



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

## **Evaluación de la eficiencia de enfriamiento del follaje ornamental de la planta *Aralia japonica* para exportación**

Trabajo final de graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería de Biosistemas como requisito  
para optar por el grado de

Licenciatura en Ingeniería de Biosistemas

**Gabriel Allan Bach Gutiérrez**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica

2022

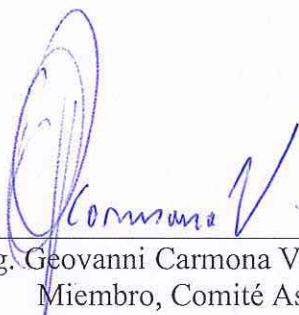
Este Trabajo Final de Graduación fue aceptado por la comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado y título de Licenciatura en Ingeniería de Biosistemas.



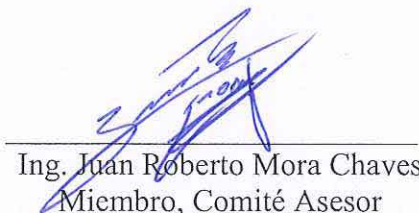
Gabriel Bach Gutiérrez  
Candidato



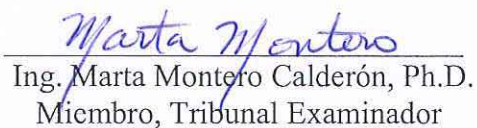
Ing. Mauricio Bustamante Román, Ph.D.  
Director, Trabajo Final de Graduación



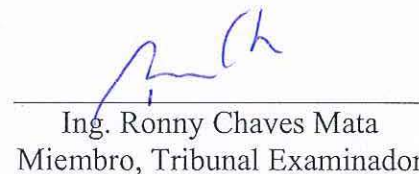
Ing. Giovanni Carmona Villalobos  
Miembro, Comité Asesor



Ing. Juan Roberto Mora Chaves  
Miembro, Comité Asesor



Ing. Marta Montero Calderón, Ph.D.  
Miembro, Tribunal Examinador



Ing. Ronny Chaves Mata  
Miembro, Tribunal Examinador

***Dedicatoria***

Este trabajo final de graduación se lo dedico a mi familia por todo el apoyo durante todo este largo camino de finalizar la carrera con un grado de licenciatura y los amigos que siempre me acompañaron en el proceso.

## *Agradecimientos*

Primeramente quisiera hacer una especial mención para la empresa Agroindustriales de Oreamuno por permitirme el uso de sus instalaciones y de producto a exportar para realizar mi proyecto final de graduación.

Al investigador Umezuruike Linus Opara por las recomendaciones en el análisis de CFD en producto fresco en ANSYS y a Shaimaa Heider por el suministro de datos para calcular el calor de respiración de la Aralia japónica

Al compañero Dennis Elizondo por las varias ayudas en este trabajo final de graduación y a Ana María Sandí y Gloriana Guzmán por el tiempo en ayudarme con practicar la presentación de la defensa



# Índice de Contenidos

DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
<b>ÍNDICE FIGURAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>IX</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	1
1.2 ALCANCE DEL PROYECTO .....	1
1.3 OBJETIVOS DE PROYECTO .....	3
1.3.1 <i>Objetivo General</i> .....	3
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	3
<b>2 MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>4</b>
2.1 GENERALIDADES DE LA PLANTA ORNAMENTAL <i>A. JAPONICA</i> .....	5
2.1.1 <i>Aspectos generales agronómicos</i> .....	5
2.1.2 <i>Cosecha y procesamiento</i> .....	5
2.1.3 <i>Factores que afectan la calidad de la A. japonica</i> .....	6
2.1.4 <i>La enfermedad de Antracnosis</i> .....	6
2.2 REFRIGERACIÓN DEL FOLLAJE COMO CONSERVADOR DE CALIDAD.....	8
2.3 MODELACIÓN DE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN Y EMPAQUE MEDIANTE DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS 12	
2.3.1 <i>Conceptos que gobiernan la modelación computacional de fluidos</i> .....	12
2.3.2 <i>Utilización de CFD en la mejora del enfriamiento de productos frescos</i> .....	14
2.3.3 <i>Condiciones de frontera en CFD en la simulación de un contenedor</i> .....	16
2.3.4 <i>Propiedades térmicas de los productos frescos</i> .....	19
<b>3 METODOLOGÍA.....</b>	<b>22</b>
3.1 CALCULAR LAS PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE LA <i>A. JAPONICA</i> CON EL EMPAQUE UTILIZADO EN LA EMPRESA PARA TENER LAS CONSTANTES REQUERIDAS PARA REALIZAR LA MODELACIÓN DE FLUIDOS COMPUTACIONAL. ....	22
3.1.1 <i>Medición de las propiedades físicas del empaque lleno con hojas de A. japonica</i> .....	22
3.1.2 <i>Medición de propiedades térmicas del empaque lleno con hojas de A.japonica</i> . ....	23
3.2 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE ENFRIAMIENTO DENTRO DEL CONTENEDOR CON EL FOLLAJE PARA LAS CONDICIONES DE EMBALAJE ACTUALES. ....	24
3.2.1 <i>Determinación de las condiciones ambientales a las que se expone el contenedor durante el transporte marítimo</i> .....	25
3.2.2 <i>Comportamiento térmico a través de la capa de aislante térmico</i> . ....	25
3.2.3 <i>Medición de la temperatura interna de los empaques antes de ser embalados</i> . ....	25
3.2.4 <i>Modelación del comportamiento térmico dentro del contenedor</i> . ....	25
3.3 SIMULACIÓN MEDIANTE LA MODELACIÓN COMPUTACIONAL DE FLUIDOS DIFERENTES ORIENTACIONES Y ACOMODO DE LAS CAJAS, CON ELEMENTOS ESPACIADORES ENTRE ELLAS PARA MEJORAR LA TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE EL PRODUCTO Y EL AIRE ENFRIADO. ....	26
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>27</b>

4.1	CALCULAR LAS PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE LA A. JAPÓNICA CON EL EMPAQUE UTILIZADO EN LA EMPRESA PARA TENER LAS CONSTANTES REQUERIDAS PARA REALIZAR LA MODELACIÓN DE FLUIDOS COMPUTACIONAL. ....	27
4.1.1	Medición de las propiedades físicas del empaque lleno con hojas de A. japónica. ....	27
4.1.2	Medición de propiedades térmicas del empaque lleno con hojas de A.japonica. ....	27
4.1.3	Aproximación de la conducción térmica mediante simulación CFD .....	30
4.2	EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE ENFRIAMIENTO DEL FOLLAJE CON LAS CONDICIONES DE EMBALAJE ACTUALES DE MANERA QUE SE PUEDA ESTABLECER LAS CONDICIONES BASE, SIN MEJORAS. ....	35
4.2.1	Determinación de las condiciones ambientales a las que se expone el contenedor durante el transporte marítimo. ....	35
4.2.2	Medición de la temperatura interna inicial de los empaques antes de ser embalados. ....	40
4.2.3	Comportamiento térmico a través de la capa de aislante térmico. ....	40
4.2.4	Modelación del comportamiento térmico dentro del contenedor en las condiciones actuales de embalaje. ....	46
4.3	SIMULAR MEDIANTE LA MODELACIÓN COMPUTACIONAL DE FLUIDOS DIFERENTES ORIENTACIONES Y ACOMODO DE LAS CAJAS, CON ELEMENTOS ESPACIADORES ENTRE ELLAS PARA MEJORAR LA TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE EL PRODUCTO Y EL AIRE ENFRIADO. ....	58
4.3.1	Primera propuesta de mejora .....	58
4.3.2	Segunda propuesta de mejora .....	66
	FIGURA 49. COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE AIRE A TRAVÉS DEL ESPACIO VACÍO ENTRE EL AGLOMERADO DE CAJAS Y LA PARED DEL CONTENEDOR PARA LA OPCIÓN 2. FIGURA SUPERIOR ES UNA TOMA COMPLETA DEL CONTENEDOR Y LA INFERIOR DETALLA EL ESCAPE HACIA ARRIBA DEL AIRE POR EL ESPACIO ENTRE COLUMNAS. ...	70
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>79</b>
5.1	CALCULAR LAS PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE LA A. JAPÓNICA CON EL EMPAQUE UTILIZADO EN LA EMPRESA PARA TENER LAS CONSTANTES REQUERIDAS PARA REALIZAR LA MODELACIÓN DE FLUIDOS COMPUTACIONAL. ....	79
5.2	EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE ENFRIAMIENTO DEL FOLLAJE CON LAS CONDICIONES DE EMBALAJE ACTUALES DE MANERA QUE SE PUEDA ESTABLECER LAS CONDICIONES BASE, SIN MEJORAS. ....	79
5.3	SIMULAR MEDIANTE LA MODELACIÓN COMPUTACIONAL DE FLUIDOS DIFERENTES ORIENTACIONES Y ACOMODO DE LAS CAJAS, CON ELEMENTOS ESPACIADORES ENTRE ELLAS PARA MEJORAR LA TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE EL PRODUCTO Y EL AIRE ENFRIADO. ....	79
<b>6</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>80</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>81</b>
<b>8</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>86</b>

## Índice Figuras

<b>FIGURA 1.</b> FOLLAJE CORTADO DE ARALIA JAPONICA EN LA FINCA AGROINDUSTRIALES DE OREAMUNO .....	6
<b>FIGURA 2.</b> DAÑO PROVOCADO EN LAS HOJAS DE FATSIA JAPONICA A CAUSA DEL HONGO COLLETROTRICHUM SP. EXTRAÍDO DE ABELLETA (18) .....	7
<b>FIGURA 3.</b> REPRESENTACIÓN DE UN CUARTO CON ENFRIAMIENTO FORZADO. FLECHAS AZULES REPRESENTAN EL AIRE FRÍO QUE INGRESA Y LAS FLECHAS ROJAS EL DE SALIDA, CON MAYOR TEMPERATURA DESPUÉS DE HABER PASADO POR LOS EMPAQUES. FUENTE: BALLESTERO(31).....	9
<b>FIGURA 4.</b> EMPAQUE DEL FOLLAJE DE ARALIA JAPONICA SIN LA CUBIERTA DE LA CAJA DE CARTÓN. ....	11
<b>FIGURA 5.</b> CÁMARA DE REFRIGERACIÓN A MÁXIMA CAPACIDAD PREVIO AL EMBALAJE DEL CONTENEDOR. ....	11
<b>FIGURA 6.</b> BANDA DE RODILLOS UTILIZADA PARA CONECTAR LA PUERTA DE DESCARGA DEL CUARTO FRÍO CON EL CONTENEDOR.....	12
<b>FIGURA 7.</b> UBICACIÓN DEL SENSOR COLECTOR TEMPERATURA. TODAS LAS MEDIDAS SON EN MILÍMETROS. ....	23
<b>FIGURA 8.</b> POSICIONAMIENTO DE LAS CAJAS DENTRO DE LA CÁMARA DE ENFRIAMIENTO PARA MEDIR SU PERFIL TÉRMICO DURANTE 24 H, CAJA 1, 2 Y3.....	24
<b>FIGURA 9.</b> MEDICIÓN DE LA CAÍDA DE TEMPERATURA DURANTE 24 HORAS EN LOS EMPAQUES REFRIGERADOS, MIDIENDO EN EL CENTRO GEOMÉTRICO DEL EMPAQUE.....	29
<b>FIGURA 10.</b> CURVA DE TEMPERATURA DE ENFRIAMIENTO DE LA RECÁMARA DE PRE-ENFRÍO DURANTE LAS 24 HORAS DE MEDICIÓN DE CAÍDA DE TEMPERATURA DENTRO DE LA CAJA. ....	30
<b>FIGURA 11.</b> REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA GEOMETRÍA UTILIZADA EN CFD AUTODESK, A) PERFIL DE TEMPERATURA AL TIEMPO CERO Y B) EL PERFIL DE TEMPERATURA AL HABER TRANSCURRIDO 24 H. ....	31
<b>FIGURA 12.</b> CURVAS ENFRIAMIENTO EN LA CAJA 1 PARA CADA CONSTANTE DE CONDUCTIVIDAD SUPUESTA DURANTE 86 400 SEGUNDOS. ....	32
<b>FIGURA 13.</b> CURVAS ENFRIAMIENTO EN LA CAJA 2 PARA CADA CONSTANTE DE CONDUCTIVIDAD SUPUESTA DURANTE 86 400 SEGUNDOS. ....	33
<b>FIGURA 14.</b> CURVAS ENFRIAMIENTO EN LA CAJA 3 PARA CADA CONSTANTE DE CONDUCTIVIDAD SUPUESTA DURANTE 86 400 SEGUNDOS. ....	33
<b>FIGURA 15.</b> REPRESENTACIÓN DEL EMBALAJE DE LAS CAJAS REALIZADO ACTUALMENTE. A) ES LA DISTRIBUCIÓN DE LA PRIMERA FILA DE CAJAS, B) ACOMODO DEL RESTO DE CAJAS EN EL CONTENEDOR Y C) UN DETALLE DE LA ÚLTIMA FILA DE EMBALAJE. ....	36
<b>FIGURA 16.</b> CALOR INCIDENTE SOBRE EL CONTENEDOR EN LA PARED ESTE Y EL TECHO DURANTE 24 H. FUENTE: ARIF ET AL. (46) .....	38
<b>FIGURA 17.</b> TEMPERATURA AMBIENTAL DIARIA EN ARANJUEZ, PUNTARENAS. FUENTE: IMN (55).....	39
<b>FIGURA 18.</b> LECTURA SEMANAL DE TEMPERATURA EN UNA CAJA AISLADA POR OTRAS CAJAS. ....	40
<b>FIGURA 19.</b> ILUSTRACIÓN DE LAS ZONAS DE APLICACIÓN DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA. LAS FLECHAS AZULES REPRESENTAN LA ENTRADA DE AIRE, LAS ROJAS LA SALIDA. LAS DOS ZONAS DELINEADAS EN ROJO REPRESENTAN EL ÁREA DE APLICACIÓN DE CALOR. ....	42
<b>FIGURA 20.</b> CONSTRUCCIÓN DIGITAL DEL ACOMODO EN CONDICIONES ORIGINALES CON LA CAPA DE AISLANTE.....	42
<b>FIGURA 21.</b> UBICACIÓN DE LOS PUNTOS: ①TECHO EXTERNO, ②TECHO INTERNO, ③PARED INTERNA Y ④PARED EXTERNA (A) VISTA ISOMÉTRICA; (B) VISTA FRONTAL. ....	43
<b>FIGURA 22.</b> COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CARA INTERNA Y EXTERNA DEL AISLANTE UBICADO EN LA PARED Y TECHO A PARTIR DE LAS 0 h DEL DÍA. ....	44
<b>FIGURA 23.</b> PERFIL DE TEMPERATURA EN EL PLANO CENTRAL DEL CONTENEDOR A LAS 12 HORAS. ....	45
<b>FIGURA 24.</b> REPRESENTACIÓN DIGITAL DEL ACOMODO ACTUAL DE LAS CAJAS EN EL CONTENEDOR. EL ESPACIO CON AIRE PARA ENFRIAMIENTO SE REPRESENTA CON EL COLOR GRIS Y LAS CAJAS CON COLOR CAFÉ. ....	47
<b>FIGURA 25.</b> REPRESENTACIÓN DEL MODELO ORIGINAL CON UN CORTE EN EL PLANO DE SIMETRÍA. ....	48
<b>FIGURA 26.</b> DIAGRAMA DEL COMPORTAMIENTO DE RESIDUALES PARA LAS ÚLTIMAS 5 000 ITERACIONES DEL MODELO DE ENVÍO EN CONDICIONES ORIGINALES DE EMBALAJE. ....	49
<b>FIGURA 27.</b> COMPORTAMIENTO DEL FLUIDO DE AIRE FRÍO UNA VEZ SE ENCUENTRA COMPLETAMENTE DESARROLLADO. ....	51
<b>FIGURA 28.</b> PERFIL DE TEMPERATURA DEL AIRE EN SU PASO A TRAVÉS DEL ESPACIO VACÍO EN EL CONTENEDOR.....	52



