| Área de medición (m <sup>2</sup> )                                | 0.0392    | 0.0392 | 0.0392     | 0.0392       |
|   |           |        | <b>K =</b> | <b>0.295</b> |
|   |           |        | <b>R =</b> | <b>0.238</b> |

## ANEXO 2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA CONDUCTIVIDAD Y RESISTENCIA TÉRMICA

En este anexo se analizan estadísticamente los valores promedio de los parámetros que incide al cálculo de la conductividad y resistencia térmica con un intervalo de confianza de 95%.

| PARÁMETROS  | Muestra |        |        |        |        |        |
|---|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
|   | A       | B      | C      | D      | E      | F      |
| Potencia real suministrada por m <sup>2</sup> (W/m <sup>2</sup> ) | 161.43  | 152.92 | 152.63 | 148.67 | 154.88 | 148.77 |
| Temperatura en la placa caliente (°C)                             | 61.76   | 65.13  | 57.75  | 57.62  | 60.04  | 62.16  |
| Temperatura en la placa fría (°C)                                 | 26.60   | 26.79  | 27.36  | 26.81  | 26.74  | 26.75  |
| Gradiente de temperatura en la muestra (°C)                       | 35.16   | 38.34  | 30.39  | 30.81  | 33.30  | 35.41  |
| Espesor de la muestra (m)   | 0.073   | 0.072  | 0.068  | 0.067  | 0.074  | 0.070  |

| CONDUCTIVIDAD TÉRMICA |            |            |            |          |            |           |
|-----------------------|------------|------------|------------|----------|------------|-----------|
| MUESTRAS              | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 | Promedio | Desviación | Error     |
| A (1 – 4)             | 0.3452     | 0.3347     | 0.3302     | 0.337    | 0.0076974  | 0.0087103 |
| B (1 – 5)             | 0.2901     | 0.2892     | 0.2878     | 0.289    | 0.001159   | 0.0013115 |
| C (2 – 4)             | 0.3436     | 0.3381     | 0.338      | 0.340    | 0.0032047  | 0.0036264 |
| D (2 – 5)             | 0.3257     | 0.326      | 0.3237     | 0.325    | 0.0012503  | 0.0014149 |
| E (3 – 4)             | 0.349      | 0.3477     | 0.3411     | 0.346    | 0.004236   | 0.0047933 |
| F (3 – 5)             | 0.297      | 0.2948     | 0.2928     | 0.295    | 0.0021008  | 0.0023772 |

| RESISTENCIA TÉRMICA |            |            |            |          |            |           |
|---------------------|------------|------------|------------|----------|------------|-----------|
| MUESTRAS            | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 | Promedio | Desviación | Error     |
| A (1 – 4)           | 0.2125     | 0.2192     | 0.2218     | 0.218    | 0.0047983  | 0.0054296 |
| B (1 – 5)           | 0.2498     | 0.2505     | 0.2517     | 0.251    | 0.0009609  | 0.0010873 |
| C (2 – 4)           | 0.1969     | 0.2001     | 0.2001     | 0.199    | 0.0018475  | 0.0020906 |
| D (2 – 5)           | 0.2004     | 0.2002     | 0.2016     | 0.201    | 0.0007572  | 0.0008568 |
| E (3 – 4)           | 0.2132     | 0.214      | 0.2181     | 0.215    | 0.0026287  | 0.0029746 |
| F (3 – 5)           | 0.2364     | 0.2381     | 0.2397     | 0.238    | 0.0016503  | 0.0018674 |

### ANEXO 3. PARÁMETROS OBTENIDOS DE LA DENSIDAD Y POROSIDAD APARENTE

En este anexo se muestran las tablas de valores obtenidos por triplicado de parámetros que incide al cálculo de densidad y porosidad aparente, obtenida de acuerdo al capítulo 3

| PARÁMETROS                                  | Muestra A |        |                |                |
|---|-----------|--------|----------------|----------------|
|   | 1         | 2      | 3              | Promedio       |
| Masa seca (g)                               | 530.00    | 550.00 | 551.00         | 543.67         |
| Masa húmeda (g)                             | 592.00    | 614.00 | 614.00         | 606.67         |
| Volumen de la muestra (cm <sup>3</sup> )    | 400.35    | 402.24 | 399.12         | 400.57         |
| Densidad de la muestra (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.324     | 1.367  | 1.381          | 1.357          |
| Volumen de vacíos (cm <sup>3</sup> )        | 77.792    | 80.301 | 79.046         | 79.046         |
| Porosidad (%)                               | 19.43%    | 19.96% | 19.80%         | 19.73%         |
|   |           |        | <b>p =</b>     | <b>1357.24</b> |
|   |           |        | <b>P (%) =</b> | <b>19.73%</b>  |

| PARÁMETROS                                  | Muestra B |        |                |                |
|---|-----------|--------|----------------|----------------|
|   | 1         | 2      | 3              | Promedio       |
| Masa seca (g)                               | 466.00    | 422.00 | 409.00         | 432.33         |
| Masa húmeda (g)                             | 532.00    | 482.00 | 469.00         | 494.33         |
| Volumen de la muestra (cm <sup>3</sup> )    | 369.99    | 338.07 | 328.14         | 345.40         |
| Densidad de la muestra (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.260     | 1.248  | 1.246          | 1.251          |
| Volumen de vacíos (cm <sup>3</sup> )        | 82.811    | 75.282 | 75.282         | 77.792         |
| Porosidad (%)                               | 22.38%    | 22.27% | 22.94%         | 22.53%         |
|   |           |        | <b>p =</b>     | <b>1251.39</b> |
|   |           |        | <b>P (%) =</b> | <b>22.53%</b>  |

| PARÁMETROS                                  | Muestra C |         |                |                |
|---|-----------|---------|----------------|----------------|
|   | 1         | 2       | 3              | Promedio       |
| Masa seca (g)                               | 532.00    | 566.00  | 552.00         | 550.00         |
| Masa húmeda (g)                             | 620.00    | 656.00  | 644.00         | 640.00         |
| Volumen de la muestra (cm <sup>3</sup> )    | 397.77    | 395.70  | 402.53         | 398.67         |
| Densidad de la muestra (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.337     | 1.430   | 1.371          | 1.380          |
| Volumen de vacíos (cm <sup>3</sup> )        | 110.414   | 112.923 | 115.433        | 112.923        |
| Porosidad (%)                               | 27.76%    | 28.54%  | 28.68%         | 28.32%         |
|   |           |         | <b>p =</b>     | <b>1379.72</b> |
|   |           |         | <b>P (%) =</b> | <b>28.32%</b>  |

| PARÁMETROS                                  | Muestra D |         |                |                |
|---|-----------|---------|----------------|----------------|
|   | 1         | 2       | 3              | Promedio       |
| Masa seca (g)                               | 540.00    | 494.00  | 438.00         | 490.67         |
| Masa húmeda (g)                             | 648.00    | 588.00  | 530.00         | 588.67         |
| Volumen de la muestra (cm <sup>3</sup> )    | 428.31    | 387.94  | 352.04         | 389.43         |
| Densidad de la muestra (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.261     | 1.273   | 1.244          | 1.259          |
| Volumen de vacíos (cm <sup>3</sup> )        | 135.508   | 117.942 | 115.433        | 122.961        |
| Porosidad (%)                               | 31.64%    | 30.40%  | 32.79%         | 31.61%         |
|   |           |         | <b>p =</b>     | <b>1259.44</b> |
|   |           |         | <b>P (%) =</b> | <b>31.61%</b>  |

| PARÁMETROS                                  | Muestra E |         |                |                |
|---|-----------|---------|----------------|----------------|
|   | 1         | 2       | 3              | Promedio       |
| Masa seca (g)                               | 390.00    | 426.00  | 393.00         | 403.00         |
| Masa húmeda (g)                             | 474.00    | 512.00  | 476.00         | 487.33         |
| Volumen de la muestra (cm <sup>3</sup> )    | 364.35    | 385.28  | 370.04         | 373.22         |
| Densidad de la muestra (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.070     | 1.106   | 1.062          | 1.079          |
| Volumen de vacíos (cm <sup>3</sup> )        | 105.395   | 107.905 | 104.141        | 105.813        |
| Porosidad (%)                               | 28.93%    | 28.01%  | 28.14%         | 28.36%         |
|   |           |         | <b>p =</b>     | <b>1079.39</b> |
|   |           |         | <b>P (%) =</b> | <b>28.36%</b>  |

| PARÁMETROS                                  | Muestra F |         |                |               |
|---|-----------|---------|----------------|---------------|
|   | 1         | 2       | 3              | Promedio      |
| Masa seca (g)                               | 376.00    | 356.00  | 382.00         | 371.33        |
| Masa húmeda (g)                             | 477.00    | 452.00  | 485.00         | 471.33        |
| Volumen de la muestra (cm <sup>3</sup> )    | 377.48    | 357.68  | 379.98         | 371.71        |
| Densidad de la muestra (g/cm <sup>3</sup> ) | 0.996     | 0.995   | 1.005          | 0.999         |
| Volumen de vacíos (cm <sup>3</sup> )        | 126.725   | 120.452 | 129.235        | 125.471       |
| Porosidad (%)                               | 33.57%    | 33.68%  | 34.01%         | 33.75%        |
|   |           |         | <b>p =</b>     | <b>998.90</b> |
|   |           |         | <b>P (%) =</b> | <b>33.75%</b> |

## ANEXO 4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA DENSIDAD Y POROSIDAD APARENTE

En este anexo se analizan estadísticamente los valores promedio de los parámetros que incide al cálculo de la densidad y porosidad aparente, con un intervalo de confianza de 95%.

| PARÁMETROS                               | Muestra |        |        |        |        |        |
|--|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
|  | A       | B      | C      | D      | E      | F      |
| Masa seca (g)                            | 543.67  | 432.33 | 550.00 | 490.67 | 403.00 | 371.33 |
| Masa húmeda (g)                          | 606.67  | 494.33 | 640.00 | 588.67 | 487.33 | 471.33 |
| Volumen de la muestra (cm <sup>3</sup> ) | 400.57  | 345.40 | 398.67 | 389.43 | 373.22 | 371.71 |
| Volumen de vacíos (cm <sup>3</sup> )     | 79.05   | 77.79  | 112.92 | 122.96 | 105.81 | 125.47 |

| DENSIDAD  |            |            |            |          |            |             |
|-----------|------------|------------|------------|----------|------------|-------------|
| MUESTRAS  | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 | Promedio | Desviación | Error       |
| A (1 – 4) | 1.324      | 1.367      | 1.381      | 1.357    | 0.02966075 | 0.03356368  |
| B (1 – 5) | 1.260      | 1.248      | 1.246      | 1.251    | 0.00708459 | 0.00801682  |
| C (2 – 4) | 1.337      | 1.430      | 1.371      | 1.380    | 0.04703109 | 0.05321971  |
| D (2 – 5) | 1.261      | 1.273      | 1.244      | 1.259    | 0.01464817 | 0.016575656 |
| E (3 – 4) | 1.070      | 1.106      | 1.062      | 1.079    | 0.02316948 | 0.026218253 |
| F (3 – 5) | 0.996      | 0.995      | 1.005      | 0.999    | 0.00557478 | 0.006308338 |

| POROSIDAD APARENTE |            |            |            |          |            |        |
|--------------------|------------|------------|------------|----------|------------|--------|
| MUESTRAS           | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 | Promedio | Desviación | Error  |
| A (1 – 4)          | 19.43%     | 19.96%     | 19.80%     | 19.73%   | 0.273%     | 0.309% |
| B (1 – 5)          | 22.38%     | 22.27%     | 22.94%     | 22.53%   | 0.361%     | 0.408% |
| C (2 – 4)          | 27.76%     | 28.54%     | 28.68%     | 28.32%   | 0.495%     | 0.560% |
| D (2 – 5)          | 31.64%     | 30.40%     | 32.79%     | 31.61%   | 1.194%     | 1.351% |
| E (3 – 4)          | 28.93%     | 28.01%     | 28.14%     | 28.36%   | 0.497%     | 0.562% |
| F (3 – 5)          | 33.57%     | 33.68%     | 34.01%     | 33.75%   | 0.230%     | 0.260% |

## ANEXO 5. OBTENCIÓN DE DATOS PARA LA SIMULACIÓN DE TRANSFERENCIA DE CALOR

### Muestra A

| Tiempo (min) | Temperatura de la cámara |            |            | Temperatura cara externa |            |            | Diferencia |            |            | Promedio      | Desviación estándar | Error |
|--------------|--------------------------|------------|------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------|---------------------|-------|
|              | Medición 1               | Medición 2 | Medición 3 | Medición 1               | Medición 2 | Medición 3 | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 |               |                     |       |
| 0            | 28.8                     | 29.8       | 29.1       | 28                       | 27         | 26         | 0.8        | 2.8        | 3.1        | <b>2.23</b>   | 1.25                | 1.41  |
| 1            | 31.5                     | 32.5       | 30.9       | 28                       | 27         | 26         | 3.5        | 5.5        | 4.9        | <b>4.63</b>   | 1.03                | 1.16  |
| 2            | 45                       | 44.9       | 42.4       | 28                       | 27         | 26         | 17         | 17.9       | 16.4       | <b>17.10</b>  | 0.75                | 0.85  |
| 3            | 64.2                     | 64.1       | 62.2       | 28                       | 27         | 26         | 36.2       | 37.1       | 36.2       | <b>36.50</b>  | 0.52                | 0.59  |
| 4            | 88.1                     | 87.2       | 86.8       | 28                       | 27         | 26         | 60.1       | 60.2       | 60.8       | <b>60.37</b>  | 0.38                | 0.43  |
| 5            | 112.9                    | 107.3      | 110.6      | 28                       | 27         | 27         | 84.9       | 80.3       | 83.6       | <b>82.93</b>  | 2.37                | 2.68  |
| 6            | 134.5                    | 125.6      | 131.2      | 28                       | 28         | 27         | 106.5      | 97.6       | 104.2      | <b>102.77</b> | 4.62                | 5.23  |
| 7            | 152.5                    | 141.8      | 149.5      | 28                       | 28         | 27         | 124.5      | 113.8      | 122.5      | <b>120.27</b> | 5.69                | 6.44  |
| 8            | 166.5                    | 155.6      | 164.7      | 28                       | 28         | 27         | 138.5      | 127.6      | 137.7      | <b>134.60</b> | 6.08                | 6.87  |
| 9            | 178.1                    | 167.2      | 176.7      | 28                       | 28         | 27         | 150.1      | 139.2      | 149.7      | <b>146.33</b> | 6.18                | 6.99  |
| 10           | 187.8                    | 177.5      | 186.3      | 28                       | 28         | 27         | 159.8      | 149.5      | 159.3      | <b>156.20</b> | 5.81                | 6.57  |
| 12           | 202                      | 194.1      | 202        | 28                       | 28         | 27         | 174        | 166.1      | 175        | <b>171.70</b> | 4.88                | 5.52  |
| 14           | 216                      | 208        | 218        | 29                       | 28         | 27         | 187        | 180        | 191        | <b>186.00</b> | 5.57                | 6.30  |
| 16           | 227                      | 220        | 229        | 29                       | 29         | 28         | 198        | 191        | 201        | <b>196.67</b> | 5.13                | 5.81  |
| 18           | 237                      | 230        | 240        | 29                       | 29         | 28         | 208        | 201        | 212        | <b>207.00</b> | 5.57                | 6.30  |
| 20           | 247                      | 240        | 250        | 30                       | 30         | 29         | 217        | 210        | 221        | <b>216.00</b> | 5.57                | 6.30  |
| 22           | 257                      | 249        | 260        | 31                       | 31         | 30         | 226        | 218        | 230        | <b>224.67</b> | 6.11                | 6.91  |
| 24           | 266                      | 259        | 269        | 32                       | 32         | 31         | 234        | 227        | 238        | <b>233.00</b> | 5.57                | 6.30  |
| 26           | 274                      | 268        | 276        | 33                       | 33         | 32         | 241        | 235        | 244        | <b>240.00</b> | 4.58                | 5.19  |
| 28           | 282                      | 275        | 284        | 35                       | 34         | 33         | 247        | 241        | 251        | <b>246.33</b> | 5.03                | 5.70  |
| 30           | 291                      | 283        | 293        | 36                       | 35         | 34         | 255        | 248        | 259        | <b>254.00</b> | 5.57                | 6.30  |
| 35           | 307                      | 300        | 310        | 40                       | 38         | 37         | 267        | 262        | 273        | <b>267.33</b> | 5.51                | 6.23  |
| 40           | 320                      | 320        | 325        | 44                       | 42         | 40         | 276        | 278        | 285        | <b>279.67</b> | 4.73                | 5.35  |
| 45           | 333                      | 328        | 338        | 47                       | 44         | 43         | 286        | 284        | 295        | <b>288.33</b> | 5.86                | 6.63  |
| 50           | 344                      | 340        | 350        | 50                       | 47         | 46         | 294        | 293        | 304        | <b>297.00</b> | 6.08                | 6.88  |
| 55           | 354                      | 350        | 361        | 52                       | 50         | 48         | 302        | 300        | 313        | <b>305.00</b> | 7.00                | 7.92  |
| 60           | 363                      | 359        | 371        | 54                       | 52         | 51         | 309        | 307        | 320        | <b>312.00</b> | 7.00                | 7.92  |
| 65           | 372                      | 368        | 378        | 56                       | 54         | 53         | 316        | 314        | 325        | <b>318.33</b> | 5.86                | 6.63  |
| 70           | 381                      | 375        | 385        | 58                       | 57         | 56         | 323        | 318        | 329        | <b>323.33</b> | 5.51                | 6.23  |
| 75           | 387                      | 380        | 390        | 60                       | 59         | 58         | 327        | 321        | 332        | <b>326.67</b> | 5.51                | 6.23  |
| 80           | 393                      | 386        | 395        | 62                       | 61         | 61         | 331        | 325        | 334        | <b>330.00</b> | 4.58                | 5.19  |
| 85           | 398                      | 391        | 401        | 64                       | 64         | 63         | 334        | 327        | 338        | <b>333.00</b> | 5.57                | 6.30  |
| 90           | 402                      | 394        | 405        | 66                       | 66         | 64         | 336        | 328        | 341        | <b>335.00</b> | 6.56                | 7.42  |
| 95           | 405                      | 398        | 409        | 68                       | 68         | 66         | 337        | 330        | 343        | <b>336.67</b> | 6.51                | 7.36  |
| 100          | 408                      | 400        | 413        | 70                       | 70         | 68         | 338        | 330        | 345        | <b>337.67</b> | 7.51                | 8.49  |
| 105          | 411                      | 402        | 415        | 72                       | 72         | 70         | 339        | 330        | 345        | <b>338.00</b> | 7.55                | 8.54  |
| 110          | 414                      | 404        | 416        | 74                       | 74         | 73         | 340        | 330        | 343        | <b>337.67</b> | 6.81                | 7.70  |
| 115          | 417                      | 406        | 417        | 77                       | 76         | 74         | 340        | 330        | 343        | <b>337.67</b> | 6.81                | 7.70  |
| 120          | 419                      | 408        | 419        | 81                       | 78         | 76         | 338        | 330        | 343        | <b>337.00</b> | 6.56                | 7.42  |
| 125          | 420                      | 409        | 420        | 84                       | 80         | 78         | 336        | 329        | 342        | <b>335.67</b> | 6.51                | 7.36  |
| 130          | 422                      | 410        | 421        | 87                       | 81         | 80         | 335        | 329        | 341        | <b>335.00</b> | 6.00                | 6.79  |
| 135          | 423                      | 412        | 422        | 92                       | 82         | 82         | 331        | 330        | 340        | <b>333.67</b> | 5.51                | 6.23  |
| 140          | 424                      | 413        | 423        | 94                       | 84         | 84         | 330        | 329        | 339        | <b>332.67</b> | 5.51                | 6.23  |
| 145          | 425                      | 415        | 423        | 98                       | 86         | 87         | 327        | 329        | 336        | <b>330.67</b> | 4.73                | 5.35  |
| 150          | 426                      | 415        | 423        | 101                      | 87         | 88         | 325        | 328        | 335        | <b>329.33</b> | 5.13                | 5.81  |
| 160          | 427                      | 416        | 422        | 105                      | 88         | 88         | 322        | 328        | 334        | <b>328.00</b> | 6.00                | 6.79  |
| 170          | 427                      | 416        | 422        | 107                      | 89         | 89         | 320        | 327        | 333        | <b>326.67</b> | 6.51                | 7.36  |
| 180          | 427                      | 417        | 423        | 108                      | 90         | 90         | 319        | 327        | 333        | <b>326.33</b> | 7.02                | 7.95  |
| 190          | 428                      | 418        | 423        | 109                      | 91         | 91         | 319        | 327        | 332        | <b>326.00</b> | 6.56                | 7.42  |
| 200          | 428                      | 419        | 423        | 110                      | 92         | 91         | 318        | 327        | 332        | <b>325.67</b> | 7.09                | 8.03  |
| 210          | 427                      | 420        | 423        | 111                      | 92         | 92         | 316        | 328        | 331        | <b>325.00</b> | 7.94                | 8.98  |
| 220          | 428                      | 420        | 423        | 111                      | 93         | 92         | 317        | 327        | 331        | <b>325.00</b> | 7.21                | 8.16  |
| 230          | 428                      | 420        | 423        | 112                      | 93         | 93         | 316        | 327        | 330        | <b>324.33</b> | 7.37                | 8.34  |
| 240          | 428                      | 420        | 423        | 112                      | 93         | 93         | 316        | 327        | 330        | <b>324.33</b> | 7.37                | 8.34  |