<b>FIGURA 29.</b> VARIANZA DE LA TEMPERATURA DURANTE 20 DÍAS EN EL CENTRO GEOMÉTRICO DEL PLANO DE SIMETRÍA DEL CONTENEDOR Y LA CARA EXTERNA ALEDAÑA A LA PARED PARA LAS CONDICIONES ACTUALES DE EMBALAJE. ....	53
<b>FIGURA 30.</b> DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA EN EL PRODUCTO EMPACADO UNA VEZ FINALIZADO EL TIEMPO DE TRANSPORTE PARA LAS CONDICIONES ORIGINALES DE EMBALAJE. ....	54
<b>FIGURA 31.</b> CONTORNO DE TEMPERATURA EN UN PLANO UBICADO A 1 m DE LAS COMPUERTAS DEL CONTENEDOR. ....	55
<b>FIGURA 32.</b> CONTORNO DE TEMPERATURA EN UN PLANO UBICADO A LA MITAD DEL CONTENEDOR. ....	56
<b>FIGURA 33.</b> CONTORNO DE TEMPERATURA EN UN PLANO UBICADO A 1m DEL FINAL DEL CONTENDOR. ....	56
<b>FIGURA 34.</b> DETALLE DE LOS CONTORNOS DE TEMPERATURA REPRESENTADOS DE LA <b>FIGURA 31 A 33.</b> .....	57
<b>FIGURA 35.</b> REPRESENTACIÓN DEL ESPACIO VACÍO DEL CONTENEDOR, A) EN CONDICIONES ORIGINALES Y B) OPCIÓN 1 DE MEJORA.....	58
<b>FIGURA 36.</b> REPRESENTACIÓN DIGITAL DE LA PROPUESTA DE MEJORA DEL ARREGLO. CUERPO GRIS REPRESENTA EL ESPACIO VACÍO CONTENIDO POR AIRE Y LO CAFÉ EL AGLOMERADO DE PRODUCTO.....	59
<b>FIGURA 37.</b> DIAGRAMA DEL COMPORTAMIENTO DE RESIDUALES PARA LAS ÚLTIMAS 5 000 ITERACIONES DEL MODELO DE LA PRIMERA PROPUESTA DE EMBALAJE .....	59
<b>FIGURA 38.</b> REPRESENTACIÓN DIGITAL DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE AIRE A TRAVÉS DEL ESPACIO VACÍO PARA LA PRIMERA PROPUESTA DE MEJORA DEL ARREGLO. ....	60
<b>FIGURA 39.</b> REPRESENTACIÓN DIGITAL DEL COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DEL FLUIDO A TRAVÉS DEL ESPACIO VACÍO PARA LA PRIMERA PROPUESTA DE MEJORA DEL ARREGLO. ....	61
<b>FIGURA 40.</b> VARIANZA DE LA TEMPERATURA DURANTE 20 DÍAS EN EL CENTRO GEOMÉTRICO DEL PLANO DE SIMETRÍA DEL CONTENEDOR Y LA CARA EXTERNA ALEDAÑA A LA PARED EN LA OPCIÓN 1 DE ACOMODO DE LAS CAJAS EN EL CONTENEDOR. ....	62
<b>FIGURA 41.</b> DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA DEL PRODUCTO EMPACADO UNA VEZ FINALIZADO EL TIEMPO DE TRANSPORTE EN LA CONDICIÓN 1 DE MEJORA. ....	63
<b>FIGURA 42.</b> CONTORNO DE TEMPERATURA EN UN PLANO UBICADO A 1m DE LAS COMPUERTAS DEL CONTENEDOR. ....	64
<b>FIGURA 43.</b> CONTORNO DE TEMPERATURA EN UN PLANO UBICADO A LA MITAD DEL CONTENEDOR. ....	64
<b>FIGURA 44.</b> CONTORNO DE TEMPERATURA EN UN PLANO UBICADO A 1m DEL FINAL DEL CONTENEDOR. ....	65
<b>FIGURA 45.</b> DETALLE DE LOS CONTORNOS DE TEMPERATURA REPRESENTADOS DE LA <b>FIGURA 42 A 44.</b> .....	65
<b>FIGURA 46.</b> RECONSTRUCCIÓN DIGITAL DE LA SEGUNDA PROPUESTA DE MEJORA EN EL ARREGLO. ....	66
<b>FIGURA 47.</b> DIAGRAMA DEL COMPORTAMIENTO DE RESIDUALES PARA LAS ÚLTIMAS 5 000 ITERACIONES DEL MODELO DE LA SEGUNDA PROPUESTA DE EMBALAJE .....	67
<b>FIGURA 48.</b> COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE AIRE A TRAVÉS DEL ESPACIO VACÍO EN LA SEGUNDA PROPUESTA DE MEJORA EN EL ARREGLO DE LAS CAJAS. ....	69
<b>FIGURA 49.</b> COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE AIRE A TRAVÉS DEL ESPACIO VACÍO ENTRE EL AGLOMERADO DE CAJAS Y LA PARED DEL CONTENEDOR PARA LA OPCIÓN 2. FIGURA SUPERIOR ES UNA TOMA COMPLETA DEL CONTENEDOR Y LA INFERIOR DETALLA EL ESCAPE HACIA ARRIBA DEL AIRE POR EL ESPACIO ENTRE COLUMNAS. ....	70
<b>FIGURA 50.</b> COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN EN EL AIRE A TRAVÉS DEL ESPACIO VACÍO ENTRE EL AGLOMERADO DE CAJAS Y LA PARED DEL CONTENEDOR PARA LA OPCIÓN 2 EN LAS PRIMERAS CUATRO COLUMNAS DE ESPACIO ENTRE CAJAS.....	71
<b>FIGURA 51.</b> RECREACIÓN DE VECTORES DEL FLUJO DE AIRE FRÍO EN EL ESPACIAMIENTO ENTRE COLUMNAS DE CAJAS. ....	72
<b>FIGURA 52.</b> ACERCAMIENTO A LOS VECTORES DE FLUJO DE AIRE FRÍO EN UN ESPACIO VACÍO ENTRE COLUMNAS DE CAJAS. REFERIRSE A LA <b>FIGURA 51</b> PARA VER LA UBICACIÓN. ....	73
<b>FIGURA 53.</b> VARIANZA DE LA TEMPERATURA DURANTE 20 DÍAS EN EL CENTRO GEOMÉTRICO DEL PLANO DE SIMETRÍA Y LA CARA EXTERNA ALEDAÑA A LA PARED EN LA OPCIÓN 2 DE ARREGLO DE CAJAS. ....	74
<b>FIGURA 54.</b> DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA DEL PRODUCTO EMPACADO UNA VEZ FINALIZADO EL TIEMPO DE TRANSPORTE EN LA CONDICIÓN 2 DE MEJORA. ....	75
<b>FIGURA 55.</b> CONTORNO DE TEMPERATURA EN UN PLANO UBICADO A 1 m DE LAS COMPUERTAS DEL CONTENEDOR. ....	76
<b>FIGURA 56.</b> CONTORNO DE TEMPERATURA EN UN PLANO UBICADO A LA MITAD DEL CONTENEDOR. ....	76
<b>FIGURA 57.</b> CONTORNO DE TEMPERATURA EN UN PLANO UBICADO A 1 m DEL FINAL DEL CONTENDOR.....	77
<b>FIGURA 58.</b> DETALLE DE LOS CONTORNOS DE TEMPERATURA REPRESENTADOS DE LA <b>FIGURA 55 A 57.</b> .....	77

## RESUMEN

El presente proyecto de graduación se centra en la evaluación de eficiencia de enfriamiento del follaje de *Aralia o Fatsia japonica* para exportación en la empresa Agro-industriales de Oreamuno, ubicada en Oreamuno de Cartago, Costa Rica. Este deviene de la necesidad por parte de la empresa de disminuir la carga química en el producto una vez llega al país destino ya que la empresa se espera posicionar como la única marca orgánica vendedora de estas hojas.

La propuesta para reducir la dependencia de la aplicación de pesticidas en el follaje inició con el cálculo y medición de las propiedades físicas y térmicas del producto; además, la búsqueda de la eficiencia del enfriamiento se basó en la utilización de la modelación computacional de fluidos con la cual se modeló el comportamiento térmico dentro del contenedor marítimo que contenía los empaques con follaje durante el trasiego. Estas modelaciones se realizaron según las condiciones actuales de transporte y con dos propuestas de mejora.

Se encontró que la respiración celular del follaje de la *Fatsia japónica es de*  $24,352 \text{ mg CO}_2/\text{kg} \cdot \text{h}$ , y que la conductividad térmica equivalente para los empaques es de  $0,1243 \text{ W/mK}$ . En la modelación del comportamiento térmico de los empaques, se encontró que la temperatura máxima alcanzada por estos según las condiciones actuales de embalaje fue  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ , que con la primera opción de mejora esta temperatura se pudo ver reducida hasta  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ , y con la segunda opción hasta  $13 \text{ }^\circ\text{C}$ . La temperatura recomendada de transporte de este follaje es de entre  $3\text{--}5 \text{ }^\circ\text{C}$ , por cuanto ninguna de las propuestas presentadas satisface las condiciones térmicas deseadas en su trasiego.

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Justificación

El mercado europeo se ha caracterizado por ser el más exigente en cuanto a los residuos químicos remanentes en los productos vegetales que adquieren, como fungicidas, bactericidas y otros pesticidas ((1). Costa Rica exporta al mercado europeo aproximadamente \$1500 millones anuales en productos agropecuarios, una participación del 31,3% de todo lo exportado en este ámbito en el 2019 (2). Referente a la agricultura, el uso de agroquímicos en Costa Rica aumentó de 65,558 kg/ha en 1961 hasta 641,841 kg/ha en el 2018, con un máximo de 947,619 kg/ha para 1998 (3). El país siendo uno de los mayores consumidores a nivel mundial según la FAO (4), en el puesto ocho según la registrado en el 2018, y Hong Kong el número uno con 3673,9 kg (5). Algunos de estos componentes químicos tienen como objetivo proteger al producto durante el trasiego en los contenedores, ya que es un ambiente de alta humedad y baja cantidad de luz, dos factores que favorecen la reproducción de patógenos; además, es posible encontrar algunos insectos en productos con superficies muy irregulares puesto que por su tamaño les es fácil esconderse, y el proceso de lavado no es suficiente para su remoción, razón por la que se aplican fumigantes nebulizados para evitar un transporte de patógenos al país de exportación. El acceso al mercado internacional puede ser restringido si no se ajusta la producción a una menos apegada a la dependencia de estos plaguicidas (4).

El desplazamiento del uso de químicos para la conservación de la calidad en el transporte debe de hacerse de tal forma que cumpla con los altos requerimientos del mercado actual, y que sea económicamente viable para las empresas, por lo que alternativas deben ser estudiadas para el sector agrícola.

## 1.2 Alcance del proyecto

La empresa Agroindustriales de Oreamuno, en Oreamuno de Cartago, Costa Rica (9°52'49.0"N, 83°52'58.6"W), es productora de frutas, como arándanos, moras, pimientos (comercializados para el consumo interno); y *Aralia o Fatsia japonica* para la exportación de follaje decorativo a Países Bajos.

Actualmente su proceso poscosecha para el follaje es de inmersión en una solución del fungicida Captan®. De seguido, hacen la selección en la cual se desechan hojas con daños, así

formando rollos de diez hojas, colocándoles en bultos de al menos 25 rollos envueltos con plástico no perforado, empacados en cajas de cartón. Esta técnica promueve la humedad dentro de los empaques y evita la deshidratación del follaje. Similar al empaque se realiza en banano, sin embargo, el empaque de este follaje se hace de manera en que no entra aire al envuelto plástico, contribuyendo así a la posible aparición de la enfermedad de Antracnosis en las cajas una vez que llegan a los Países Bajos, por la humedad acumulada.

Debido a la alta humedad, el producto Captan® es eficaz protegiendo el producto durante el trasiego, por lo que la presencia *Antracnosis* sucede con poca frecuencia; sin embargo, presenta una carga química alta, algo desfavorable que a futuro puede representar una desventaja comercial. Es conocido que el hongo que produce la enfermedad de *Antracnosis* crece favorablemente en condiciones climáticas superiores a los 18 °C y humedades relativas mayores al 80% Ali *et al.* (6).

La empresa productora del follaje *Aralia japónica* busca la alternativa de temperaturas bajas para controlar el crecimiento del hongo y disminuir significativamente la carga química al producto. El enfriamiento tiene como meta mantener la temperatura del contenedor a 3 °C, temperatura lo suficiente baja para inhibir el crecimiento del hongo; sin embargo, sin la aplicación del fungicida, la empresa no ha podido controlar la plaga bajo las condiciones actuales.

Por lo tanto; para considerar la estrategia de enfriamiento, se debe de considerar la eficiencia en la reducción y mantenimiento de la temperatura para evitar focos calientes en el contenedor. La disposición de las cajas en el contenedor se ha proyectado como el factor limitante para prevenir que el follaje llegue a temperaturas de almacenaje cercanas a 18 °C, a causa del calor por respiración e ingreso de calor del exterior.

Durante el periodo de transporte, la empresa no puede colocar sensores para medir las temperaturas internas de los empaques, debido a las regulaciones gubernamentales y del comprador, lo que sería un claro indicador de problemas de enfriamiento e insumo para corrección de problemas. Dada esta limitante, se ha propuesto que simulaciones en modelación computacional de fluidos (CFD por sus siglas en inglés) pueda brindar información para caracterizar térmicamente el transporte en condiciones actuales y en caso de que los resultados favorezcan la producción de patógenos, se pueden probar mejoras en futuras simulaciones que aseguren temperaturas no compatibles con la reproducción de los patógenos.