## Muestra B

| Tiempo (min) | Temperatura de la cámara |            |            | Temperatura cara externa |            |            | Diferencia |            |            | Promedio | Desviación estándar | Error |
|--------------|--------------------------|------------|------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|---------------------|-------|
|              | Medición 1               | Medición 2 | Medición 3 | Medición 1               | Medición 2 | Medición 3 | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 |          |                     |       |
| 0            | 29.8                     | 30.7       | 29.2       | 28                       | 29         | 27         | 1.8        | 1.7        | 2.2        | 1.90     | 0.26                | 0.30  |
| 1            | 33.5                     | 32.9       | 31.3       | 28                       | 29         | 27         | 5.5        | 3.9        | 4.3        | 4.57     | 0.83                | 0.94  |
| 2            | 45.7                     | 44.7       | 43.4       | 28                       | 29         | 27         | 17.7       | 15.7       | 16.4       | 16.60    | 1.01                | 1.15  |
| 3            | 67.2                     | 63.5       | 63.1       | 28                       | 29         | 27         | 39.2       | 34.5       | 36.1       | 36.60    | 2.39                | 2.70  |
| 4            | 88.5                     | 86.6       | 86.3       | 28                       | 29         | 27         | 60.5       | 57.6       | 59.3       | 59.13    | 1.46                | 1.65  |
| 5            | 109.5                    | 107.5      | 107.6      | 28                       | 29         | 28         | 81.5       | 78.5       | 79.6       | 79.87    | 1.52                | 1.72  |
| 6            | 133.9                    | 126.1      | 126        | 28                       | 29         | 28         | 105.9      | 97.1       | 98         | 100.33   | 4.84                | 5.48  |
| 7            | 155.3                    | 142.2      | 141.6      | 29                       | 29         | 28         | 126.3      | 113.2      | 113.6      | 117.70   | 7.45                | 8.43  |
| 8            | 163.3                    | 155        | 155.7      | 29                       | 29         | 28         | 134.3      | 126        | 127.7      | 129.33   | 4.38                | 4.96  |
| 9            | 172.4                    | 166.9      | 166.7      | 29                       | 29         | 28         | 143.4      | 137.9      | 138.7      | 140.00   | 2.97                | 3.36  |
| 10           | 195.1                    | 176.3      | 176.5      | 29                       | 29         | 28         | 166.1      | 147.3      | 148.5      | 153.97   | 10.52               | 11.91 |
| 12           | 202                      | 191.6      | 192.4      | 30                       | 29         | 28         | 172        | 162.6      | 164.4      | 166.33   | 4.99                | 5.65  |
| 14           | 216                      | 204        | 206        | 30                       | 30         | 28         | 186        | 174        | 178        | 179.33   | 6.11                | 6.91  |
| 16           | 228                      | 216        | 217        | 30                       | 30         | 29         | 198        | 186        | 188        | 190.67   | 6.43                | 7.28  |
| 18           | 236                      | 226        | 228        | 31                       | 30         | 29         | 205        | 196        | 199        | 200.00   | 4.58                | 5.19  |
| 20           | 244                      | 236        | 238        | 31                       | 31         | 30         | 213        | 205        | 208        | 208.67   | 4.04                | 4.57  |
| 22           | 255                      | 245        | 250        | 32                       | 31         | 30         | 223        | 214        | 220        | 219.00   | 4.58                | 5.19  |
| 24           | 265                      | 254        | 258        | 33                       | 32         | 31         | 232        | 222        | 227        | 227.00   | 5.00                | 5.66  |
| 26           | 277                      | 263        | 266        | 34                       | 33         | 32         | 243        | 230        | 234        | 235.67   | 6.66                | 7.53  |
| 28           | 285                      | 270        | 275        | 35                       | 34         | 33         | 250        | 236        | 242        | 242.67   | 7.02                | 7.95  |
| 30           | 294                      | 279        | 282        | 36                       | 35         | 34         | 258        | 244        | 248        | 250.00   | 7.21                | 8.16  |
| 35           | 309                      | 295        | 294        | 39                       | 37         | 37         | 270        | 258        | 257        | 261.67   | 7.23                | 8.19  |
| 40           | 323                      | 312        | 315        | 43                       | 40         | 40         | 280        | 272        | 275        | 275.67   | 4.04                | 4.57  |
| 45           | 335                      | 324        | 329        | 45                       | 43         | 43         | 290        | 281        | 286        | 285.67   | 4.51                | 5.10  |
| 50           | 348                      | 336        | 340        | 48                       | 45         | 47         | 300        | 291        | 293        | 294.67   | 4.73                | 5.35  |
| 55           | 358                      | 346        | 351        | 50                       | 48         | 49         | 308        | 298        | 302        | 302.67   | 5.03                | 5.70  |
| 60           | 369                      | 355        | 360        | 52                       | 51         | 52         | 317        | 304        | 308        | 309.67   | 6.66                | 7.53  |
| 65           | 376                      | 361        | 368        | 54                       | 54         | 55         | 322        | 307        | 313        | 314.00   | 7.55                | 8.54  |
| 70           | 385                      | 369        | 375        | 58                       | 56         | 58         | 327        | 313        | 317        | 319.00   | 7.21                | 8.16  |
| 75           | 392                      | 375        | 381        | 60                       | 58         | 60         | 332        | 317        | 321        | 323.33   | 7.77                | 8.79  |
| 80           | 397                      | 380        | 387        | 62                       | 60         | 62         | 335        | 320        | 325        | 326.67   | 7.64                | 8.64  |
| 85           | 403                      | 383        | 391        | 64                       | 62         | 63         | 339        | 321        | 328        | 329.33   | 9.07                | 10.27 |
| 90           | 406                      | 388        | 395        | 66                       | 64         | 65         | 340        | 324        | 330        | 331.33   | 8.08                | 9.15  |
| 95           | 412                      | 391        | 398        | 68                       | 67         | 67         | 344        | 324        | 331        | 333.00   | 10.15               | 11.48 |
| 100          | 417                      | 392        | 401        | 69                       | 68         | 68         | 348        | 324        | 333        | 335.00   | 12.12               | 13.72 |
| 105          | 421                      | 395        | 403        | 71                       | 71         | 69         | 350        | 324        | 334        | 336.00   | 13.11               | 14.84 |
| 110          | 423                      | 396        | 406        | 73                       | 73         | 70         | 350        | 323        | 336        | 336.33   | 13.50               | 15.28 |
| 115          | 426                      | 398        | 407        | 75                       | 74         | 71         | 351        | 324        | 336        | 337.00   | 13.53               | 15.31 |
| 120          | 428                      | 400        | 408        | 77                       | 76         | 72         | 351        | 324        | 336        | 337.00   | 13.53               | 15.31 |
| 125          | 429                      | 402        | 409        | 79                       | 77         | 73         | 350        | 325        | 336        | 337.00   | 12.53               | 14.18 |
| 130          | 430                      | 403        | 410        | 81                       | 78         | 75         | 349        | 325        | 335        | 336.33   | 12.06               | 13.64 |
| 135          | 432                      | 404        | 411        | 83                       | 79         | 76         | 349        | 325        | 335        | 336.33   | 12.06               | 13.64 |
| 140          | 434                      | 406        | 411        | 86                       | 80         | 77         | 348        | 326        | 334        | 336.00   | 11.14               | 12.60 |
| 145          | 435                      | 407        | 412        | 89                       | 81         | 78         | 346        | 326        | 334        | 335.33   | 10.07               | 11.39 |
| 150          | 436                      | 408        | 412        | 92                       | 82         | 79         | 344        | 326        | 333        | 334.33   | 9.07                | 10.27 |
| 160          | 437                      | 411        | 413        | 94                       | 85         | 80         | 343        | 326        | 333        | 334.00   | 8.54                | 9.67  |
| 170          | 437                      | 414        | 413        | 96                       | 87         | 82         | 341        | 327        | 331        | 333.00   | 7.21                | 8.16  |
| 180          | 438                      | 415        | 413        | 97                       | 88         | 84         | 341        | 327        | 329        | 332.33   | 7.57                | 8.57  |
| 190          | 438                      | 417        | 414        | 98                       | 89         | 86         | 340        | 328        | 328        | 332.00   | 6.93                | 7.84  |
| 200          | 438                      | 417        | 414        | 99                       | 90         | 87         | 339        | 327        | 327        | 331.00   | 6.93                | 7.84  |
| 210          | 439                      | 418        | 415        | 100                      | 91         | 88         | 339        | 327        | 327        | 331.00   | 6.93                | 7.84  |
| 220          | 438                      | 418        | 416        | 101                      | 92         | 88         | 337        | 326        | 328        | 330.33   | 5.86                | 6.63  |
| 230          | 439                      | 419        | 417        | 102                      | 93         | 89         | 337        | 326        | 328        | 330.33   | 5.86                | 6.63  |
| 240          | 440                      | 419        | 417        | 102                      | 93         | 89         | 338        | 326        | 328        | 330.67   | 6.43                | 7.28  |