### **1.3 Objetivos de proyecto**

#### **1.3.1 Objetivo General**

El presente proyecto para el trabajo de graduación en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas considera la necesidad de la búsqueda de una alternativa para disminuir la carga química en el follaje de exportación, incrementando la eficiencia de enfriamiento; para lo cual el objetivo general del proyecto es: establecer una metodología de embalaje de *Aralia japonica* la cual asegure temperaturas de enfriamiento para transporte que dificulten el crecimiento del hongo *Antracnosis sp.*

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

El estudio de la metodología de embalaje busca la optimización de la transferencia de calor entre el aire frío del contenedor y las cajas, correspondientemente para la elaboración del objetivo general, tres objetivos específicos se han definido para encontrar una solución al problema planteado:

- I. Calcular las propiedades termofísicas de la *A. japonica* con el empaque utilizado en la empresa para tener las constantes requeridas para realizar la modelación de fluidos computacional.
- II. Evaluar la eficiencia de enfriamiento del follaje con las condiciones de embalaje actuales de manera que se pueda establecer las condiciones base, sin mejoras.
- III. Simular mediante la modelación computacional de fluidos diferentes orientaciones y acomodo de las cajas, con elementos espaciadores entre ellas para mejorar la transferencia de calor entre el producto y el aire enfriado.

## 2 MARCO TEÓRICO

Una sobrecarga residual química en productos vegetales de exportación tradicionalmente se confrontaría con una sustitución del producto utilizado en la poscosecha para proteger el vegetal, o una disminución de la concentración utilizada. Este proyecto se enfoca en disminuir el crecimiento de patógenos propiciando una temperatura de almacenamiento óptima que sea desfavorable para la afloración de esporas del hongo que produce *Antracnosis*.

La *Fatsia japónica*, también conocida como *Aralia japónica* es una planta originaria de Japón y Corea, conocida por su uso como follaje decorativo por sus brillantes y amplias hojas verdes. Es una planta de la familia *Araliaceae* que puede crecer hasta 5 metros de altura en condiciones naturales (en cautiverio promedia 1.8 m). Cuando es cultivada produce atractivas flores blancas y frutos en forma de bayas negras (7).

El efecto de las temperaturas de enfriamiento para la exportación de *A. japonica* puede aliviar la dependencia de los agroquímicos; sin embargo, no hay referencias de estudios realizados de comprobación, tampoco de descripción de sus propiedades termofísicas. Los estudios científicos que se han realizado a especies de este género de plantas circundan un enfoque fitomédico, esto debido a que la especie *A. elata* es utilizada en la medicina china, coreana, japonesa y rusa, con tal peso, que actualmente se encuentra incluida en el Registro de Preparaciones Medicinales de Rusia (8), se le atribuyen beneficios terapéuticos frente a enfermedad crónicas cardiovasculares y diabetes según es mencionado por Xia *et al* (9).

Debido a la falta de información sobre el enfriamiento del follaje a estudiar, es necesario extrapolar el conocimiento desarrollado en la exportación de otros productos vegetales y estudiar algunos de los parámetros que logren describir algunas de sus propiedades termofísicas. Con la caracterización de estas constantes se tendría una sólida base para crear metodologías de embalaje que dificulten la posibilidad de crecimiento de patógenos, al asegurar correctas temperaturas de almacenaje y transporte.

La refrigeración de muchos productos frescos es necesaria para alargar la vida y mantener la calidad con la que se cosecha como indica el USDA (10). La temperatura de almacenaje para flores es óptima a 0 °C, y para algunas plantas ornamentales como orquídeas, heliconias y anturios a 10 °C; utilizar temperaturas entre 5-10 °C puede aumentar hasta en un 50% la vida poscosecha del follaje y flores. Al realizar una comparación entre la respiración del follaje a temperatura

ambiente con otra a 0 °C, se puede aumentar su vida hasta 45 veces según Reid (11). Plantas ornamentales como *Gaultheria shallon* comparten una morfología similar a las de *Fatsia japónica* y ambas son de climas templados, la temperatura de almacenamiento recomendada por el USDA (12) es de -0.5 a 1 °C para la *Gaultheria* y no indica para la *Fatsia* ni otras especies de este mismo género.

## **2.1 Generalidades de la planta ornamental *A. japónica***

### **2.1.1 Aspectos generales agronómicos**

Son plantas que se pueden sembrar directamente entre 90 a 150cm, en suelos un poco ácidos, arcillosos-limosos. Necesitan de sol indirecto por lo cual se cultivan en casas sombra, con sarán. Poco tolerantes a sales en el suelo y moderadamente tolerantes a escasez de agua. Se recomienda podarles para promover nuevos crecimientos basales según Gilman (13).

### **2.1.2 Cosecha y procesamiento**

Su comercialización se realiza como hoja cortada como se muestra en la **Figura 1**, se colectan en campo y son transportadas por carreta hasta la planta de tratamiento, en donde se sumergen en tinas con una solución del fungicida sintético Captan. Después se procede a la separación de hojas que no clasifican como exportables para ser desechables. Tercero, son agrupadas según el tamaño; seguido de un sello del corte en el tallo de la hoja con una cera antifúngica. Finalmente se empacan los rollos en la caja, envueltos por un plástico sin perforaciones. Después de esto se ingresa el producto empacado a la cámara de enfriamiento de la empresa, donde pueden pasar hasta 15 días esperando la llegada del próximo contenedor.



**Figura 1.** Follaje cortado de *Aralia japonica* en la finca Agroindustriales de Oreamuno

### **2.1.3 Factores que afectan la calidad de la *A. japonica***

#### **2.1.3.1 Factores físicos**

Gilman (13) menciona que el factor que afecta principalmente la calidad en las hojas es el sol, ya son muy sensibles a la radiación, causando quemaduras u otras decoloraciones en la hoja. El color de exportación de la hoja debe ser un verde profundo.

#### **2.1.3.2 Factores biológicos**

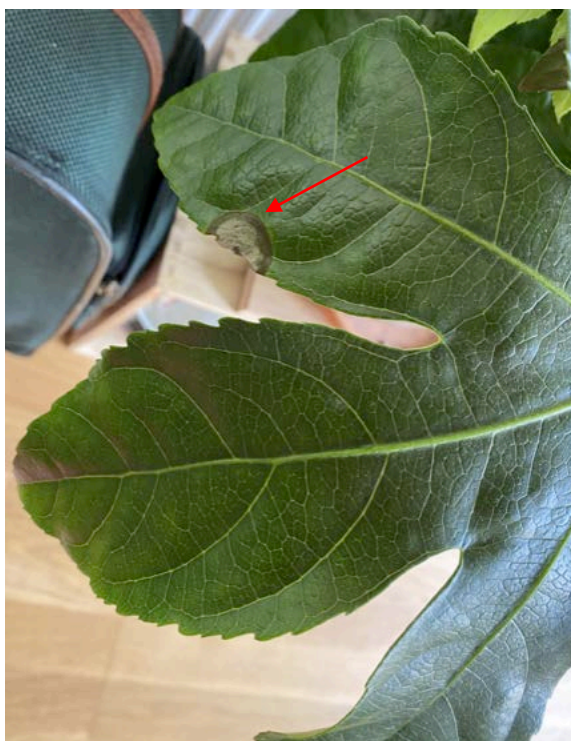
Según Gilman (13), durante la etapa de cultivo, no hay mayores agentes que puedan poner en riesgo la vida de la planta. Beard (14) menciona que existen algunos patógenos que pueden atacar la plantas; tales como insectos como la araña roja, escamas, áfidos y cochinilla; hongos como *Phytophthora* sp. a nivel radicular y *Colletotrichum* sp. en el follaje si no se controla la humedad en el área de cultivo. El hongo de *Colletotrichum*, causante de la enfermedad de *Antracnosis* afecta el follaje de la *Aralia japonica* según investigaciones por Xu *et al.* (15) y Wang (16). Esta enfermedad es la que se presenta en las hojas durante el transporte si no son debidamente tratadas según comentan en la empresa. Para efectos del presente proyecto, el hongo *Colletotrichum* es el crítico y los objetivos planteados serán para inhibir el crecimiento de este.

#### **2.1.4 La enfermedad de *Antracnosis***

Es causada por el hongo de *Colletotrichum* sp.. para su afloramiento requiere de alta



humedad y una temperatura ideal de 27 °C, pero es posible su crecimiento entre 20-25 °C. Su mecanismo de transporte deviene del salpicar entre hojas, siendo el hongo es muy dependiente de esas condiciones climatológicas, de no presentarse, su crecimiento se inhibe según Ali *et al.* (6). Zamora (17) indica temperaturas entre 25 a 30 °C y una humedad relativa por encima del 70% son requeridas para la formación de los conidios, estructura de desarrollo del hongo a partir de la espora. Aunado a esto, describe que el proceso infeccioso requiere 48 horas para la germinación de los conidios y de 72 horas para que el patógeno penetre la cutícula del organismo vegetal. En la **Figura 2** se ilustra el daño que ocasiona dicho hongo.



**Figura 2.** Daño provocado en las hojas de *Fatsia japonica* a causa del hongo *Colletrotrichum sp.* extraído de Abellea (18)

#### **2.1.4.1 Métodos de control tradicionales para *Antracnosis*.**

El método de control tradicional de una plaga se da por control químico, Jiménez (19) se refiere a estos productos como los más comunes por su rapidez y efectividad en el control de plagas, más tiene efectos adversos ambientales, agroecológicos y a la salud de las personas; adicionalmente, inducen en una resistencia de las pestes frente a los agroquímicos. Castillo y Brenes (20) recomiendan para el control de *Antracnosis* el uso de químicos con ingredientes

activos como imizalil, prochloraz, miclobutanil y folpet.

#### **2.1.4.2 Métodos de control alternativos**

Debido a la evolución del mercado europeo, ha sido necesario para las exportadoras de productos frescos buscar alternativas con menores o nulas cargas químicas en los productos alimenticios. Existen tratamientos físicos que permiten eliminar la presencia del hongo en los productos frescos procesados en poscosecha; sin embargo, estos solo eliminan la existencia de patógenos en el momento y no se garantiza que se evite la llegada de nuevos patógenos; estos organismos indeseados pueden llegar a las hojas después de desinfectarse por superficies sucias como mesas de trabajo o herramientas de corte. Entre las opciones de desinfección se encuentran tratamientos con agua a alta temperatura, con ultrasonido y rayos UV según investigaron Vilaplana *et al.* (21) para desinfectar bananos orgánicos, y agua a media temperatura en desinfección de hojas de espinaca Glowacz *et al.* (22) por cuanto sí es posible tratamiento térmico en follajes para su saneamiento poscosecha.

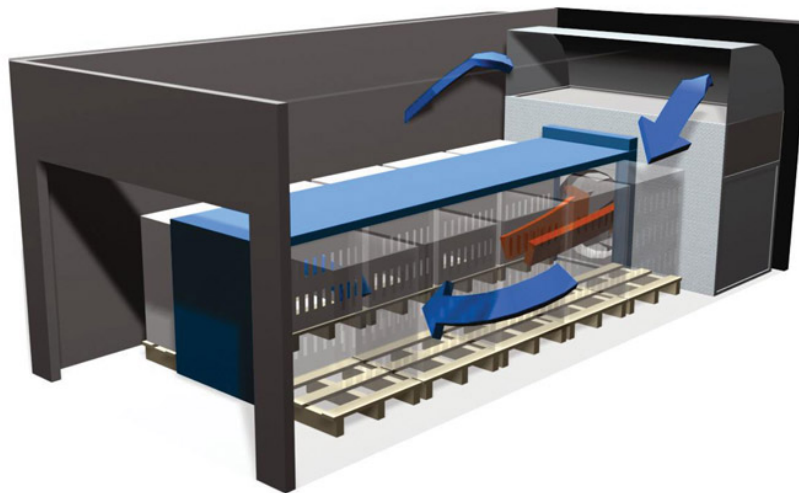
Las opciones que permiten una desinfección al momento del lavado en planta del producto, y proveen de protección durante el transporte, involucran generalmente un impregnado en una dilución con productos antifúngicos. Entre las selecciones no originadas de derivados sintéticos se encuentran: uso de extractos de menta según Braga *et al.* (23), tomillo, lavanda, romero, albahaca y toronja en papaya según Vilaplana *et al.* (24); estos mismos extractos son aplicables a otros productos frescos como aguacate. Todos coinciden que entre estos aceites esenciales el más eficaz es el extraído del tomillo. Otros derivados naturales utilizados son el quitosano y la goma arábica como menciona Maqbool *et al.* (25). Además, existen métodos de control con atmósferas modificadas que utilizan metil jasmonato o silicato en aguacate según Glowacz *et al.* (26), en jocote y mango según Valverde (27), asimismo el uso de óxido nítrico en pithaya según Hu *et al.* (28). El procedimiento menos común es con microorganismo benéficos sin embargo los protocolos de aplicación no son prácticos para una empresa exportadora indica Lopes *et al.* (29).

## **2.2 Refrigeración del follaje como conservador de calidad**

La conservación de la calidad del producto fresco cosechado inicia con su cosecha, esta debe de ser en los periodos más frescos del día. Además, se debe reducir el tiempo entre la cosecha y el enfriamiento, ya que una vez que el producto es cosechado, su respiración celular incrementa,

propulsora de maduración y pérdida de calidad de lo colectado según se dice en USDA (12). El objetivo del enfriamiento del producto fresco cosechado es disminuir la respiración celular hasta la menor temperatura posible sin que ocurran daños por frío. Existen varios métodos de enfriamiento en planta de producto fresco como convección forzada, cuartos fríos, enfriamiento por baños fríos, enfriamiento al vacío y también cuando no se hace enfriamiento en planta por falta de instalaciones y se enfría el producto durante el transporte en contenedores marítimos. (30)

La convección forzada obliga al aire frío a pasar a través de los empaques con producto cuando los empaques tienen perforaciones, de no ser así, se busca crear espaciamentos entre las cajas apiladas para lograr que el aire frío pase por el perímetro de los empaques. Es posible forzar que el aire pase por estos espacios al cubrir el grupo de cajas con lona como se ve en **Figura 3** y proveer de una salida de regreso al evaporador que obligue al aire a atravesar las cajas. En el enfriamiento de cuartos fríos el aire no se fuerza a pasar por los espacios entre las cajas, por lo que incurre en un mayor tiempo de enfriamiento.



**Figura 3.** Representación de un cuarto con enfriamiento forzado. Flechas azules representan el aire frío que ingresa y las flechas rojas el de salida, con mayor temperatura después de haber pasado por los empaques. Fuente: Ballester(31)

En enfriamiento con agua fría, es posible enfriar el producto realizando la inmersión del producto en tinas o por rocío con agua a baja temperatura. Esto se puede usar en productos que sean tolerantes a humedecerse y cloro, ya que es común de usarse en enfriamiento con agua fría según Kitinoja y Kader (32). Este método consigue disminuir con mayor rapidez la temperatura que los métodos que se basan en aire frío ya que el agua es un mejor transmisor de calor. Las

duchas con agua fría son más eficientes que las inmersiones debido a la rapidez del agua a través del producto fresco, USDA (12)

Cuando se realiza enfriamiento al vacío, agua se evapora rápidamente y se dice que una disminución del 1% de la humedad causa una reducción en 6 °C del producto. Para evitar la pérdida de peso por deshidratación se incorporan rociadores en los equipos de sellado. En el enfriamiento de legumbres con este método, el tiempo que se demora en alcanzar la temperatura de almacenamiento es de entre 20 a 30 minutos según se dice por el USDA (12).

Hay localidades de empresas las cuales no tienen facilidades para realizar pre-enfriamiento de productos, en estos casos es posible realizar el enfriamiento durante el transporte, dentro de los contenedores marítimos. Esto es posible realizarlo en frutas como bananos que tienen una baja temperatura de almacenamiento (13 °C) o naranjas que tienen una baja respiración celular ( $2 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ ). En el llenado de los contenedores con estos empaques se debe procurar cubrir todo el piso para evitar el ascenso prematuro de aire frío, de regreso al evaporador, USDA (12).