## Muestra C

| Tiempo (min) | Temperatura de la cámara |            |            | Temperatura cara externa |            |            | Diferencia |            |            | Promedio | Desviación estándar | Error |
|--------------|--------------------------|------------|------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|---------------------|-------|
|              | Medición 1               | Medición 2 | Medición 3 | Medición 1               | Medición 2 | Medición 3 | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 |          |                     |       |
| 0            | 31.6                     | 32.5       | 31.2       | 30                       | 32         | 29         | 1.6        | 0.5        | 2.2        | 1.43     | 0.86                | 0.98  |
| 1            | 32.6                     | 34.4       | 32.8       | 30                       | 32         | 29         | 2.6        | 2.4        | 3.8        | 2.93     | 0.76                | 0.86  |
| 2            | 40.3                     | 44         | 42.1       | 30                       | 32         | 29         | 10.3       | 12         | 13.1       | 11.80    | 1.41                | 1.60  |
| 3            | 54.9                     | 60.3       | 58.7       | 30                       | 32         | 29         | 24.9       | 28.3       | 29.7       | 27.63    | 2.47                | 2.79  |
| 4            | 72.3                     | 81.1       | 77         | 30                       | 32         | 29         | 42.3       | 49.1       | 48         | 46.47    | 3.65                | 4.13  |
| 5            | 91.3                     | 101.5      | 94.2       | 30                       | 32         | 29         | 61.3       | 69.5       | 65.2       | 65.33    | 4.10                | 4.64  |
| 6            | 108.7                    | 119.3      | 110.6      | 30                       | 32         | 29         | 78.7       | 87.3       | 81.6       | 82.53    | 4.38                | 4.95  |
| 7            | 123.8                    | 134.8      | 123.5      | 30                       | 32         | 29         | 93.8       | 102.8      | 94.5       | 97.03    | 5.01                | 5.67  |
| 8            | 137.5                    | 147.6      | 135.5      | 30                       | 32         | 29         | 107.5      | 115.6      | 106.5      | 109.87   | 4.99                | 5.65  |
| 9            | 147.7                    | 158.5      | 146        | 30                       | 32         | 29         | 117.7      | 126.5      | 117        | 120.40   | 5.29                | 5.99  |
| 10           | 157.8                    | 166.5      | 155.1      | 30                       | 32         | 29         | 127.8      | 134.5      | 126.1      | 129.47   | 4.44                | 5.03  |
| 12           | 173.1                    | 182.6      | 170.7      | 31                       | 32         | 29         | 142.1      | 150.6      | 141.7      | 144.80   | 5.03                | 5.69  |
| 14           | 187.3                    | 195.3      | 182.5      | 31                       | 32         | 29         | 156.3      | 163.3      | 153.5      | 157.70   | 5.05                | 5.71  |
| 16           | 202                      | 207        | 193.2      | 31                       | 32         | 29         | 171        | 175        | 164.2      | 170.07   | 5.46                | 6.18  |
| 18           | 223                      | 216        | 205        | 31                       | 33         | 30         | 192        | 183        | 175        | 183.33   | 8.50                | 9.62  |
| 20           | 235                      | 225        | 213        | 31                       | 33         | 30         | 204        | 192        | 183        | 193.00   | 10.54               | 11.92 |
| 22           | 244                      | 233        | 221        | 32                       | 33         | 30         | 212        | 200        | 191        | 201.00   | 10.54               | 11.92 |
| 24           | 254                      | 242        | 229        | 32                       | 34         | 31         | 222        | 208        | 198        | 209.33   | 12.06               | 13.64 |
| 26           | 262                      | 249        | 236        | 33                       | 34         | 31         | 229        | 215        | 205        | 216.33   | 12.06               | 13.64 |
| 28           | 270                      | 257        | 244        | 34                       | 35         | 32         | 236        | 222        | 212        | 223.33   | 12.06               | 13.64 |
| 30           | 277                      | 265        | 251        | 35                       | 36         | 33         | 242        | 229        | 218        | 229.67   | 12.01               | 13.59 |
| 35           | 293                      | 279        | 267        | 37                       | 38         | 34         | 256        | 241        | 233        | 243.33   | 11.68               | 13.21 |
| 40           | 309                      | 292        | 281        | 40                       | 40         | 36         | 269        | 252        | 245        | 255.33   | 12.34               | 13.97 |
| 45           | 321                      | 306        | 294        | 43                       | 42         | 39         | 278        | 264        | 255        | 265.67   | 11.59               | 13.12 |
| 50           | 333                      | 316        | 304        | 45                       | 44         | 42         | 288        | 272        | 262        | 274.00   | 13.11               | 14.84 |
| 55           | 341                      | 324        | 313        | 48                       | 46         | 44         | 293        | 278        | 269        | 280.00   | 12.12               | 13.72 |
| 60           | 349                      | 333        | 322        | 50                       | 48         | 47         | 299        | 285        | 275        | 286.33   | 12.06               | 13.64 |
| 65           | 355                      | 342        | 329        | 53                       | 50         | 49         | 302        | 292        | 280        | 291.33   | 11.02               | 12.46 |
| 70           | 363                      | 346        | 335        | 55                       | 52         | 52         | 308        | 294        | 283        | 295.00   | 12.53               | 14.18 |
| 75           | 368                      | 353        | 343        | 57                       | 54         | 54         | 311        | 299        | 289        | 299.67   | 11.02               | 12.46 |
| 80           | 372                      | 358        | 349        | 59                       | 55         | 56         | 313        | 303        | 293        | 303.00   | 10.00               | 11.32 |
| 85           | 376                      | 362        | 355        | 61                       | 56         | 58         | 315        | 306        | 297        | 306.00   | 9.00                | 10.18 |
| 90           | 380                      | 365        | 359        | 62                       | 57         | 59         | 318        | 308        | 300        | 308.67   | 9.02                | 10.21 |
| 95           | 384                      | 369        | 363        | 63                       | 58         | 61         | 321        | 311        | 302        | 311.33   | 9.50                | 10.76 |
| 100          | 387                      | 371        | 366        | 64                       | 59         | 62         | 323        | 312        | 304        | 313.00   | 9.54                | 10.79 |
| 105          | 392                      | 375        | 369        | 65                       | 60         | 63         | 327        | 315        | 306        | 316.00   | 10.54               | 11.92 |
| 110          | 393                      | 377        | 372        | 66                       | 61         | 64         | 328        | 316        | 308        | 317.33   | 10.07               | 11.39 |
| 115          | 394                      | 379        | 374        | 68                       | 62         | 65         | 327        | 317        | 309        | 317.67   | 9.02                | 10.21 |
| 120          | 395                      | 381        | 376        | 69                       | 63         | 66         | 327        | 318        | 310        | 318.33   | 8.50                | 9.62  |
| 125          | 396                      | 383        | 377        | 70                       | 64         | 67         | 327        | 319        | 310        | 318.67   | 8.50                | 9.62  |
| 130          | 397                      | 384        | 379        | 71                       | 65         | 68         | 328        | 319        | 311        | 319.33   | 8.50                | 9.62  |
| 135          | 399                      | 385        | 380        | 72                       | 66         | 69         | 328        | 319        | 311        | 319.33   | 8.50                | 9.62  |
| 140          | 400                      | 386        | 381        | 73                       | 66         | 70         | 328        | 320        | 311        | 319.67   | 8.50                | 9.62  |
| 145          | 401                      | 387        | 382        | 74                       | 67         | 71         | 328        | 320        | 311        | 319.67   | 8.50                | 9.62  |
| 150          | 402                      | 388        | 383        | 75                       | 67         | 72         | 328        | 321        | 311        | 320.00   | 8.54                | 9.67  |
| 160          | 403                      | 389        | 384        | 76                       | 68         | 73         | 328        | 321        | 311        | 320.00   | 8.54                | 9.67  |
| 170          | 404                      | 389        | 385        | 77                       | 69         | 75         | 328        | 320        | 310        | 319.33   | 9.02                | 10.21 |
| 180          | 405                      | 389        | 386        | 78                       | 70         | 77         | 329        | 319        | 309        | 319.00   | 10.00               | 11.32 |
| 190          | 407                      | 389        | 387        | 80                       | 71         | 78         | 327        | 318        | 309        | 318.00   | 9.00                | 10.18 |
| 200          | 407                      | 388        | 388        | 82                       | 72         | 79         | 325        | 316        | 309        | 316.67   | 8.02                | 9.08  |
| 210          | 408                      | 387        | 388        | 83                       | 74         | 80         | 325        | 313        | 308        | 315.33   | 8.74                | 9.89  |
| 220          | 408                      | 387        | 389        | 83                       | 77         | 81         | 325        | 310        | 308        | 314.33   | 9.29                | 10.51 |
| 230          | 409                      | 388        | 389        | 84                       | 78         | 82         | 325        | 310        | 307        | 314.00   | 9.64                | 10.91 |
| 240          | 409                      | 387        | 389        | 84                       | 77         | 83         | 325        | 310        | 306        | 313.67   | 10.02               | 11.33 |

## Muestra D

| Tiempo (min) | Temperatura de la cámara |            |            | Temperatura cara externa |            |            | Diferencia |            |            | Promedio | Desviación estándar | Error |
|--------------|--------------------------|------------|------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|---------------------|-------|
|              | Medición 1               | Medición 2 | Medición 3 | Medición 1               | Medición 2 | Medición 3 | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 |          |                     |       |
| 0            | 29.2                     | 30         | 30.2       | 27                       | 29         | 27         | 2.2        | 1          | 3.2        | 2.13     | 1.10                | 1.25  |
| 1            | 31.3                     | 31.8       | 32.3       | 27                       | 29         | 27         | 4.3        | 2.8        | 5.3        | 4.13     | 1.26                | 1.42  |
| 2            | 43.8                     | 42.5       | 43.8       | 27                       | 29         | 27         | 16.8       | 13.5       | 16.8       | 15.70    | 1.91                | 2.16  |
| 3            | 63.4                     | 61.8       | 63.5       | 27                       | 30         | 27         | 36.4       | 31.8       | 36.5       | 34.90    | 2.69                | 3.04  |
| 4            | 87.5                     | 85.2       | 87.3       | 27                       | 30         | 27         | 60.5       | 55.2       | 60.3       | 58.67    | 3.00                | 3.40  |
| 5            | 112                      | 110.1      | 110.2      | 27                       | 30         | 27         | 85         | 80.1       | 83.2       | 82.77    | 2.48                | 2.80  |
| 6            | 133.6                    | 133        | 131.4      | 27                       | 30         | 27         | 106.6      | 103        | 104.4      | 104.67   | 1.81                | 2.05  |
| 7            | 152.4                    | 151.7      | 151.3      | 27                       | 30         | 27         | 125.4      | 121.7      | 124.3      | 123.80   | 1.90                | 2.15  |
| 8            | 168.5                    | 167.7      | 162.9      | 27                       | 30         | 27         | 141.5      | 137.7      | 135.9      | 138.37   | 2.86                | 3.24  |
| 9            | 179.3                    | 180.5      | 175        | 27                       | 30         | 27         | 152.3      | 150.5      | 148        | 150.27   | 2.16                | 2.44  |
| 10           | 189.2                    | 193.8      | 185.7      | 27                       | 31         | 28         | 162.2      | 162.8      | 157.7      | 160.90   | 2.79                | 3.15  |
| 12           | 203                      | 208        | 203        | 27                       | 31         | 28         | 176        | 177        | 175        | 176.00   | 1.00                | 1.13  |
| 14           | 219                      | 221        | 216        | 28                       | 31         | 28         | 191        | 190        | 188        | 189.67   | 1.53                | 1.73  |
| 16           | 230                      | 235        | 226        | 28                       | 31         | 28         | 202        | 204        | 198        | 201.33   | 3.06                | 3.46  |
| 18           | 240                      | 245        | 238        | 29                       | 32         | 29         | 211        | 213        | 209        | 211.00   | 2.00                | 2.26  |
| 20           | 250                      | 255        | 248        | 29                       | 32         | 29         | 221        | 223        | 219        | 221.00   | 2.00                | 2.26  |
| 22           | 259                      | 265        | 258        | 30                       | 33         | 30         | 229        | 232        | 228        | 229.67   | 2.08                | 2.36  |
| 24           | 268                      | 274        | 267        | 30                       | 34         | 31         | 238        | 240        | 236        | 238.00   | 2.00                | 2.26  |
| 26           | 277                      | 283        | 275        | 31                       | 35         | 32         | 246        | 248        | 243        | 245.67   | 2.52                | 2.85  |
| 28           | 285                      | 291        | 283        | 33                       | 36         | 33         | 252        | 255        | 250        | 252.33   | 2.52                | 2.85  |
| 30           | 293                      | 298        | 292        | 34                       | 37         | 34         | 259        | 261        | 258        | 259.33   | 1.53                | 1.73  |
| 35           | 310                      | 317        | 310        | 36                       | 40         | 37         | 274        | 277        | 273        | 274.67   | 2.08                | 2.36  |
| 40           | 325                      | 333        | 324        | 39                       | 43         | 40         | 286        | 290        | 284        | 286.67   | 3.06                | 3.46  |
| 45           | 339                      | 347        | 337        | 41                       | 46         | 42         | 298        | 301        | 295        | 298.00   | 3.00                | 3.39  |
| 50           | 351                      | 356        | 348        | 44                       | 49         | 45         | 307        | 307        | 303        | 305.67   | 2.31                | 2.61  |
| 55           | 361                      | 366        | 358        | 46                       | 52         | 47         | 315        | 314        | 311        | 313.33   | 2.08                | 2.36  |
| 60           | 373                      | 375        | 367        | 48                       | 54         | 50         | 325        | 321        | 317        | 321.00   | 4.00                | 4.53  |
| 65           | 380                      | 383        | 374        | 50                       | 57         | 52         | 330        | 326        | 322        | 326.00   | 4.00                | 4.53  |
| 70           | 388                      | 389        | 380        | 52                       | 58         | 54         | 336        | 331        | 326        | 331.00   | 5.00                | 5.66  |
| 75           | 394                      | 394        | 386        | 54                       | 60         | 56         | 340        | 334        | 330        | 334.67   | 5.03                | 5.70  |
| 80           | 399                      | 398        | 390        | 56                       | 62         | 58         | 343        | 336        | 332        | 337.00   | 5.57                | 6.30  |
| 85           | 404                      | 403        | 397        | 58                       | 64         | 59         | 346        | 339        | 338        | 341.00   | 4.36                | 4.93  |
| 90           | 409                      | 406        | 400        | 59                       | 66         | 61         | 350        | 340        | 339        | 343.00   | 6.08                | 6.88  |
| 95           | 412                      | 409        | 403        | 61                       | 68         | 62         | 351        | 341        | 341        | 344.33   | 5.77                | 6.53  |
| 100          | 417                      | 414        | 402        | 63                       | 70         | 63         | 354        | 344        | 339        | 345.67   | 7.64                | 8.64  |
| 105          | 420                      | 415        | 404        | 65                       | 72         | 64         | 355        | 343        | 340        | 346.00   | 7.94                | 8.98  |
| 110          | 423                      | 417        | 406        | 66                       | 73         | 65         | 360        | 344        | 341        | 348.33   | 10.21               | 11.56 |
| 115          | 426                      | 419        | 408        | 67                       | 74         | 66         | 362        | 345        | 342        | 349.67   | 10.79               | 12.21 |
| 120          | 429                      | 420        | 410        | 69                       | 75         | 67         | 362        | 345        | 343        | 350.00   | 10.44               | 11.81 |
| 125          | 431                      | 421        | 411        | 70                       | 76         | 68         | 362        | 345        | 343        | 350.00   | 10.44               | 11.81 |
| 130          | 432                      | 424        | 412        | 71                       | 77         | 72         | 362        | 347        | 340        | 349.67   | 11.24               | 12.72 |
| 135          | 433                      | 426        | 413        | 72                       | 78         | 74         | 362        | 348        | 339        | 349.67   | 11.59               | 13.12 |
| 140          | 434                      | 426        | 414        | 74                       | 80         | 76         | 362        | 346        | 338        | 348.67   | 12.22               | 13.83 |
| 145          | 436                      | 426        | 415        | 76                       | 81         | 78         | 362        | 345        | 337        | 348.00   | 12.77               | 14.45 |
| 150          | 438                      | 427        | 416        | 79                       | 83         | 80         | 359        | 344        | 336        | 346.33   | 11.68               | 13.21 |
| 160          | 438                      | 427        | 417        | 83                       | 86         | 82         | 355        | 341        | 335        | 343.67   | 10.26               | 11.61 |
| 170          | 438                      | 428        | 417        | 89                       | 86         | 84         | 347        | 342        | 333        | 340.67   | 7.09                | 8.03  |
| 180          | 436                      | 428        | 418        | 97                       | 90         | 85         | 338        | 338        | 333        | 336.33   | 2.89                | 3.27  |
| 190          | 435                      | 429        | 418        | 104                      | 92         | 87         | 331        | 337        | 331        | 333.00   | 3.46                | 3.92  |
| 200          | 434                      | 428        | 419        | 108                      | 94         | 89         | 326        | 334        | 330        | 330.00   | 4.00                | 4.53  |
| 210          | 434                      | 428        | 419        | 109                      | 95         | 91         | 325        | 333        | 328        | 328.67   | 4.04                | 4.57  |
| 220          | 434                      | 428        | 420        | 110                      | 96         | 92         | 324        | 332        | 328        | 328.00   | 4.00                | 4.53  |
| 230          | 434                      | 428        | 420        | 111                      | 96         | 93         | 323        | 332        | 327        | 327.33   | 4.51                | 5.10  |
| 240          | 434                      | 428        | 420        | 111                      | 97         | 93         | 323        | 331        | 327        | 327.00   | 4.00                | 4.53  |