La empresa cuenta con una cámara de refrigeración destinada para el enfriamiento de las cajas con *Aralia japonica*; en esta se ingresa producto constantemente durante toda la jornada de trabajo. El tiempo que conlleva llenar un contenedor de 12 m es de dos semanas laborales en las que se empaca todos los días, de lunes a viernes. El enfriamiento que se hace en estas cajas se da por convección forzada en el cuarto frío; sin embargo, las hojas se enfrían por conducción ya que la envoltura plástica dentro de la caja no permite el contacto del follaje con el aire frío. En la **Figura 4** se observa como las hojas son completamente envueltas por una cobertura plástica, no permitiendo la entrada de aire frío y disminuyendo el escape de humedad. En la **Figura 5** se detalla el acomodo de las cajas en el cuarto de refrigeración.



**Figura 4.** Empaque del follaje de *Aralia japónica* sin la cubierta de la caja de cartón.



**Figura 5.** Cámara de refrigeración a máxima capacidad previo al embalaje del contenedor.

El proceso de carga de las cajas en el contenedor toma alrededor de 90 minutos según indica la empresa (contenedor sin preenfriar); además, hay una importante distancia entre la puerta del cuarto frío a la zona de llegada del camión, por lo que no es posible con las condiciones actuales, lograr una cadena completa de frío de la cámara al camión. En el transporte los evaporadores del contenedor están programados para mantener una temperatura de 2.7 °C. En la **Figura 6** se ilustra esta distancia mencionada anteriormente.



**Figura 6.** Banda de rodillos utilizada para conectar la puerta de descarga del cuarto frío con el contenedor.

### 2.3 Modelación de sistemas de refrigeración y empaque mediante dinámica computacional de fluidos

Mediante el uso de la modelación computacional de fluidos (CFD) es posible simular el comportamiento de la transferencia de calor en un contenedor frigorífico para el transporte de productos perecederos. CFD es un método que, con la ayuda de computadoras, realiza predicciones basado en ecuaciones de balance de masa, energía y de momento, conocido como las ecuaciones de Navier-Stokes. El nivel de precisión en el modelado y el uso computacional es un balance que se debe realizar según el problema específico que se quiera resolver, si no, se realizan simplificaciones al modelo como indica Hu (33).

#### 2.3.1 Conceptos que gobiernan la modelación computacional de fluidos

Las ecuaciones de Navier-Stokes se obtienen de la conservación de masa, momento y energía de los fluidos. Esta se aplica en flujos a presión, caudal, densidad y temperatura constantes. La ecuación se obtiene al tomar el movimiento del fluido en el tiempo basado en la velocidad de este (34).

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\delta U}{\delta t} + \nabla \cdot (U \otimes U) - \nabla \cdot \left( \left( \frac{\nu + \nu_t}{\rho_a} \right) \nabla U \right) - S_U + \frac{1}{\rho_a} \nabla_p = 0 \quad (2)$$

$$\rho_a C_p a \left( \frac{\delta T_a}{\delta t} + U \cdot \nabla T_a \right) - \nabla \cdot ((\kappa_a + \kappa_t) \nabla T_a) - Q = 0 \quad (3)$$

con  $U$  siendo el vector de velocidad ( $m/s$ ),  $t$  el tiempo ( $s$ ),  $\nu$  la viscosidad dinámica ( $kg/ms$ ),  $\nu_t$  la viscosidad de Eddy ( $kg/m \cdot s$ ),  $p$  la presión (Pa),  $S_U$  cualquier fuente de momento en el fluido ( $m/s^2$ ),  $C_{pa}$  el calor específico del aire ( $J/kgK$ ),  $\rho_a$  es la densidad del aire ( $kg/m^3$ ),  $T_a$  la temperatura del aire (K),  $\kappa_a$  la conductividad térmica del aire ( $W/mK$ ) y  $\kappa_t$  la conductividad térmica turbulenta del aire ( $W/mK$ ).

En modelos de CFD es necesario describir la geometría del volumen de control para analizar el efecto que tiene en el fluido. En ocasiones es necesario realizar simplificaciones a dicha recreación gráfica, haciendo las figuras menos complejas o aplicando cortes de simetría al cuerpo, esto para reducir el tiempo de cálculo computacional. En algunos modelos turbulentos una manera de reducir el tiempo de cálculo para encontrar una solución es, en lugar de recrear toda la geometría, se encuentra una porosidad equivalente del cuerpo que pueda asemejar la caída de presión de aire por el paso de este a través del cuerpo, según menciona Hoang *et al.* (35). Esta porosidad es un término que se añade en las ecuaciones de Navier Stokes, como un término a la ecuación de momento, y se da en Hoang *et al.* (35) por la ecuación 4:

$$S_{PM,i} = -\frac{\mu_f}{K} \mu_i - \rho_f \frac{F}{\sqrt{K}} |\mu| \mu_i \quad (4)$$

siendo,  $i$  la dirección del vector,  $\mu$  la viscosidad dinámica ( $kg/ms$ ),  $\rho$  la densidad del aire ( $kg/m^3$ ),  $K$  siendo el coeficiente de permeabilidad y  $F$  el coeficiente de Forchheimer.

En la modelación computacional de fluidos existen varios modelos que describen la turbulencia, la precisión de cada modelo depende de que tan turbulento sea el flujo con el que se esté trabajando. En modelos de alta turbulencia el modelo SST  $\kappa - \omega$ , hecho por Menter (36) es el más aceptado. Este resulta de una combinación del modelo  $\kappa - \omega$  y  $\kappa - \epsilon$ , y Shear Stress Transport (SST). En modelación CFD en contenedores frigoríficos con producto fresco, Han *et al.* (37) realiza una comparación entre los modelos standard  $k - \epsilon$ ,  $RNGk - \epsilon$ , Realizable  $k - \epsilon$ , standard  $k - \omega$ ,  $SSTk - \omega$  y RSM, hallando resultados semejantes a las investigaciones descritas por Getahun *et al.* (38) y Majid *et al.* (39), en las que se encuentra que el algoritmo  $SST k - \omega$  es el que mejor se ajusta, seguido del modelo Realizable  $k - \epsilon$  y  $RNGk - \epsilon$ , en ese orden.

En modelación de CFD a la hora de realizar simulaciones, además de realizar la reconstrucción digital del cuerpo a analizar y describir las propiedades de los materiales dentro de los cuerpos dentro del modelo, se deben de incluir condiciones de frontera que definan las condiciones a las cuales se va a exponer el diseño. Esto puede incluir una condición de velocidad de entrada del flujo o presión de salida del mismo, temperatura inicial de los cuerpos, flujo de calor hacia el sistema o generación de calor dentro del mismo.

### **2.3.2 Utilización de CFD en la mejora del enfriamiento de productos frescos**

Los productos de origen agrícola requieren de un transporte a una temperatura y humedad determinadas que permitan mantener la calidad, de manera en que se reduzca su tasa de respiración, así logrando un alargamiento de su vida útil. Las variables para considerar en estos modelos son en su mayoría la caída de presión y el caudal del aire. Para hacer análisis de CFD es posible hacer simplificaciones con el fin de ahorrar el recurso computacional, ya sea la geometría que se analiza, el número de elementos en la discretización o la escala del análisis. Con el fin de acelerar el tiempo de análisis, es pertinente variar el tamaño de malla, de tal manera que se use gran detalle en los empaques para conocer su temperatura, y menor en los pasos de aire Delele *et al.* (40).

#### **2.3.2.1 Mejora de empaques con productos vegetales utilizando CFD**

El empaque del producto tiene un gran impacto para alargar la vida útil en la exportación ya que provee de protección contra agentes externos, como daños por aplastamiento, quemaduras por contacto con aire frío y alta humedad que previene la deshidratación de las hojas cortadas de *A. japonica*.

En el rediseño de un empaque para la exportación de kiwi, Sullivan *et al.* (41) recalca que, al modificar el área de las ventilas en una caja, la caída de presión se verá modificada; esto produce una variación en el caudal del fluido. Si la caída de presión se mantiene, se aumenta la cantidad de aire frío que pasa por las ventilas; si se mantiene el caudal, la capacidad de refrigeración será la misma, por cuanto, con la misma capacidad de refrigeración se obtendrá un mejor enfriamiento en las cajas. Su propuesta de mejora de diseño fue efectiva obteniendo el mismo caudal, de 0,25 *L/kgs* con una caída de presión de 76 Pa, un 25 % menor a lo requerido en el diseño original. Este menor diferencial de presión requerido se transfiere a un menor tiempo para llegar al tiempo de la



mitad de enfriamiento y un ahorro energético de 12,1 kWh/semana.

El diseño de un empaque debe ser específico para cada producto, ya que cada uno cuenta con diferentes geometrías. A la hora de crear una caja para un producto perecedero se debe considerar la cantidad de ventilas que esta tenga, a mayor cantidad, menor tiempo de enfriamiento; sin embargo, se debilita su resistencia al peso. Para evitar que esto pase se recomienda dejar un espacio entre las perforaciones y vértices de al menos 60 mm según Han *et al.* (42). Lograr un buen balance entre ambos puede disminuir las diferencias de temperatura. Han *et al.* (42) logra con CFD mejorar la transferencia de calor a través de empaques para manzanas disminuyendo el delta de temperatura de 8 °C a 2,5 °C dentro de las cajas.

### **2.3.2.2 Modelación de CFD en contenedores con producto fresco**

Es importante en un contenedor encontrar un arreglo el cual busque la mayor homogeneidad de temperatura y humedad en el embarque, ya que variaciones en temperatura pueden causar condensación del vapor de agua, lo cual aumenta el riesgo del afloramiento de microorganismos según Majid *et al.* (39). Han *et al.* (42) utilizan un modelo para tratar a todo el empaque como un medio poroso y facilitar la complejidad de los cálculos de CFD. El estudio realizado por Getahun *et al.* (38) para conocer la eficacia del diseño del enfriamiento que se aplica en los contenedores, evalúa como se transfiere el flujo frío de aire a través de las columnas de cajas y entre las cajas; haciendo uso de CFD se puede evaluar el efecto de la distribución de las tarimas en un contenedor, además del acomodo de las cajas como su diseño. En Getahun *et al.* (38) encuentran que a una distribución escalonada de 25 cm de separación se produce más turbulencia, dado por un incremento en el coeficiente de convección, ocasionando una disminución en el tiempo al que se alcanza la temperatura de pre enfriamiento deseada en un 38% .

En una investigación desarrollada en dos partes por Getahun *et al.* (38) y (43), para evaluar la eficiencia de un empaque de manzanas y el flujo de aire vertical en dichos empaques, construyen un modelo descriptivo del flujo de aire y la producción de frío en un contenedor, para luego corroborar lo modelado en un contenedor real. En Getahun *et al.* (38) encuentran que las diferencias entre el modelo realizado por CFD respecto a la validación que se hizo en un contenedor real mostró diferencias de 0,5 °C menor que los 4,5 °C reales para el tiempo de enfriamiento medio, y 0,3 °C menor que 1 °C para el tiempo a los 7/8 de la temperatura, confirmando la validez del modelo. La segunda parte Getahun *et al.* (43) , compara tres empaques

con diferentes porcentajes de ventilación, 0%, 0,25% y 3,5% de su área. Para estos, el lapso para llegar a la mitad del tiempo de enfriamiento fue similar para los tres; sin embargo, para los 7/8 fue de aproximadamente 15 h menor en el caso de mayor ventilación.

En la actualidad, simular un contenedor en condiciones reales con enfriamiento por convección forzada; recrear cada caja con frutos y las 21 paletas llenas de producto, demanda un recurso computacional extremadamente alto. Por esto se realizan simplificaciones en las que se considera cada caja como un medio sólido poroso Hoang *et al.* (35), con el fin de acelerar el tiempo de cálculo, teniendo mayor simetría en el sistema, garantizando una forma de malla más sencilla. En esta investigación también se encuentra que el modelo SST  $k - \omega$  es la mejor opción cuando se combina con cuerpos porosos. En este ensayo encontraron menores temperaturas por paleta en un modelo de cuerpo sólido y mayores para la consideración porosa. Cabe resaltar que en este análisis consideraron la velocidad vertical del viento como 0 m/s, por cuanto se puede decir según lo encontrado en Getahun *et al.* (43) que de haberse supuesto, es posible que se obtenga un mejor modelo.

### 2.3.3 Condiciones de frontera en CFD en la simulación de un contenedor

A la hora de realizar una modelación computacional de fluidos se requiere de definir las condiciones de frontera que van a fungir como variables dentro del modelo. En CFD se debe definir la condición de entrada y de salida del fluido, así como incluir fuentes de calor en caso de que se requiera conocer el comportamiento térmico de las partes y como interactúan con el fluido.

Cuando se realizan modelaciones CFD para conocer el comportamiento térmico de un contenedor, se debe incluir dentro de las condiciones de frontera el flujo de calor proveniente del exterior, por condiciones ambientales. Asumiendo equilibrio térmico local entre los sólidos porosos (aproximaciones a las cajas) y el aire frío, Getahun *et al.* (38) plantea las ecuaciones de transferencia de calor en un contenedor.

$$(\rho C)_m \frac{\delta T}{\delta t} + (\rho C)_f V \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_m \nabla T) + Q_m \quad (5)$$

$$k_m = (1 - \varphi)k_p + \varphi k_f \quad (6)$$

$$(\rho C)_m = (1 - \varphi)(\rho C)_p + \varphi(\rho C)_f \quad (7)$$

donde, m es el medio poroso, f el aire, p el fruto, ( $\rho C$ ) la capacidad de calor por unidad de volumen ( $kJ/m^3 \cdot ^\circ C$ ),  $\varphi$  la porosidad, k la conductividad térmica ( $W/m \cdot ^\circ C$ ), V la velocidad del viento ( $m/s$ ), T la temperatura ( $^\circ C$ ), t el tiempo (s) y Q el calor (W).

Por otra parte, existen ecuaciones que proponen la transferencia de calor para sistemas estacionarios; tal que, el balance de energía para cualquier punto de superficie es propuesto por Alptekin *et al.* (44), dado por la ecuación:

$$q_{entrada} = \alpha I_{solar} - \sigma \epsilon (T_s^4 - T_{cielo}^4) - h_\infty (T_s - T_\infty) \quad (8)$$

siendo,  $q_{entrada}$  el calor de entrada por metro cuadrado ( $W/m^2$ ),  $\alpha$  siendo la difusividad térmica,  $I_{solar}$  la incidencia solar ( $W/m^2$ ),  $\sigma$  la constante de Stephan-Boltzman ( $W/m^2 K^4$ ),  $h_\infty$  la convección en el ambiente ( $W/m^2 K$ ), s la superficie e infinito el ambiente y T la temperatura (K).