## Muestra E

| Tiempo (min) | Temperatura de la cámara |            |            | Temperatura cara externa |            |            | Diferencia |            |            | Promedio | Desviación estándar | Error |
|--------------|--------------------------|------------|------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|---------------------|-------|
|              | Medición 1               | Medición 2 | Medición 3 | Medición 1               | Medición 2 | Medición 3 | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 |          |                     |       |
| 0            | 27.1                     | 29         | 26.3       | 25                       | 26         | 25         | 2.1        | 3          | 1.3        | 2.13     | 0.85                | 0.96  |
| 1            | 30.2                     | 32         | 28.8       | 25                       | 26         | 25         | 5.2        | 6          | 3.8        | 5.00     | 1.11                | 1.26  |
| 2            | 43.8                     | 45.6       | 41.5       | 25                       | 26         | 25         | 18.8       | 19.6       | 16.5       | 18.30    | 1.61                | 1.82  |
| 3            | 63.4                     | 65.7       | 62.4       | 26                       | 26         | 25         | 37.4       | 39.7       | 37.4       | 38.17    | 1.33                | 1.50  |
| 4            | 82.4                     | 86.5       | 81.6       | 26                       | 26         | 25         | 56.4       | 60.5       | 56.6       | 57.83    | 2.31                | 2.62  |
| 5            | 99.5                     | 102.8      | 100.2      | 26                       | 26         | 26         | 73.5       | 76.8       | 74.2       | 74.83    | 1.74                | 1.97  |
| 6            | 116                      | 118.7      | 116.2      | 26                       | 26         | 26         | 90         | 92.7       | 90.2       | 90.97    | 1.50                | 1.70  |
| 7            | 131.2                    | 134.9      | 131.2      | 26                       | 26         | 26         | 105.2      | 108.9      | 105.2      | 106.43   | 2.14                | 2.42  |
| 8            | 145.1                    | 147.1      | 143.1      | 26                       | 26         | 26         | 119.1      | 121.1      | 117.1      | 119.10   | 2.00                | 2.26  |
| 9            | 157.3                    | 158.3      | 153.4      | 26                       | 26         | 26         | 131.3      | 132.3      | 127.4      | 130.33   | 2.59                | 2.93  |
| 10           | 164.5                    | 167.9      | 163.2      | 26                       | 26         | 26         | 138.5      | 141.9      | 137.2      | 139.20   | 2.43                | 2.75  |
| 12           | 179.9                    | 184.2      | 178.1      | 26                       | 26         | 26         | 153.9      | 158.2      | 152.1      | 154.73   | 3.13                | 3.55  |
| 14           | 192.4                    | 194.9      | 190.4      | 26                       | 26         | 27         | 166.4      | 168.9      | 163.4      | 166.23   | 2.75                | 3.12  |
| 16           | 206                      | 206        | 203        | 26                       | 27         | 27         | 180        | 179        | 176        | 178.33   | 2.08                | 2.36  |
| 18           | 217                      | 217        | 214        | 26                       | 27         | 28         | 191        | 190        | 186        | 189.00   | 2.65                | 2.99  |
| 20           | 228                      | 225        | 224        | 27                       | 27         | 28         | 201        | 198        | 196        | 198.33   | 2.52                | 2.85  |
| 22           | 236                      | 235        | 233        | 28                       | 27         | 29         | 208        | 208        | 204        | 206.67   | 2.31                | 2.61  |
| 24           | 246                      | 243        | 242        | 29                       | 28         | 30         | 217        | 215        | 212        | 214.67   | 2.52                | 2.85  |
| 26           | 255                      | 252        | 251        | 30                       | 28         | 31         | 225        | 224        | 220        | 223.00   | 2.65                | 2.99  |
| 28           | 264                      | 261        | 261        | 32                       | 29         | 32         | 232        | 232        | 229        | 231.00   | 1.73                | 1.96  |
| 30           | 271                      | 269        | 271        | 33                       | 30         | 33         | 238        | 239        | 238        | 238.33   | 0.58                | 0.65  |
| 35           | 292                      | 289        | 288        | 38                       | 33         | 37         | 254        | 256        | 251        | 253.67   | 2.52                | 2.85  |
| 40           | 307                      | 302        | 303        | 43                       | 36         | 41         | 264        | 266        | 262        | 264.00   | 2.00                | 2.26  |
| 45           | 322                      | 316        | 316        | 48                       | 40         | 44         | 274        | 276        | 272        | 274.00   | 2.00                | 2.26  |
| 50           | 331                      | 327        | 329        | 51                       | 42         | 46         | 280        | 285        | 283        | 282.67   | 2.52                | 2.85  |
| 55           | 341                      | 339        | 338        | 54                       | 44         | 49         | 287        | 295        | 289        | 290.33   | 4.16                | 4.71  |
| 60           | 350                      | 347        | 347        | 55                       | 46         | 51         | 295        | 301        | 296        | 297.33   | 3.21                | 3.64  |
| 65           | 359                      | 356        | 356        | 57                       | 48         | 53         | 302        | 308        | 303        | 304.33   | 3.21                | 3.64  |
| 70           | 366                      | 362        | 363        | 58                       | 50         | 55         | 308        | 312        | 308        | 309.33   | 2.31                | 2.61  |
| 75           | 372                      | 368        | 369        | 59                       | 52         | 57         | 313        | 316        | 312        | 313.67   | 2.08                | 2.36  |
| 80           | 378                      | 373        | 376        | 60                       | 54         | 59         | 318        | 319        | 317        | 318.00   | 1.00                | 1.13  |
| 85           | 383                      | 378        | 381        | 62                       | 56         | 61         | 321        | 322        | 320        | 321.00   | 1.00                | 1.13  |
| 90           | 387                      | 382        | 385        | 64                       | 58         | 63         | 323        | 324        | 322        | 323.00   | 1.00                | 1.13  |
| 95           | 391                      | 386        | 388        | 66                       | 61         | 66         | 325        | 325        | 322        | 324.00   | 1.73                | 1.96  |
| 100          | 394                      | 388        | 391        | 68                       | 63         | 69         | 326        | 325        | 322        | 324.33   | 2.08                | 2.36  |
| 105          | 397                      | 390        | 394        | 70                       | 65         | 72         | 327        | 325        | 322        | 324.67   | 2.52                | 2.85  |
| 110          | 399                      | 393        | 397        | 72                       | 67         | 75         | 329        | 326        | 322        | 325.67   | 3.51                | 3.97  |
| 115          | 401                      | 395        | 399        | 74                       | 69         | 78         | 329        | 326        | 321        | 325.33   | 4.04                | 4.57  |
| 120          | 403                      | 396        | 401        | 77                       | 72         | 80         | 329        | 324        | 321        | 324.67   | 4.04                | 4.57  |
| 125          | 406                      | 398        | 402        | 79                       | 73         | 82         | 328        | 325        | 320        | 324.33   | 4.04                | 4.57  |
| 130          | 407                      | 399        | 404        | 81                       | 75         | 84         | 328        | 324        | 320        | 324.00   | 4.00                | 4.53  |
| 135          | 409                      | 400        | 406        | 84                       | 76         | 86         | 325        | 324        | 320        | 323.00   | 2.65                | 2.99  |
| 140          | 409                      | 401        | 407        | 87                       | 78         | 88         | 323        | 323        | 319        | 321.67   | 2.31                | 2.61  |
| 145          | 410                      | 402        | 408        | 90                       | 80         | 89         | 321        | 322        | 319        | 320.67   | 1.53                | 1.73  |
| 150          | 411                      | 403        | 408        | 93                       | 82         | 90         | 319        | 321        | 318        | 319.33   | 1.53                | 1.73  |
| 160          | 412                      | 404        | 410        | 99                       | 84         | 92         | 314        | 320        | 318        | 317.33   | 3.06                | 3.46  |
| 170          | 413                      | 404        | 411        | 98                       | 86         | 94         | 316        | 318        | 317        | 317.00   | 1.00                | 1.13  |
| 180          | 414                      | 405        | 412        | 103                      | 88         | 95         | 312        | 317        | 317        | 315.33   | 2.89                | 3.27  |
| 190          | 415                      | 405        | 413        | 108                      | 89         | 95         | 307        | 316        | 318        | 313.67   | 5.86                | 6.63  |
| 200          | 416                      | 406        | 413        | 113                      | 90         | 96         | 303        | 316        | 317        | 312.00   | 7.81                | 8.84  |
| 210          | 417                      | 406        | 414        | 117                      | 91         | 96         | 300        | 315        | 318        | 311.00   | 9.64                | 10.91 |
| 220          | 417                      | 406        | 414        | 120                      | 92         | 97         | 297        | 314        | 317        | 309.33   | 10.79               | 12.21 |
| 230          | 418                      | 406        | 414        | 121                      | 92         | 97         | 297        | 314        | 317        | 309.33   | 10.79               | 12.21 |
| 240          | 418                      | 406        | 414        | 121                      | 92         | 97         | 297        | 314        | 317        | 309.33   | 10.79               | 12.21 |

## Muestra F

| Tiempo (min) | Temperatura de la cámara |            |            | Temperatura cara externa |            |            | Diferencia |            |            | Promedio      | Desviación estándar | Error |
|--------------|--------------------------|------------|------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------|---------------------|-------|
|              | Medición 1               | Medición 2 | Medición 3 | Medición 1               | Medición 2 | Medición 3 | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 |               |                     |       |
| 0            | 28.3                     | 28.4       | 28.7       | 28                       | 27         | 28         | 0.3        | 1.4        | 0.7        | <b>0.80</b>   | 0.56                | 0.63  |
| 1            | 31                       | 31.5       | 32.2       | 28                       | 27         | 28         | 3          | 4.5        | 4.2        | <b>3.90</b>   | 0.79                | 0.90  |
| 2            | 43.6                     | 44.3       | 41.6       | 28                       | 27         | 28         | 15.6       | 17.3       | 13.6       | <b>15.50</b>  | 1.85                | 2.10  |
| 3            | 62.7                     | 65.4       | 69.5       | 28                       | 27         | 28         | 34.7       | 38.4       | 41.5       | <b>38.20</b>  | 3.40                | 3.85  |
| 4            | 82.3                     | 84.8       | 82.4       | 28                       | 27         | 28         | 54.3       | 57.8       | 54.4       | <b>55.50</b>  | 1.99                | 2.25  |
| 5            | 99.2                     | 103.6      | 101.3      | 28                       | 28         | 28         | 71.2       | 75.6       | 73.3       | <b>73.37</b>  | 2.20                | 2.49  |
| 6            | 114.7                    | 119.5      | 116.7      | 28                       | 28         | 29         | 86.7       | 91.5       | 87.7       | <b>88.63</b>  | 2.53                | 2.87  |
| 7            | 129.1                    | 135.3      | 136.3      | 28                       | 28         | 29         | 101.1      | 107.3      | 107.3      | <b>105.23</b> | 3.58                | 4.05  |
| 8            | 140.5                    | 146.7      | 144.1      | 28                       | 28         | 29         | 112.5      | 118.7      | 115.1      | <b>115.43</b> | 3.11                | 3.52  |
| 9            | 150.4                    | 158.6      | 156.5      | 28                       | 28         | 30         | 122.4      | 130.6      | 126.5      | <b>126.50</b> | 4.10                | 4.64  |
| 10           | 160                      | 170.8      | 166.8      | 28                       | 28         | 30         | 132        | 142.8      | 136.8      | <b>137.20</b> | 5.41                | 6.12  |
| 12           | 175.7                    | 182.8      | 178.7      | 29                       | 29         | 30         | 146.7      | 153.8      | 148.7      | <b>149.73</b> | 3.66                | 4.14  |
| 14           | 187.6                    | 192.9      | 191.4      | 29                       | 29         | 31         | 158.6      | 163.9      | 160.4      | <b>160.97</b> | 2.70                | 3.05  |
| 16           | 204                      | 205        | 201        | 30                       | 30         | 31         | 174        | 175        | 170        | <b>173.00</b> | 2.65                | 2.99  |
| 18           | 219                      | 215        | 214        | 30                       | 30         | 32         | 189        | 185        | 182        | <b>185.33</b> | 3.51                | 3.97  |
| 20           | 229                      | 224        | 222        | 31                       | 31         | 33         | 198        | 193        | 189        | <b>193.33</b> | 4.51                | 5.10  |
| 22           | 239                      | 233        | 232        | 32                       | 31         | 34         | 207        | 202        | 198        | <b>202.33</b> | 4.51                | 5.10  |
| 24           | 245                      | 243        | 245        | 33                       | 32         | 35         | 212        | 211        | 210        | <b>211.00</b> | 1.00                | 1.13  |
| 26           | 253                      | 252        | 251        | 34                       | 33         | 36         | 219        | 219        | 215        | <b>217.67</b> | 2.31                | 2.61  |
| 28           | 260                      | 261        | 260        | 36                       | 34         | 37         | 224        | 227        | 223        | <b>224.67</b> | 2.08                | 2.36  |
| 30           | 278                      | 271        | 273        | 37                       | 36         | 39         | 241        | 235        | 234        | <b>236.67</b> | 3.79                | 4.28  |
| 35           | 293                      | 292        | 286        | 42                       | 40         | 44         | 251        | 252        | 242        | <b>248.33</b> | 5.51                | 6.23  |
| 40           | 307                      | 303        | 305        | 45                       | 42         | 47         | 262        | 261        | 258        | <b>260.33</b> | 2.08                | 2.36  |
| 45           | 315                      | 314        | 314        | 48                       | 44         | 50         | 267        | 270        | 264        | <b>267.00</b> | 3.00                | 3.39  |
| 50           | 327                      | 324        | 325        | 51                       | 43         | 52         | 276        | 281        | 273        | <b>276.67</b> | 4.04                | 4.57  |
| 55           | 339                      | 333        | 331        | 55                       | 47         | 56         | 284        | 286        | 275        | <b>281.67</b> | 5.86                | 6.63  |
| 60           | 345                      | 347        | 340        | 58                       | 50         | 58         | 287        | 297        | 282        | <b>288.67</b> | 7.64                | 8.64  |
| 65           | 359                      | 356        | 351        | 61                       | 53         | 60         | 298        | 303        | 291        | <b>297.33</b> | 6.03                | 6.82  |
| 70           | 365                      | 360        | 363        | 63                       | 57         | 62         | 302        | 303        | 301        | <b>302.00</b> | 1.00                | 1.13  |
| 75           | 372                      | 367        | 372        | 66                       | 60         | 65         | 306        | 307        | 307        | <b>306.67</b> | 0.58                | 0.65  |
| 80           | 378                      | 372        | 377        | 69                       | 63         | 67         | 309        | 309        | 310        | <b>309.33</b> | 0.58                | 0.65  |
| 85           | 383                      | 377        | 381        | 72                       | 66         | 69         | 311        | 311        | 312        | <b>311.33</b> | 0.58                | 0.65  |
| 90           | 388                      | 384        | 386        | 74                       | 69         | 72         | 314        | 315        | 314        | <b>314.33</b> | 0.58                | 0.65  |
| 95           | 391                      | 387        | 388        | 77                       | 71         | 74         | 314        | 316        | 314        | <b>314.67</b> | 1.15                | 1.31  |
| 100          | 394                      | 389        | 391        | 80                       | 74         | 77         | 314        | 315        | 314        | <b>314.33</b> | 0.58                | 0.65  |
| 105          | 396                      | 391        | 395        | 82                       | 76         | 79         | 314        | 315        | 316        | <b>315.00</b> | 1.00                | 1.13  |
| 110          | 398                      | 394        | 397        | 85                       | 79         | 81         | 316        | 315        | 316        | <b>315.67</b> | 0.58                | 0.65  |
| 115          | 401                      | 395        | 399        | 88                       | 83         | 83         | 315        | 312        | 316        | <b>314.33</b> | 2.08                | 2.36  |
| 120          | 403                      | 397        | 401        | 90                       | 87         | 85         | 316        | 310        | 316        | <b>314.00</b> | 3.46                | 3.92  |
| 125          | 406                      | 398        | 403        | 92                       | 89         | 87         | 315        | 309        | 316        | <b>313.33</b> | 3.79                | 4.28  |
| 130          | 407                      | 399        | 404        | 94                       | 92         | 90         | 315        | 307        | 314        | <b>312.00</b> | 4.36                | 4.93  |
| 135          | 409                      | 400        | 405        | 96                       | 94         | 93         | 313        | 306        | 312        | <b>310.33</b> | 3.79                | 4.28  |
| 140          | 409                      | 401        | 406        | 98                       | 95         | 95         | 312        | 306        | 311        | <b>309.67</b> | 3.21                | 3.64  |
| 145          | 410                      | 402        | 407        | 100                      | 96         | 97         | 311        | 306        | 310        | <b>309.00</b> | 2.65                | 2.99  |
| 150          | 411                      | 403        | 408        | 103                      | 97         | 98         | 309        | 306        | 310        | <b>308.33</b> | 2.08                | 2.36  |
| 160          | 412                      | 404        | 409        | 106                      | 99         | 100        | 307        | 305        | 309        | <b>307.00</b> | 2.00                | 2.26  |
| 170          | 413                      | 405        | 410        | 108                      | 101        | 102        | 306        | 304        | 308        | <b>306.00</b> | 2.00                | 2.26  |
| 180          | 414                      | 406        | 411        | 110                      | 103        | 104        | 305        | 303        | 307        | <b>305.00</b> | 2.00                | 2.26  |
| 190          | 415                      | 407        | 412        | 111                      | 105        | 105        | 304        | 302        | 307        | <b>304.33</b> | 2.52                | 2.85  |
| 200          | 416                      | 408        | 413        | 112                      | 107        | 106        | 304        | 301        | 307        | <b>304.00</b> | 3.00                | 3.39  |
| 210          | 416                      | 409        | 413        | 113                      | 109        | 107        | 303        | 300        | 306        | <b>303.00</b> | 3.00                | 3.39  |
| 220          | 417                      | 410        | 414        | 114                      | 111        | 109        | 303        | 299        | 305        | <b>302.33</b> | 3.06                | 3.46  |
| 230          | 417                      | 410        | 414        | 115                      | 112        | 109        | 302        | 298        | 305        | <b>301.67</b> | 3.51                | 3.97  |
| 240          | 417                      | 411        | 414        | 115                      | 112        | 110        | 302        | 299        | 304        | <b>301.67</b> | 2.52                | 2.85  |