Según Çengel (45) y Arif *et al.* (46) el flujo total de calor para un sistema estacionario se da por:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (9)$$

siendo, U ( $W/m^2 K$ ) la resistencia equivalente a la conducción, A ( $m^2$ ) el área total de transmisión de calor, y  $\Delta T(K)$  el cambio de temperatura respecto al ambiente exterior e interior. El flujo total de calor se considera por Arif *et al.* (46) solo como aquel por las paredes laterales del contenedor; el flujo de calor se considera despreciable por las puertas y el fondo del contenedor debido al espesor de las paredes. Si se toma por separado el flujo de calor a través de las paredes a considerar,

$$Q_{total} = 2 \cdot Q_{paredes} + Q_{techo} \quad (10)$$

Con Q igual a la transferencia de calor en watts.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{rad}} + \frac{1}{h_{C.N}} + \frac{1}{h_{C.F}} + \sum \frac{x_i}{k_i}} \quad (11)$$

Tal que  $h_{rad}$ ,  $h_{C.N}$ ,  $h_{C.F}$  se refieren a la resistencia a la transferencia de calor por radiación, convección natural, convección forzada respectivamente y la sumatoria  $x_i/k_i$  a la resistencia de cada material a la transferencia de calor por conducción. Sus componentes se dan por;  $h_{rad}$ :

$$h_{rad} = \epsilon \sigma (T_{S1}^2 + T_{\infty 1}^2) (T_{S1}^2 + T_{\infty 1}^2) \quad (12)$$

Siendo  $\epsilon$  la emisividad,  $\sigma$  la constante de Boltzman,  $T_{S1}(K)$  la temperatura de superficie exterior

y  $T_{\infty_1}$  (K) la temperatura ambiente exterior.

$h_{C.N}$ :

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr = \frac{g\beta(T_{S1}-T_{\infty_1})L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (13)$$

$$\beta = \frac{1}{T_{f1}}; T_{f1} = 0,5(T_{S1} + T_{\infty_1}) \quad (14)$$

en el que Ra es igual al número de Raleigh, Gr el número de Grashof, Pr el número de Prandtl, g la gravedad ( $m/s^2$ ),  $L_c$  la longitud característica (m) y  $\nu$  la viscosidad cinemática a  $T_{f1}$  ( $m^2/s$ ).

$$q_{n.r} = \alpha_s \cdot G_{solar} + \epsilon\sigma(T_{cielo}^4 - T_{S1}^4) \quad (15)$$

el calor neto por radiación se compone por la difusividad ( $\alpha$ ) y G siendo esta variable el flujo de calor total ( $W/m^2$ ),

$$Nu_1 = [0,825 + \frac{0,387Ra_L^{1/6}}{[1+(0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}}]^2 \quad (16)$$

$$Nu_2 = \frac{q_{n.r}L_c}{k_{f1}(T_{f1}-T_{\infty_1})} \quad (17)$$

$$h_{C.N} = \frac{Nu \cdot k_{f1}}{L_c} \quad (18)$$

Nu es el número de Nusselt para la convección natural y este se puede calcular con las ecuaciones 16 y 17. k hace referencia a la conductividad térmica ( $W/mK$ ).

$h_{C.F}$ :

$$Re = \frac{V \cdot D_H}{\nu} \quad (19)$$

Re es el número de Reynolds, V la velocidad del fluido ( $m/s$ ) y  $D_H$  el diámetro hidráulico (m).

$$f = (0,790 \ln Re - 1,64)^{-2} \quad (20)$$

La cual es válida para:

$$3000 < Re < 5 \times 10^6$$

en el que f hace referencia al factor de fricción para una tubería lisa

$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12,7(f/8)^{0,5}(Pr^{2/3}-1)} \quad (21)$$

la cual es válida para:

$$0,5 \leq Pr \leq 2000$$

$$3 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^6$$

$$h_{C.F} = \frac{Nu \cdot k}{D_H} \quad (22)$$

Al realizar modelaciones en CFD, es posible que el programa calcule la transferencia de calor a través de las paredes de un contenedor. Se debe de incluir la radiación incidente en la pared, dada por el primer término de la ecuación 8; el material y grosor del aislante se deben especificar para simular el flujo de calor por conducción hacia el interior; la convección externa a la pared puede darse por la brisa del mar en caso que se modele el transporte marítimo o por la velocidad de transporte en carretera. La convección externa forzada es dada por la siguiente ecuación:

$$h = \frac{k \cdot 0,037 Re_L^{0,8} Pr^{1/3}}{L} \quad (23)$$

Donde k es al conductividad térmica ( $W/mK$ ), Re es el número de Reynolds para el fluido, Pr es el número de Prandtl y L la longitud característica del flujo (m).

#### 2.3.4 Propiedades térmicas de los productos frescos

En CFD se requiere de incluir las propiedades de los cuerpos que se modelan. Esto incluye densidad, el calor específico, la conductividad térmica y en el caso de los fluidos, la viscosidad cinemática. La planta de *Aralia japonica* no es un producto fresco ampliamente comercializado, como lo es la piña o el banano; no existen estudios que describan sus propiedades termofísicas por lo que en este trabajo se requiere encontrar estos valores.

Parte de los parámetros necesarios para realizar un modelo de CFD es contar con la conductividad térmica del producto fresco. Con una condición cambiante en el tiempo, un producto tan poco uniforme y una situación en las que las condiciones no serán constantes se considera esta como una transferencia de calor en estado transitorio. Esta se define como un sistema en el cual sus temperaturas son variantes a través de los diferentes puntos del cuerpo y a través del tiempo según Çengel (45). La medición del coeficiente de conductividad térmica usualmente se hace en conjunto ya sea con una fuente lineal de calor o una planar, la más utilizada es la fuente lineal, tal como el método experimental de Fitch según Mohsenin (47), en la siguiente ecuación;

$$k = 2,303 \frac{m c_p l}{A} \cdot \frac{\log\left(\frac{T_1}{T_2}\right)}{\Delta t} \quad (24)$$

donde, m es la masa ( $kg$ ),  $C_p$  el calor específico ( $J/kg \text{ } ^\circ C$ ), l es el espesor del cuerpo (m), A el área del espécimen ( $m^2$ ), T la temperatura ( $^\circ C$ ) y t el tiempo (s).

La conductividad térmica también puede ser aproximada mediante software CFD. Ortega (48) utiliza el programa Ansys Fluent para aproximar la conductividad térmica del hormigón usado para construcción en Ecuador.

En cuanto al calor específico, tampoco se encuentran valores para la planta estudiada en este trabajo, por esto se decide aproximar el valor. Con el modelo de Siebel dado en la ecuación 25 se puede encontrar el calor específico del follaje, esto es válido para productos con humedad superior al 70 % sin presencia de grasas según dice Heldman *et al.* (49)

$$Cp_{follaje} = 4,1868x_w + 0,8374(1 - x_w) \quad (25)$$

Donde  $Cp$ = es el calor específico ( $kJ/kg^{\circ}C$ ),  $x_w$ = contenido de humedad del follaje en decimal.

Adicional al producto, el sistema se compone de cartón de la caja, un material estudiado y cuyas propiedades son conocidas, por lo que se realiza un balance ponderado del calor específico para encontrar el equivalente para el sistema, según se muestra en la ecuación 26.

$$Cp_T = \frac{m_{caja} \cdot Cp_{caja} + m_{follaje} \cdot Cp_{follaje}}{m_T} \quad (26)$$

Donde  $m_T$ =masa total combinada entre caja y follaje (kg),  $m_{caja}$  y  $m_{follaje}$  son la masa de la caja de cartón y del follaje, respectivamente (kg) y  $Cp_T$ = calor específico total equivalente ( $J/kg^{\circ}C$ ).

Ya que en las modelaciones se va a considerar el follaje y su empaque como un solo sistema para ahorrar requerimiento computacional, se utiliza la ecuación 26 para encontrar el valor equivalente de la capacidad calorífica. La humedad de la *Aralia japonica* se supone en 90% ya que según Hadjiloucas *et al.* (50) el follaje de *Fatsia japonica* ronda este porcentaje de humedad. La capacidad calorífica del cartón se extrae del handbook de ASHRAE (51). La capacidad calorífica combinada es de  $3,6052 kJ/kg^{\circ}C$  y se desglosan las variables para su cálculo a continuación en el **Cuadro I**.

**Cuadro I.** Resumen de variables de la ecuación 26 utilizadas para definir la capacidad calorífica equivalente del sistema empaque follaje.

Variable	Valor	Unidad	Referencia
Masa hojas	10,4614	kg	
Masa cajas	1,0886	kg	
Humedad hojas	90	porcentaje	Hadjiloucas <i>et al.</i> (50)
Cp follaje	3,8519	kJ/kg°C	Ecuación 25
Cp cartón	1,4026	kJ/kg°C	ASHRAE (51)
Cp total	3,6052	kJ/kg°C	Ecuación 26

Cuando se realizan simulaciones CFD con productos frescos, se requiere conocer el calor de respiración. En Heider *et al.* (52) se realiza una medición de  $CO_2$  en hojas de *Aralia japonica* almacenadas a 6 °C. Reportan que al cabo de 6 días, el contenido de  $CO_2$  en el envase utilizado es de 290 mL  $CO_2$ . Sabiendo que el tamaño de la muestra que usaron fue de 157,13 g, se calculó la tasa de respiración de la *Aralia japonica* en  $12,817 \frac{mL_{CO_2}}{kg \cdot h}$ . Este valor de generación de gas se convierte a calor según la ecuación 27 dada por USDA (12).

$$1 \frac{mgCO_2}{kg \cdot h} = 61 \frac{kcal}{ton \cdot día} \quad (27)$$

Ahora bien, el valor de  $12,817 mL CO_2/kg \cdot h$  se multiplica por el factor de conversión 1,9 para obtener  $24,352 mg CO_2/kg \cdot h$ ; esta constante de conversión es dada en Reid (11).

### 3 METODOLOGÍA

El desarrollo del trabajo consistió en una primera etapa de laboratorio en la cual se midieron las características del follaje en las instalaciones de la empresa agroindustriales de Oreamuno, como densidad aparente y las temperaturas del empaque, esto durante su enfriamiento para determinar la constante de conductividad térmica; además, las condiciones a las que este se empaca y transporta; tal que, estos parámetros permitan realizar una modelación que establezca las condiciones de partida; posteriormente se crearán los modelos con las mejoras planteadas.

Las siguientes secciones detallan los métodos que se llevaron a cabo para cada objetivo específico del proyecto.

#### **3.1 *Calcular las propiedades termofísicas de la A. japónica con el empaque utilizado en la empresa para tener las constantes requeridas para realizar la modelación de fluidos computacional.***

En la modelación computacional de fluidos es necesario conocer las propiedades termofísicas del material a analizar cuando se realizan modelos que contemplan energía, tal como la transferencia de calor. Las propiedades a calcular y medir fueron determinadas para tres cajas seleccionadas de manera aleatoria, estas fueron del mismo tamaño con dimensiones especificadas en la **Figura 7**. Se definió en cada una la densidad y conductividad térmica equivalente para todo el paquete compuesto como follaje y caja de cartón.

##### **3.1.1 Medición de las propiedades físicas del empaque lleno con hojas de *A. japonica*.**

Para hallar la densidad se midió en la masa total, considerando cartón y el follaje de *Aralia sp.* El volumen se calculó considerando la caja como un prisma. Con ambas variables se encontró la densidad de cada caja con producto, que se promediaran entre las tres, tal que:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (28)$$

Siendo  $\rho$ =densidad ( $kg/m^3$ ),  $m$ = masa (kg),  $v$ = volumen ( $m^3$ ).

La medición de la masa se hizo con una balanza sin indicación de marca, modelo OCS-003-L, con una incertidumbre de 10g, esta fue calibrada en Romanas Lumagre, Zapote, Costa Rica. La medición de longitud de las cajas con una cinta métrica Stanley 30-626.

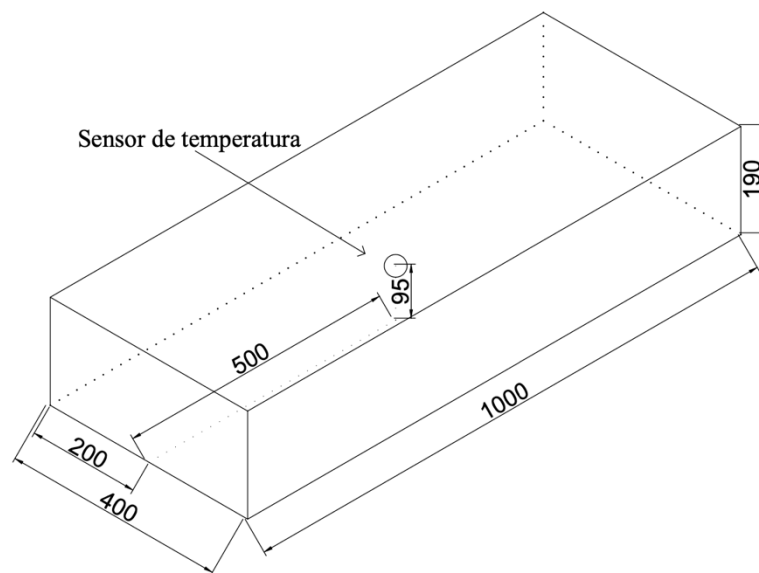


### 3.1.2 Medición de propiedades térmicas del empaque lleno con hojas de *A.japonica*.

El empaque que se utiliza actualmente es de tipo caja de cartón. La condición en la que se empaca envuelve completamente el follaje con plástico, de modo en que imposibilita el paso de aire hacia el follaje, sumado a esto, la caja es poco ventilada. Para el presente proyecto se ha despreciado el efecto de la convección natural en el interior.

Por las razones señaladas anteriormente, se puede decir que toda la transferencia de calor al follaje se realizará por conducción, por cuanto hay un coeficiente de conducción  $k$  (en  $W/m \cdot K$ ) que es necesario calcular para poder simular la transferencia de calor en el contenedor. Esta constante térmica se obtuvo mediante una comparación del registro de caída de temperatura medido de 3 cajas, contra la curva de enfriamiento obtenida por simulación en el programa CFD Autodesk 2021.

Como primer paso, se realizó el proceso de recolección de datos en las tres cajas de empaque para el follaje. Se registró la temperatura dentro de las cajas por un periodo de 24 horas. Este registro se realizó en la cámara de pre-enfriamiento de la empresa. En cada caja se colocó un registrador de datos marca HOBO, modelo MX2302 en el centroide de la caja como se ilustra en **Figura 7**. Las cajas fueron ubicadas dentro de la cámara de refrigeración en una posición que asegura un flujo libre de aire frío. Las cajas fueron aisladas en la cara inferior con poliestireno expandido de 25,4 mm de espesor para limitar la transferencia de calor por contacto a través de la base.



**Figura 7.** Ubicación del sensor colector temperatura. Todas las medidas son en milímetros.

Adicionalmente, la temperatura ambiental en la recámara fue medida con un registrador de datos marca HOBO modelo UX120-014M colocado en la superficie de la cara superior de la caja 3, véase la **Figura 8**. Estos datos de temperatura se procesarán para obtener una curva que se ajuste al comportamiento de temperatura que el cuarto frío tiene. Se utilizará el programa informático Matlab versión R2020a con la herramienta Curve Fitting, la cual permite buscar la función de mejor ajuste para la temperatura de la cámara en función del tiempo. Esta función de ajuste fue utilizada como condición de frontera en la simulación de CFD Autodesk para obtener la conductividad térmica del empaque.