## Aislantes Estufa Enerchía

| Tiempo<br>(min) | Temperatura de la cámara |            |            | Temperatura cara externa |            |            | Diferencia |            |            | Promedio | Desviación<br>estándar | Error |
|-----------------|--------------------------|------------|------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|------------------------|-------|
|                 | Medición 1               | Medición 2 | Medición 3 | Medición 1               | Medición 2 | Medición 3 | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 |          |                        |       |
| 0               | 28.1                     | 28.7       | 28.3       | 28                       | 27         | 28         | 0.1        | 1.7        | 0.3        | 0.70     | 0.87                   | 0.99  |
| 1               | 31.2                     | 31.5       | 31.5       | 28                       | 27         | 28         | 3.2        | 4.5        | 3.5        | 3.73     | 0.68                   | 0.77  |
| 2               | 45.4                     | 44.1       | 42.8       | 28                       | 27         | 28         | 17.4       | 17.1       | 14.8       | 16.43    | 1.42                   | 1.61  |
| 3               | 67                       | 64.6       | 63.2       | 28                       | 28         | 28         | 39         | 36.6       | 35.2       | 36.93    | 1.92                   | 2.17  |
| 4               | 89.9                     | 85         | 82.4       | 28                       | 28         | 28         | 61.9       | 57         | 54.4       | 57.77    | 3.81                   | 4.31  |
| 5               | 108.9                    | 104.1      | 102.5      | 28                       | 28         | 28         | 80.9       | 76.1       | 74.5       | 77.17    | 3.33                   | 3.77  |
| 6               | 127.6                    | 120.1      | 117.7      | 28                       | 28         | 28         | 99.6       | 92.1       | 89.7       | 93.80    | 5.16                   | 5.84  |
| 7               | 143.7                    | 135.3      | 132.4      | 28                       | 28         | 28         | 115.7      | 107.3      | 104.4      | 109.13   | 5.87                   | 6.64  |
| 8               | 155.8                    | 145.3      | 143.8      | 28                       | 28         | 29         | 127.8      | 117.3      | 114.8      | 119.97   | 6.90                   | 7.81  |
| 9               | 165.2                    | 155.3      | 153.4      | 28                       | 29         | 29         | 137.2      | 126.3      | 124.4      | 129.30   | 6.91                   | 7.82  |
| 10              | 173.5                    | 164.5      | 163.5      | 28                       | 29         | 29         | 145.5      | 135.5      | 134.5      | 138.50   | 6.08                   | 6.88  |
| 12              | 187.8                    | 178.7      | 177.9      | 29                       | 29         | 29         | 158.8      | 149.7      | 148.9      | 152.47   | 5.50                   | 6.22  |
| 14              | 200                      | 191.4      | 190.3      | 30                       | 30         | 30         | 170        | 161.4      | 160.3      | 163.90   | 5.31                   | 6.01  |
| 16              | 209                      | 201        | 204        | 30                       | 30         | 32         | 179        | 171        | 172        | 174.00   | 4.36                   | 4.93  |
| 18              | 220                      | 211        | 215        | 31                       | 31         | 33         | 189        | 180        | 182        | 183.67   | 4.73                   | 5.35  |
| 20              | 228                      | 220        | 225        | 32                       | 32         | 35         | 196        | 188        | 190        | 191.33   | 4.16                   | 4.71  |
| 22              | 237                      | 229        | 233        | 33                       | 33         | 36         | 204        | 196        | 197        | 199.00   | 4.36                   | 4.93  |
| 24              | 245                      | 238        | 242        | 34                       | 34         | 37         | 211        | 204        | 205        | 206.67   | 3.79                   | 4.28  |
| 26              | 254                      | 246        | 252        | 35                       | 35         | 38         | 219        | 211        | 214        | 214.67   | 4.04                   | 4.57  |
| 28              | 263                      | 254        | 261        | 36                       | 37         | 39         | 227        | 217        | 222        | 222.00   | 5.00                   | 5.66  |
| 30              | 272                      | 261        | 270        | 37                       | 38         | 40         | 235        | 223        | 230        | 229.33   | 6.03                   | 6.82  |
| 35              | 289                      | 281        | 287        | 39                       | 40         | 43         | 250        | 241        | 244        | 245.00   | 4.58                   | 5.19  |
| 40              | 303                      | 298        | 302        | 42                       | 43         | 46         | 261        | 255        | 256        | 257.33   | 3.21                   | 3.64  |
| 45              | 317                      | 312        | 316        | 45                       | 46         | 49         | 272        | 266        | 267        | 268.33   | 3.21                   | 3.64  |
| 50              | 328                      | 325        | 330        | 48                       | 49         | 52         | 280        | 276        | 278        | 278.00   | 2.00                   | 2.26  |
| 55              | 337                      | 338        | 339        | 50                       | 52         | 54         | 287        | 286        | 285        | 286.00   | 1.00                   | 1.13  |
| 60              | 345                      | 348        | 348        | 53                       | 55         | 56         | 292        | 293        | 292        | 292.33   | 0.58                   | 0.65  |
| 65              | 353                      | 355        | 356        | 55                       | 57         | 58         | 298        | 298        | 298        | 298.00   | 0.00                   | #NUM! |
| 70              | 362                      | 364        | 363        | 57                       | 59         | 60         | 305        | 305        | 303        | 304.33   | 1.15                   | 1.31  |
| 75              | 370                      | 369        | 369        | 59                       | 61         | 61         | 311        | 308        | 308        | 309.00   | 1.73                   | 1.96  |
| 80              | 374                      | 375        | 376        | 61                       | 62         | 62         | 313        | 313        | 314        | 313.33   | 0.58                   | 0.65  |
| 85              | 378                      | 381        | 382        | 63                       | 64         | 63         | 315        | 317        | 319        | 317.00   | 2.00                   | 2.26  |
| 90              | 382                      | 387        | 385        | 64                       | 65         | 64         | 318        | 322        | 321        | 320.33   | 2.08                   | 2.36  |
| 95              | 386                      | 393        | 388        | 66                       | 66         | 65         | 320        | 327        | 323        | 323.33   | 3.51                   | 3.97  |
| 100             | 389                      | 397        | 391        | 67                       | 67         | 66         | 322        | 330        | 325        | 325.67   | 4.04                   | 4.57  |
| 105             | 391                      | 401        | 394        | 68                       | 68         | 67         | 323        | 333        | 327        | 327.67   | 5.03                   | 5.70  |
| 110             | 393                      | 403        | 397        | 69                       | 69         | 68         | 326        | 334        | 329        | 329.67   | 4.04                   | 4.57  |
| 115             | 395                      | 405        | 399        | 71                       | 70         | 69         | 325        | 335        | 330        | 330.00   | 5.00                   | 5.66  |
| 120             | 396                      | 406        | 402        | 73                       | 71         | 71         | 325        | 335        | 331        | 330.33   | 5.03                   | 5.70  |
| 125             | 398                      | 408        | 403        | 74                       | 72         | 72         | 326        | 336        | 331        | 331.00   | 5.00                   | 5.66  |
| 130             | 400                      | 409        | 405        | 75                       | 73         | 74         | 326        | 336        | 331        | 331.00   | 5.00                   | 5.66  |
| 135             | 401                      | 409        | 407        | 76                       | 75         | 76         | 325        | 334        | 331        | 330.00   | 4.58                   | 5.19  |
| 140             | 401                      | 410        | 408        | 76                       | 77         | 78         | 326        | 333        | 330        | 329.67   | 3.51                   | 3.97  |
| 145             | 402                      | 411        | 408        | 77                       | 79         | 80         | 325        | 332        | 328        | 328.33   | 3.51                   | 3.97  |
| 150             | 402                      | 412        | 409        | 78                       | 80         | 83         | 324        | 332        | 326        | 327.33   | 4.16                   | 4.71  |
| 160             | 402                      | 413        | 410        | 79                       | 82         | 84         | 324        | 331        | 326        | 327.00   | 3.61                   | 4.08  |
| 170             | 403                      | 414        | 411        | 80                       | 84         | 85         | 323        | 330        | 326        | 326.33   | 3.51                   | 3.97  |
| 180             | 403                      | 414        | 412        | 81                       | 86         | 86         | 323        | 328        | 326        | 325.67   | 2.52                   | 2.85  |
| 190             | 404                      | 415        | 413        | 83                       | 87         | 87         | 321        | 328        | 326        | 325.00   | 3.61                   | 4.08  |
| 200             | 404                      | 415        | 413        | 85                       | 88         | 87         | 319        | 327        | 326        | 324.00   | 4.36                   | 4.93  |
| 210             | 405                      | 416        | 414        | 86                       | 89         | 88         | 319        | 327        | 326        | 324.00   | 4.36                   | 4.93  |
| 220             | 405                      | 416        | 414        | 86                       | 89         | 88         | 319        | 327        | 326        | 324.00   | 4.36                   | 4.93  |
| 230             | 406                      | 416        | 415        | 87                       | 90         | 89         | 319        | 326        | 326        | 323.67   | 4.04                   | 4.57  |
| 240             | 406                      | 416        | 415        | 87                       | 90         | 89         | 319        | 326        | 326        | 323.67   | 4.04                   | 4.57  |