**Figura 8.** Posicionamiento de las cajas dentro de la cámara de enfriamiento para medir su perfil térmico durante 24 h, caja 1, 2 y3.

Por último, usando el programa informático CFD de Autodesk, versión 2021, se simuló el enfriamiento del empaque del producto variando el valor de la conductividad térmica de la masa total (cartón y follaje) hasta que el perfil de temperatura obtenido experimentalmente sea similar al obtenido en la simulación.

Las condiciones de frontera utilizadas en la simulación incluyen la curva de ajuste de la temperatura de la cámara fría, temperatura inicial de la masa, la densidad (sección 3.1.1), y el calor específico y de respiración, ambos en la sección 2.3.4.

### ***3.2 Evaluación de la eficiencia de enfriamiento dentro del contenedor con el follaje para las condiciones de embalaje actuales.***

La evaluación de la condición actual de embalaje se realizó primeramente con una visita a la planta procesadora. Se recopilaron las características del contenedor como el grosor de las paredes, el tipo de aislante que se utiliza, las dimensiones del contenedor, el modelo de la unidad de refrigeración y las condiciones de almacenamiento durante el transporte, así como la metodología de acomodo de las cajas, y el seguimiento de la cadena de frío del producto.

### **3.2.1 Determinación de las condiciones ambientales a las que se expone el contenedor durante el transporte marítimo.**

Durante el transporte al país de destino, el contenedor se verá expuesto a convección forzada por la brisa del mar y a radiación. En la determinación de estas variables se utilizó el perfil de temperatura diario en una estación de Aranjuez de Puntarenas (10°03'21" N, 84°48'25" O), debido a su cercanía con el puerto de Caldera, de donde sale el producto hacia Países Bajos. Además debido a que se desconoce la radiación en la zona, se usa la intensidad de radiación dada por Arif *et al.* (46).

### **3.2.2 Comportamiento térmico a través de la capa de aislante térmico.**

Con el objetivo de conocer la inercia térmica a través de las paredes de aislante del contenedor, comprobar el efecto del enfriamiento y ordenamiento actual de las cajas en el contenedor, se realizó una modelación en el programa ANSYS Fluent, versión 2018. Esta simulación se realizó en estado transitorio durante 24 h. Las condiciones de frontera consideradas fueron; el calor generado por respiración, la temperatura y velocidad del aire frío, presión de succión del mecanismo de enfriamiento del contenedor, y las condiciones ambientales durante el transporte.

### **3.2.3 Medición de la temperatura interna de los empaques antes de ser embalados.**

Se utilizó un registrador HOBO, modelo MX2302 en una caja para registrar la temperatura inicial de la biomasa al ingresar al contenedor, el cual fue previamente almacenado en la cámara de refrigeración de la empresa durante una semana. Estas temperaturas se registraron durante toda esa semana y la ubicación del termopar fue en el centroide de la caja.

### **3.2.4 Modelación del comportamiento térmico dentro del contenedor.**

La evaluación de la metodología actual se recreó con el programa informático Inventor de Autodesk versión 2020, creando una geometría para la distribución de cajas que emplea la finca productora. Con esta reconstrucción digital, e incorporando el calor generado por respiración de las plantas, el calor introducido por el ambiente, y conociendo tanto la temperatura, velocidad del aire frío como la presión de succión entregada por el mecanismo de enfriamiento del contenedor,

se modelará la transferencia de calor en el sistema con modelación de fluidos computacional en el programa ANSYS Fluent, versión 2018; esto para un trasiego marítimo de 20 días.

### ***3.3 Simulación mediante la modelación computacional de fluidos diferentes orientaciones y acomodo de las cajas, con elementos espaciadores entre ellas para mejorar la transferencia de calor entre el producto y el aire enfriado.***

Se realizaron modelaciones para propuestas de mejora en el acomodo de las cajas en el contenedor, con el objetivo que la empresa tenga opciones para asegurar que la temperatura de los empaques es la óptima durante su trasiego, y así reducir la carga química que se aplica a los productos.

La simulación de las propuestas consistieron en aumentar los espacios en el contenedor para aumentar la superficie de contacto con el aire frío y radicar en dos enfoques: 1) primeramente se evaluó eliminar la posibilidad en la que un porcentaje del aire frío retorne al sistema de enfriamiento del contenedor sin haber estado en contacto con el producto; también, se eliminaron cajas para posibilitar un espaciamiento entre el producto y las paredes del contenedor; 2) se mantendrán las modificaciones hechas en la primer propuesta, pero adicionalmente se eliminaron empaques para una distribución de aire frío más homogéneo .

Con cada mejora, se desarrolló un modelo gráfico en el programa informático Inventor de Autodesk versión 2020, luego se realizaron las modelaciones en el programa ANSYS Fluent versión 2018; esto para un trasiego marítimo de 20 días.

## 4 RESULTADOS

A continuación, se presentarán los resultados que describen las propiedades termofísicas del empaque estudiado, y se definen las condiciones ambientales a las que se exponen los contenedores en el trasiego. Se muestra el comportamiento térmico de la pared de aislante, y del interior del contenedor en los 20 días de transporte marítimo; además se proponen mejoras que lograron disminuir la temperatura de las cajas en su recorrido hacia el país destino. Los resultados serán presentados según los objetivos específicos de este trabajo final de graduación.

### ***4.1 Calcular las propiedades termofísicas de la *A. japonica* con el empaque utilizado en la empresa para tener las constantes requeridas para realizar la modelación de fluidos computacional.***

#### **4.1.1 Medición de las propiedades físicas del empaque lleno con hojas de *A. japonica*.**

En la medición del volumen y masa de las cajas para calcular su densidad, se encontró un valor similar entre las cajas 1 y 2, y mayor respecto al de la caja 3; esto se atribuye a que la caja 1 y 2 tienen la misma dimensión de hoja (0,30x0,50) m y la 3 de más grande (0,50x0,70) m. La empresa no sigue un proceso estandarizado de cantidad de empaques exportadas según el tamaño de hoja, entonces no se tiene un criterio constante de biomasa exportada, sino una constante de volumen de cajas exportado. Los resultados del cálculo de la densidad se dan en el siguiente **Cuadro II**, con un promedio de 141,71 kg/ m<sup>3</sup>, valor que será utilizado como la densidad de las cajas en las modelaciones a realizar.

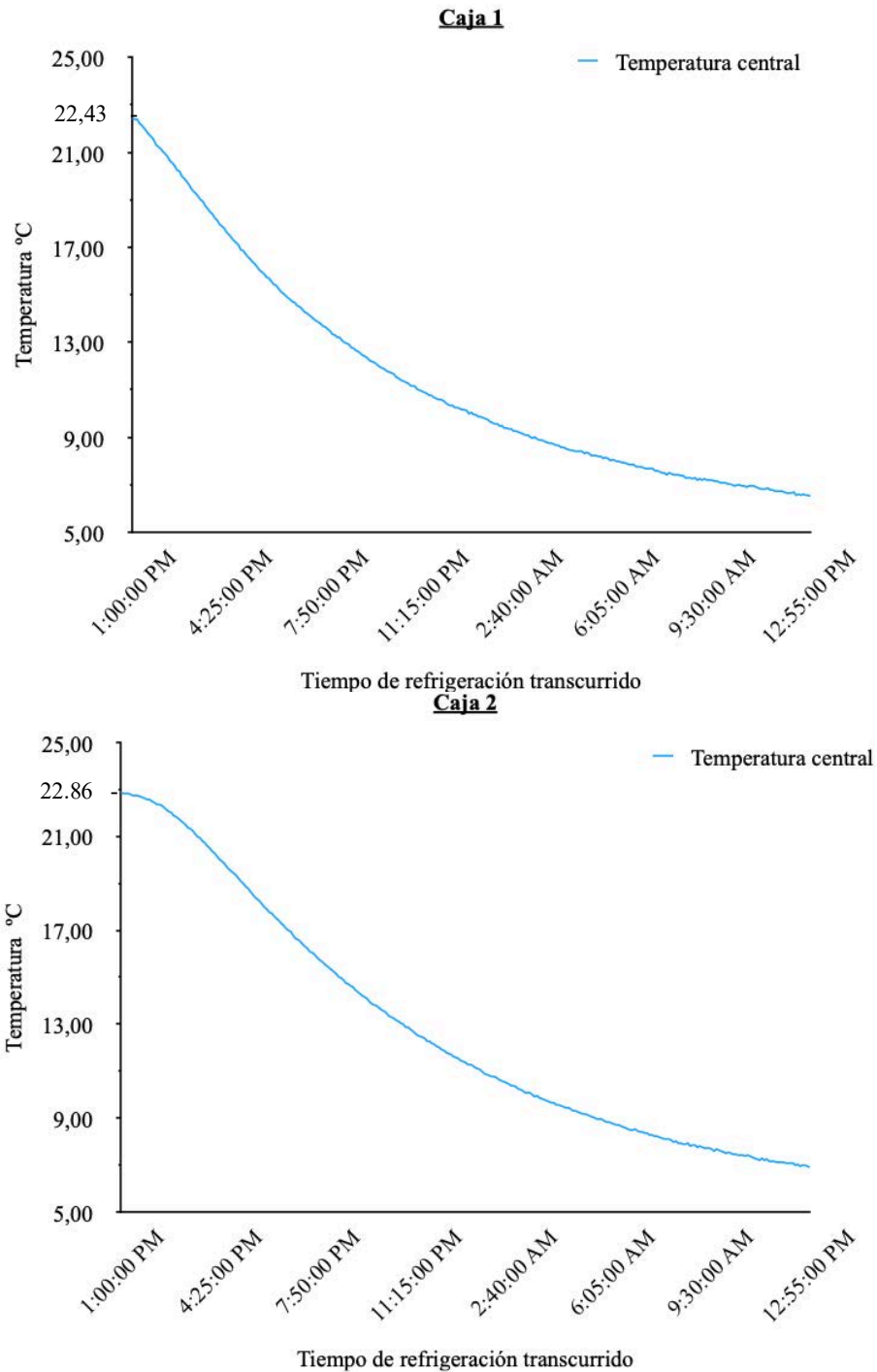
**Cuadro II.** Medición y cálculo de propiedades físicas de los empaques

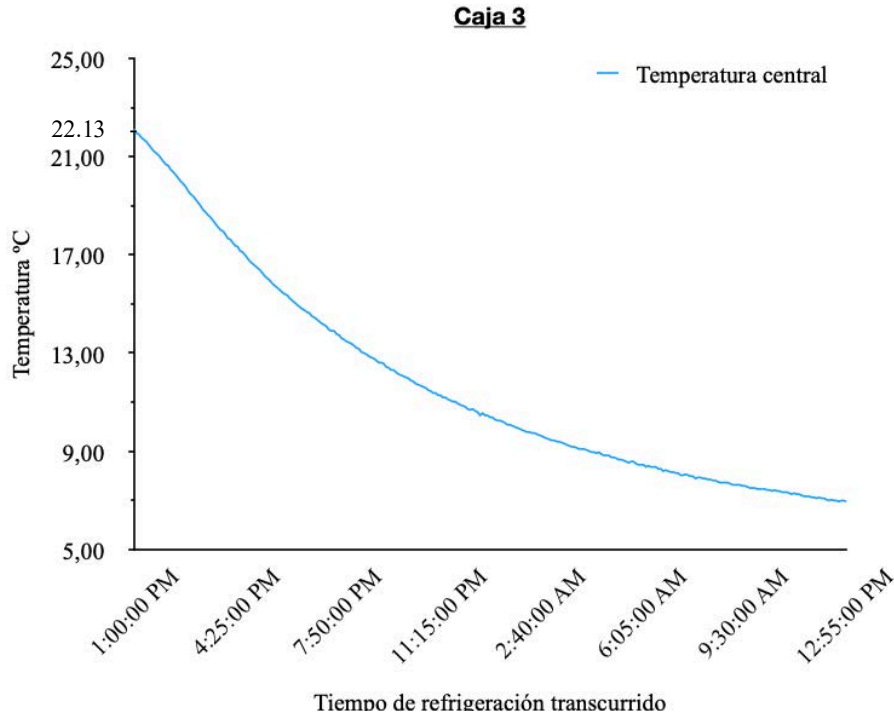
Caja	Dimensiones (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Masa (kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
1	1x0,40x0,19	0,076	11,45	150,66
2			11,55	151,97
3			9,31	122,50

#### **4.1.2 Medición de propiedades térmicas del empaque lleno con hojas de *A. japonica*.**

La numeración de las cajas respecto a su ubicación en la cámara de refrigeración está dada por la **Figura 8** en la sección 3.1.2. El flujo de aire frío fue en dirección de la caja derecha a izquierda. Se encuentra que la temperatura inicial de las cajas es variable, esto atribuido posiblemente a que las hojas se mantengan diferentes periodos expuestos sobre las mesas de

empaques; además, cabe resaltar que la planta procesadora donde se realiza el empaque no es un ambiente controlado, es un galerón abierto. A continuación, se ilustra en la **Figura 9** la caída de temperatura en cada una de las cajas utilizadas registradas con el adquisidor de datos.





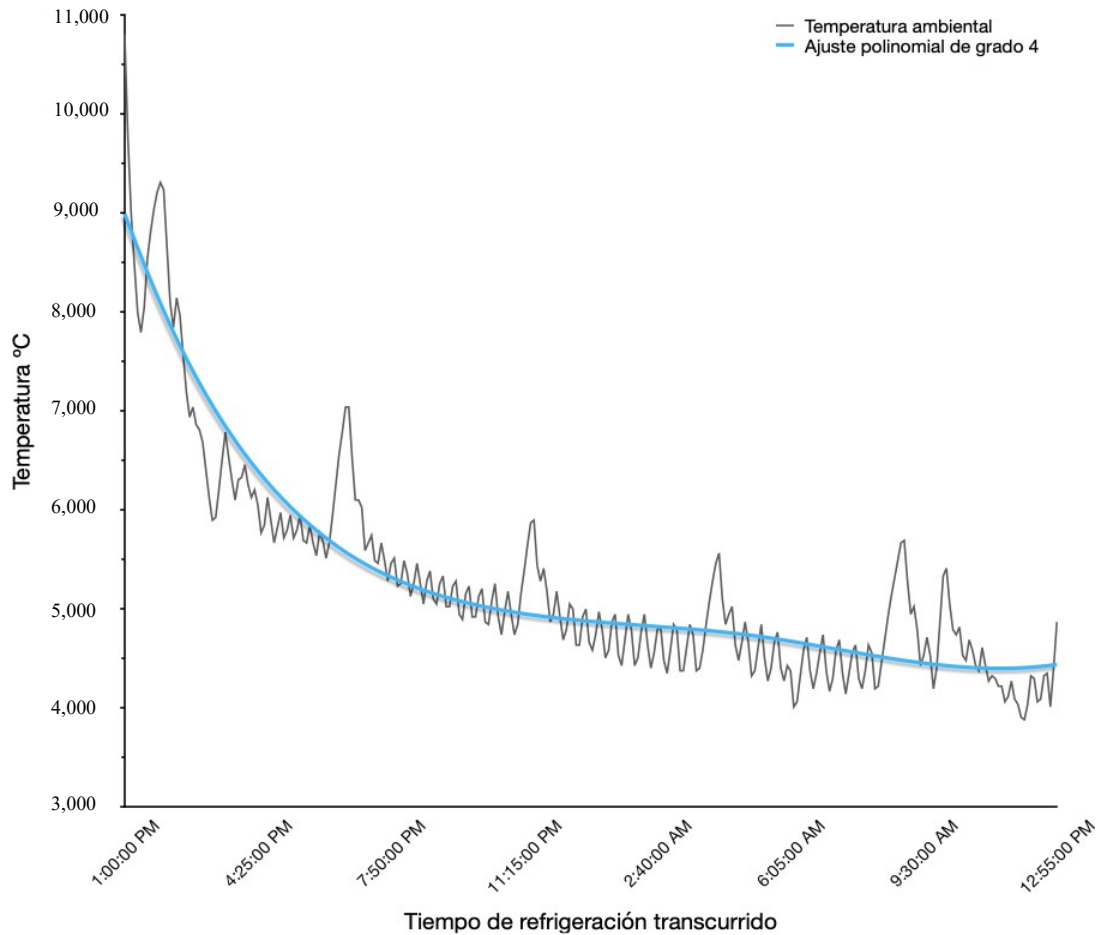
**Figura 9.** Medición de la caída de temperatura durante 24 horas en los empaques refrigerados, midiendo en el centro geométrico del empaque.

La temperatura de la cámara de preenfriamiento fue medida y graficada en la **Figura 10**. En esta se observa como en la temperatura medida hay varios picos de temperatura, esto se atribuye al funcionamiento del equipo de refrigeración y como se encuentra seteado, dado que el tiempo entre cada pico es similar, entre cada uno. Las temperaturas altas iniciales se dan por el alto ingreso de personas a la cámara frigorífica antes de la 1:00 pm y la cercanía entre el pico de 9:00 am y 10:00 am por el ingreso al cuarto frío con el propósito de ingresar más cajas.

Adicionalmente, utilizando la herramienta para ajustar curvas de Matlab 2020a, se encontró con un ajuste polinomial de grado 4 los siguientes indicadores de ajuste;  $R^2$ : 0,9362,  $Adj - R^2$ : 0,9362 y la  $RMSE$ : 0,2822. Un ajuste a una ecuación de grado 5 es posible en Matlab 2020<sup>a</sup>, sin embargo, el máximo grado de función polinomial que se puede utilizar en el software CFD Autodesk 2021 es de 4, por lo que se aproximó la curva de la temperatura ambiental dentro de la recámara a una función polinomial de grado 4.

Esta función obtenida por regresión se utilizó para simular las condiciones ambientales a las que se expusieron los empaques durante las 24 h de enfriamiento.

$$T(t) = 0,1041 t^4 + -0,2521t^3 + 0,1564t^2 \pm 0,3589t + 4,838 \quad (29)$$



**Figura 10.** Curva de temperatura de enfriamiento de la recámara de pre-enfriamiento durante las 24 horas de medición de caída de temperatura dentro de la caja.

### 4.1.3 Aproximación de la conducción térmica mediante simulación CFD

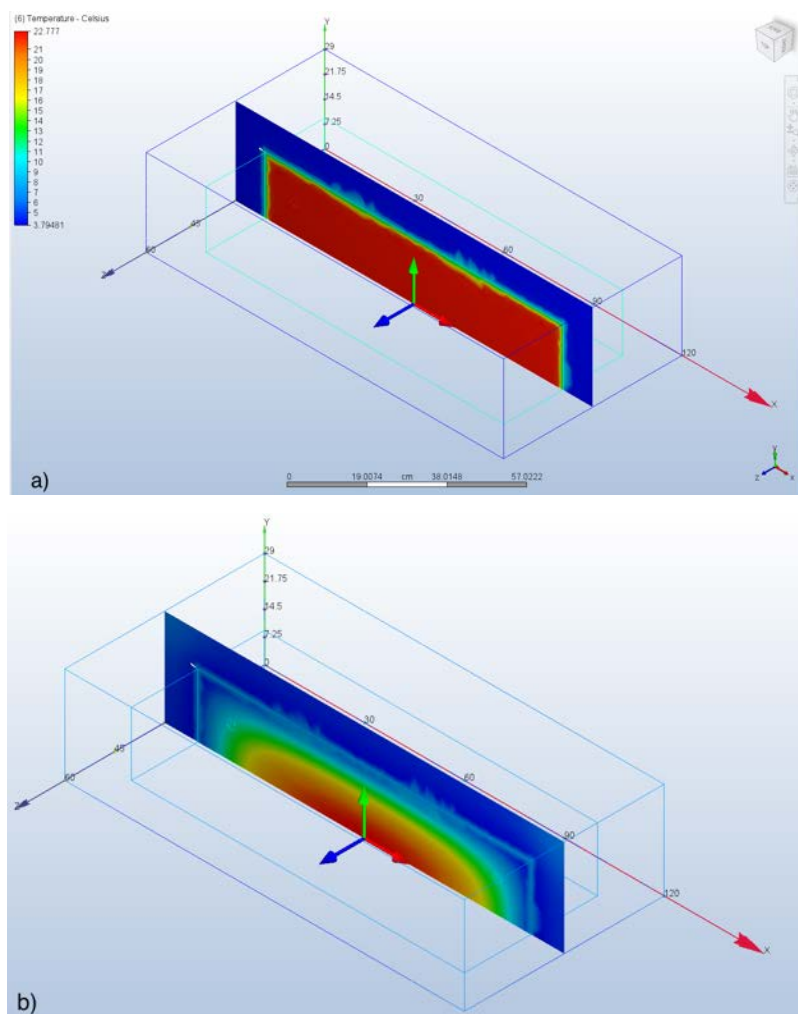
En el proceso de obtención de la constante de conductividad térmica para cada caja se asignó una temperatura homogénea a toda la caja igual a la temperatura central inicial medida de cada una, véase la **Figura 11a**. Se ingresó la función polinomial de grado 4 que describe el comportamiento de la temperatura ambiental de la cámara frigorífica (**Ecuación 29**); además, se asignó la densidad respectiva en cada caja, la capacidad calorífica y la generación de calor a causa de la respiración según la masa medida de esta.

El calor generado por respiración fue calculado según los valores de respiración descritos en la sección 2.3.4 para la planta y con la ecuación 27. Este valor es de  $1485,456 \text{ kcal/ton} \cdot d$  ó  $71,983 \text{ W/ton}$ , para un calor total de  $580,600 \text{ W}$  contemplando la masa total de cajas calculada,  $8,0658 \text{ ton}$ . El volumen total es de  $62,840 \text{ m}^3$ , por cuanto se generan  $9,239 \text{ W/m}^3$ . Cabe resaltar



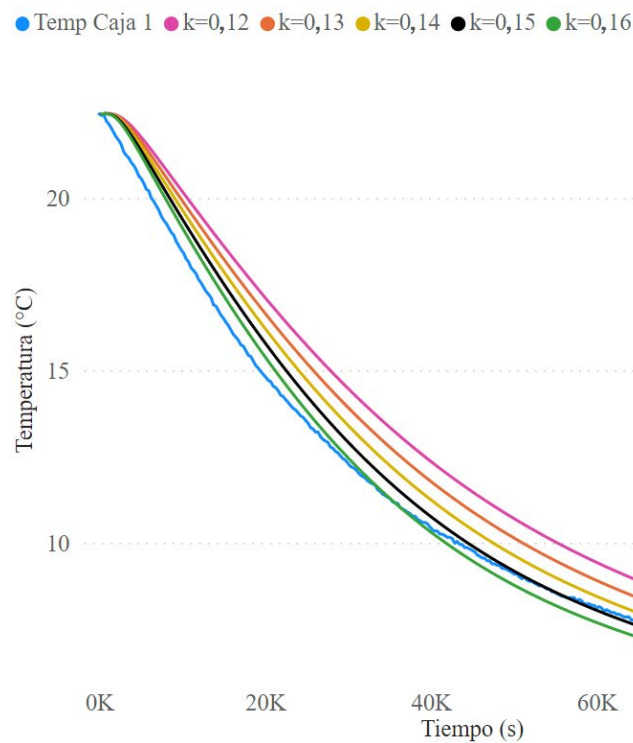
que en todas las modelaciones que se realicen, se tomará el valor anteriormente calculado como constante a pesar de la variación en la temperatura de las cajas, a razón que hacerlo aumentaría significativamente el requerimiento computacional y periodo de cálculo.

La asignación de estas condiciones de frontera se dio por: un encubrimiento de todas las caras de la caja excepto la inferior por las condiciones ambientales (pared aislada), sometiéndose homogéneamente a las temperaturas dadas por la función polinomial encontrada anteriormente; además, se le da una generación constante de calor a causa del calor por respiración. Debido a este aislante en la cara inferior de la caja es que en la **Figura 11b** se observa un decrecimiento de calor radialmente desde abajo, con una distribución de temperatura que tiene sentido debido a la distribución constante de la conductividad térmica.

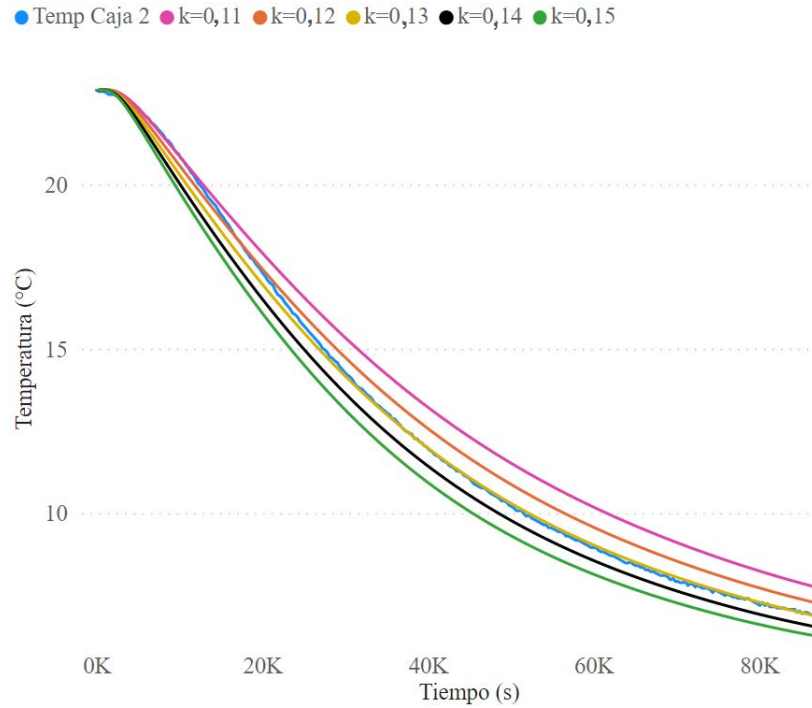


**Figura 11.** Representación gráfica de la geometría utilizada en CFD Autodesk, a) perfil de temperatura al tiempo cero y b) el perfil de temperatura al haber transcurrido 24 h.

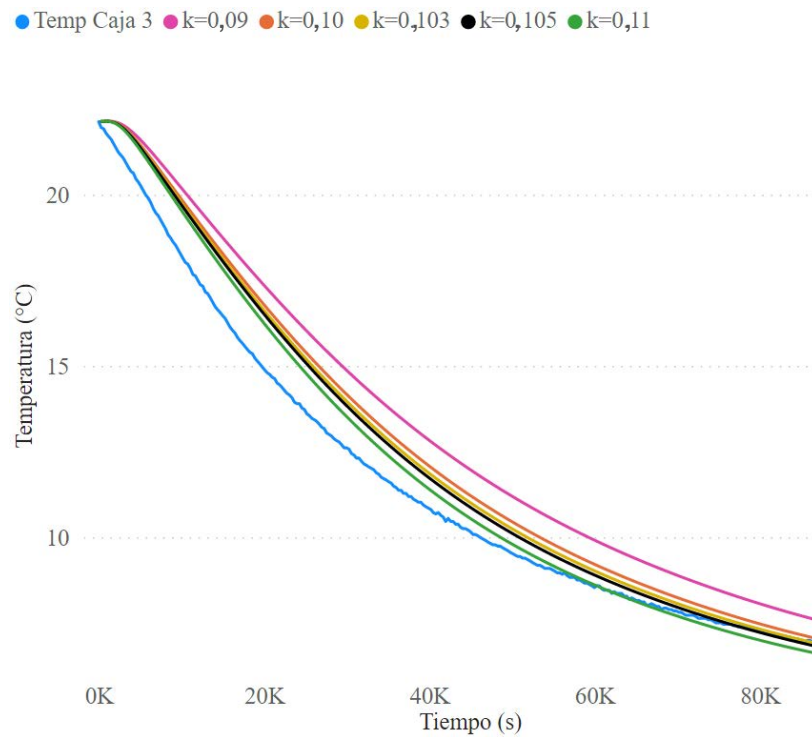
Una vez se asignaron estas condiciones de frontera se asignaron valores aproximados de conductividad térmica a los esperados en un follaje vegetal. Esto es un proceso iterativo que conlleva muchas corridas del modelo para encontrar una constante de conductividad que produzca una curva de enfriamiento cercana a la medida por sensores, por esto se incluyen únicamente 5 diferentes iteraciones con diferentes valores de  $\kappa$  ( $k=0,09$  a  $0,16$   $\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$ ), estos fueron los más cercanos a la curva medida. De la **Figura 12** a la **Figura 14** se demuestran las curvas de enfriamiento para cada valor de  $\kappa$  supuesto para cada caja y en el **Cuadro III** se presenta el resumen de resultados obtenidos.



**Figura 12.** Curvas enfriamiento en la caja 1 para cada constante de conductividad supuesta durante 86 400 segundos.



**Figura 13.** Curvas enfriamiento en la caja 2 para cada constante de conductividad supuesta durante 86 400 segundos.



**Figura 14.** Curvas enfriamiento en la caja 3 para cada constante de conductividad supuesta durante 86 400 segundos.

**Cuadro III.** Resumen de resultados de cada modelación realizada en CFD Autodesk.

Número de caja	Constante k supuesta ( $W/mK$ )	Correlación con curva de temperatura medida	Temperatura final central alcanzada con CFD ( $^{\circ}C$ )	Temperatura final central medida ( $^{\circ}C$ )
1	0,1200	0,9934	7,2206	6,5200
	0,1300	0,9959	6,8324	
	0,1400	0,9975	<b>6,5089</b>	
	0,1500	0,9990	6,2390	
	0,1600	0,9993	6,0134	
2	0,1100	0,9921	7,7867	6,9000
	0,1200	0,9947	7,3062	
	0,1300	0,9966	<b>6,9059</b>	
	0,1400	0,9980	6,5720	
	0,1500	0,9989	6,2932	
3	0,0900	0,9923	7,6177	6,9500
	0,1000	0,9953	7,0706	
	0,1030	0,9960	<b>6,9200</b>	
	0,1050	0,9964	6,8400	
	0,1100	0,9974	6,6337	

Dados los resultados presentados en el **Cuadro III** se encuentra que la tasa de enfriamiento para cada corrida de modelo tienen un comportamiento similar al de la curva medida para cada caja, esto por el alto valor de correlación entre las curvas. Ya que hay alta correlación entre cada curva con la original medida se decide utilizar el valor de k que más se aproxime a la temperatura final medida en cada caja. Las constantes de conductividad térmica seleccionadas para cada caja fueron: 0,14  $W/mK$ , 0,13  $W/mK$  y 0,103  $W/mK$ , respectivamente para la caja 1, 2 y 3. El valor de la constante de conductividad promedio encontrada fue de 0,1243  $W/mK$ .

**4.2 Evaluación de la eficiencia de enfriamiento del follaje con las condiciones de embalaje actuales de manera que se pueda establecer las condiciones base, sin mejoras.**

**4.2.1 Determinación de las condiciones ambientales a las que se expone el contenedor durante el transporte marítimo.**

En la visita realizada a la empresa, se observa un contenedor de 40 pies (12,20 metros) con características estructurales y de refrigeración son descritas a continuación:

- I. El aislante utilizado en el contenedor es de poliuretano.
- II. El piso falso tiene una altura de 6 cm.
- III. La unidad de refrigeración es de la marca Daikin, sus especificaciones técnicas son dadas por Daikin (53).
- IV. El grosor de la pared aislante es de 9 cm de poliuretano según Kayansan *et al.* (54)
- V. La primera fila de cajas que se coloca deja un espacio al centro que puede que ocasione un pronto regreso del aire frío a la unidad frigorífica (**Figura 15a**).
- VI. Se observa que en la colocación de todas las cajas sí se aseguran de no sobrepasar la línea roja máxima que indica el máximo de altura posible para el embalado de las cajas (**Figura 15b**).
- VII. En la última fila de embalaje se resguarda el espacio suficiente según indican las marcas del contenedor (**Figura 15c**).
- VIII. En ocasiones, en la última fila se incluyen cajas que no han sido previamente pre-enfriadas.



**Figura 15.** Representación del embalaje de las cajas realizado actualmente. a) es la distribución de la primera fila de cajas, b) acomodo del resto de cajas en el contenedor y c) un detalle de la última fila de embalaje.

Las condiciones ambientales son variables durante el día, por cuanto se debe considerar un flujo de calor transitorio a través de las paredes. Debido a que se tiene poca información respecto a las temperaturas ambientales durante el transporte y los métodos de cálculo son complejos, además de lentos por tenerse que someter a iteraciones, se decide encontrar el flujo de calor mediante modelos numéricos aplicados en el software de ANSYS.

En la asignación de condiciones de frontera en el programa informático, se requiere una temperatura ambiental interna y externa, el coeficiente por convección forzada ( $h$ ) debido a la brisa del mar durante el transporte del contenedor, la radiación y la emisividad de la pared externa del contenedor. Para la simulación se ha supuesto lo siguiente:

- I. Las condiciones ambientales son iguales y periódicas durante el trasiego de 20 días hasta los Países Bajos.
- II. El flujo de calor es nulo hacia el interior del contenedor en el piso, frente y puertas, motivo del espesor de las puertas, por encontrarse la unidad frigorífica en el frente del contenedor

y debajo la temperatura es baja, además la radiación se considera nula, esto según Alpetekin *et al.* (44).

- III. Se considera una ubicación del contenedor en el buque completamente expuesta a la radiación.

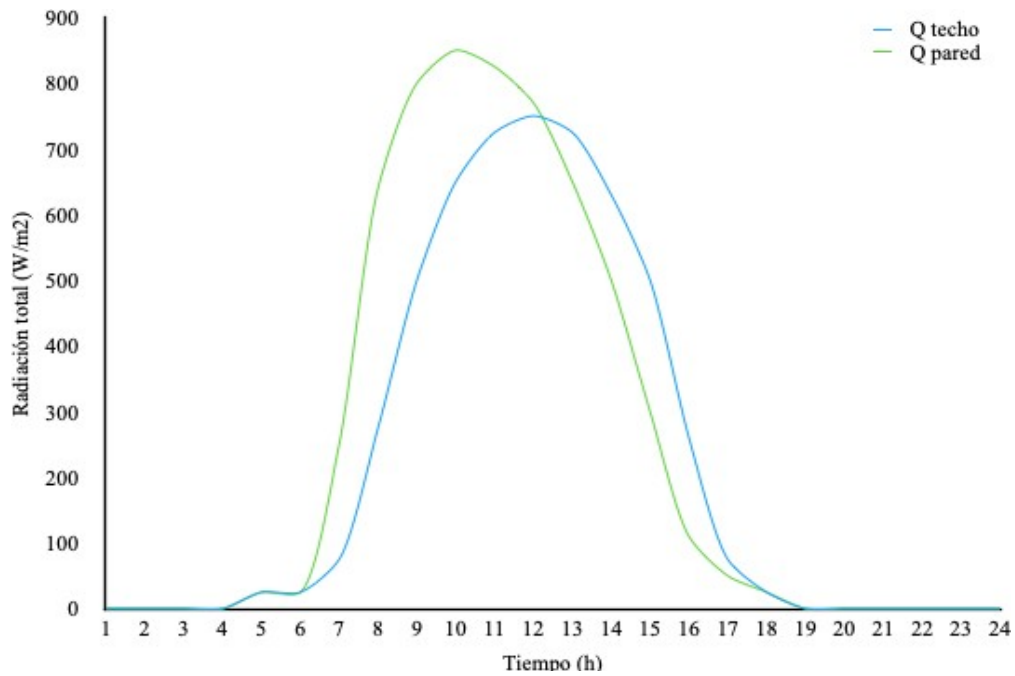
En el **Cuadro IV** se presentan las variables que determinan la convección forzada externa a las paredes del contenedor en su trasiego en altamar, esta se da por la ecuación 27 y se calcula en  $12.961 W/m^2K$ .

**Cuadro IV.** Variables usadas para calcular la convección forzada externa al contenedor

Variable	Valor	Variable	Valor
Brisa del mar (m/s)	5	Reynolds	3488146
T película (°C)	35	Pr	0,7268 <sup>A</sup>
V cinemática (m <sup>2</sup> /s)	0,00001656 <sup>A</sup>	k (W/mK)	0,02625 <sup>A</sup>
L característica (m)	11,550	h (W/m <sup>2</sup> K)	12,961

<sup>A</sup>: Todas las propiedades térmicas del aire fueron extraídas de Çengel (45).

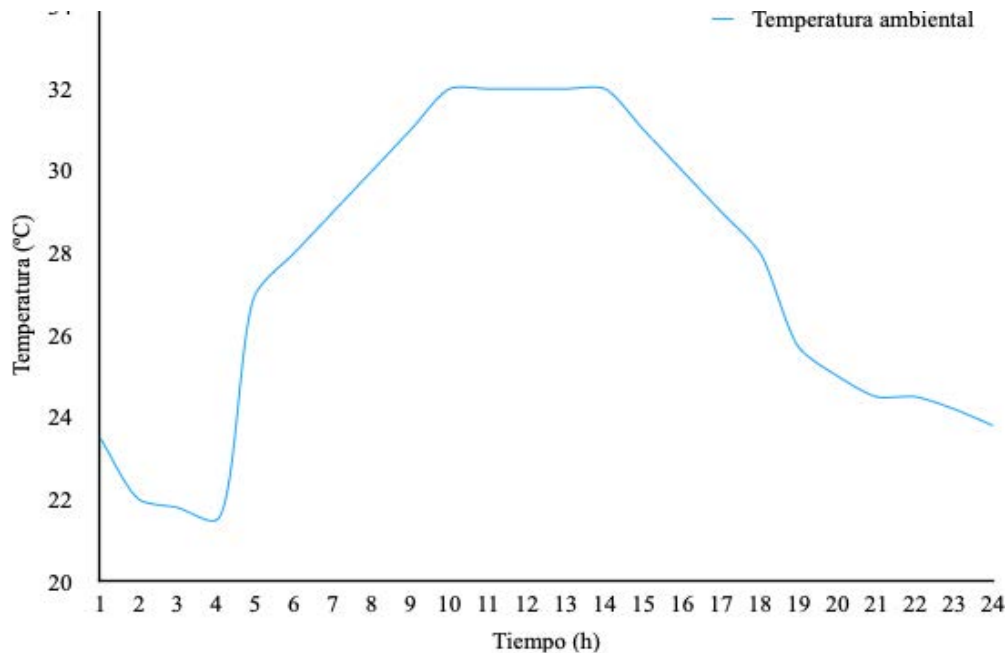
La radiación incidente sobre la pared este y el techo fueron las utilizadas para realizar la modelación, considerando un traslado donde las puertas en la sección larga del contenedor apuntan hacia el norte. Las curvas se presentan en la **Figura 16** y fueron extraídas de Arif *et al.* (46). El comportamiento de la radiación indica que a las 10:30 am se alcanza el pico de radiación en la pared este con  $850 W/m^2$  incidentes; además, de 7 pm a 5 am no hay incidencia de radiación.



**Figura 16.** Calor incidente sobre el contenedor en la pared este y el techo durante 24 h. Fuente: Arif *et al.* (46)

Para la temperatura ambiental, se ha considerado la estación en Aranjuez, Puntarenas del Instituto Meteorológico Nacional costarricense puesto que el contenedor con el producto sale de Caldera. Se escogió un perfil de temperatura de un día con 32 °C con temperatura máxima debido a que ASHRAE (51) recomienda suponer una temperatura de transporte marítimo de esta magnitud (**Figura 17**).





**Figura 17.** Temperatura ambiental diaria en Aranjuez, Puntarenas. Fuente: IMN (55)

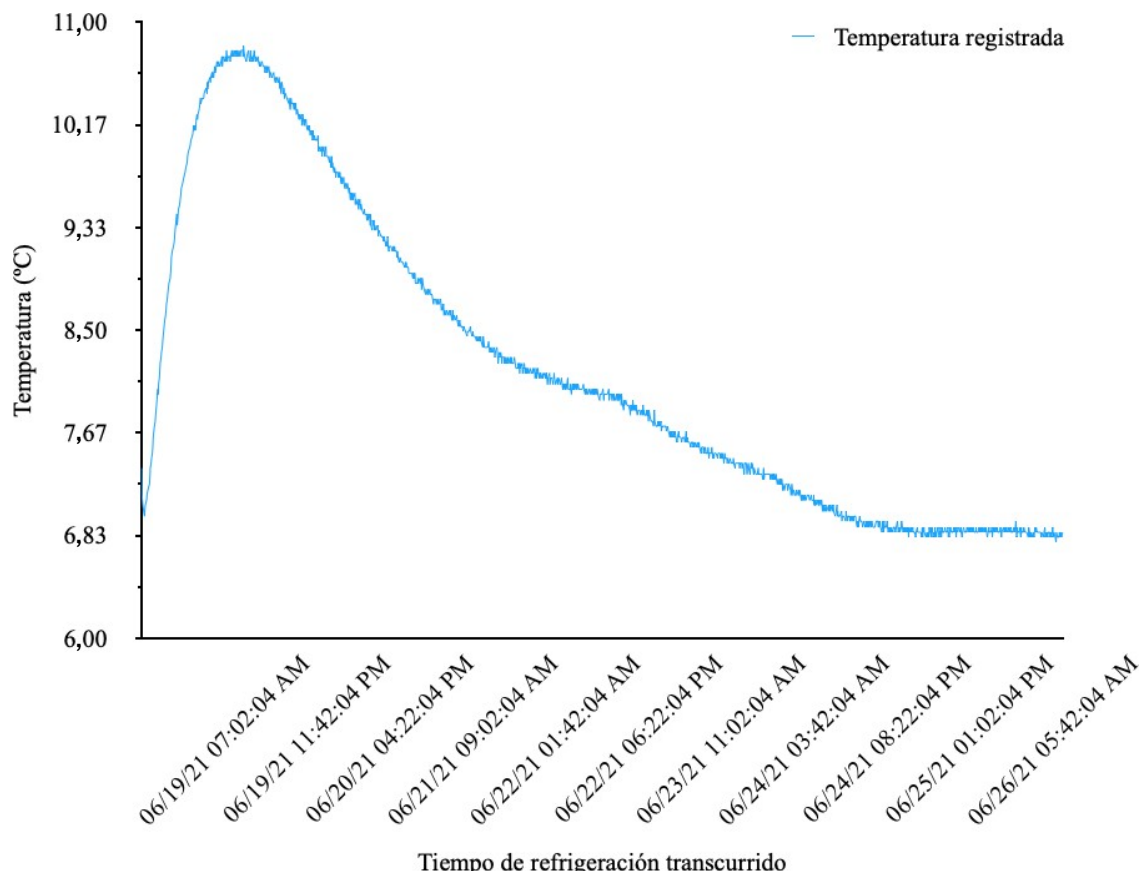
Teniendo las condiciones ambientales incidentes sobre el contenedor se crea la tabla de condiciones de frontera para el estado transitorio. El calor ( $Q$ ) absorbido en las paredes se va a dar por el producto  $\alpha \cdot Q$ ; donde la absorptividad ( $\alpha$ ) de la pared de un contenedor es de 0,21 y la emisividad ( $\epsilon$ ) de 0,96, según Kayansan *et al.* (54). El resumen de esta variación de condiciones ambientales diarias se da en el **Cuadro V**.

**Cuadro V.** Tabla de condiciones de frontera ambiente en estado transitorio.

Tiempo (s)	Temperatura (K)	Q abs techo ( $W/m^2$ )	Q abs pared ( $W/m^2$ )	Tiempo (s)	Temperatura (K)	Q abs techo ( $W/m^2$ )	Q abs pared ( $W/m^2$ )
3600	296,65	0	0	46800	305,15	152,250	136,500
7200	295,15	0	0	50400	305,15	132,300	105,000
10800	294,95	0	0	54000	304,15	105,000	63,000
14400	294,95	0	0	57600	303,15	54,600	21,100
18000	300,15	5,250	5,250	61200	302,15	15,750	10,500
21600	301,15	5,250	5,250	64800	301,15	5,250	5,250
25200	302,15	15,750	52,500	68400	298,85	0	0
28800	303,15	57,750	134,400	72000	298,15	0	0
32400	304,15	105,000	168,000	75600	297,65	0	0
36000	305,15	136,500	178,500	79200	297,65	0	0
39600	305,15	152,250	173,250	82800	297,35	0	0
43200	305,15	157,500	161,700	86400	296,95	0	0

#### 4.2.2 Medición de la temperatura interna inicial de los empaques antes de ser embalados.

Con el fin de conocer la temperatura interna final de almacenaje de una caja se ubicó un sensor en el centro geométrico de una caja pequeña en una caja estibada dentro del bloque de cajas, esta al estar aislada por más cajas, sólo podía enfriarse por conducción. En la **Figura 18** se observa la variación de temperatura interna durante la semana de medición (periodo de almacenamiento en la cámara de refrigeración de la empresa), el pico inicial de temperatura durante los primeros días se ve atribuido a que la cámara se estuvo abriendo con frecuencia según indica la empresa, esto porque dentro de esta cámara, almacenan por cortos periodos los frutos rojos que también producen en su empresa.



**Figura 18.** Lectura semanal de temperatura en una caja aislada por otras cajas.

#### 4.2.3 Comportamiento térmico a través de la capa de aislante térmico.

Habiendo definido las condiciones ambientales a las que se exponen los contenedores durante su transporte, se procede a recrear con el programa ANSYS Fluent versión 2018 el comportamiento

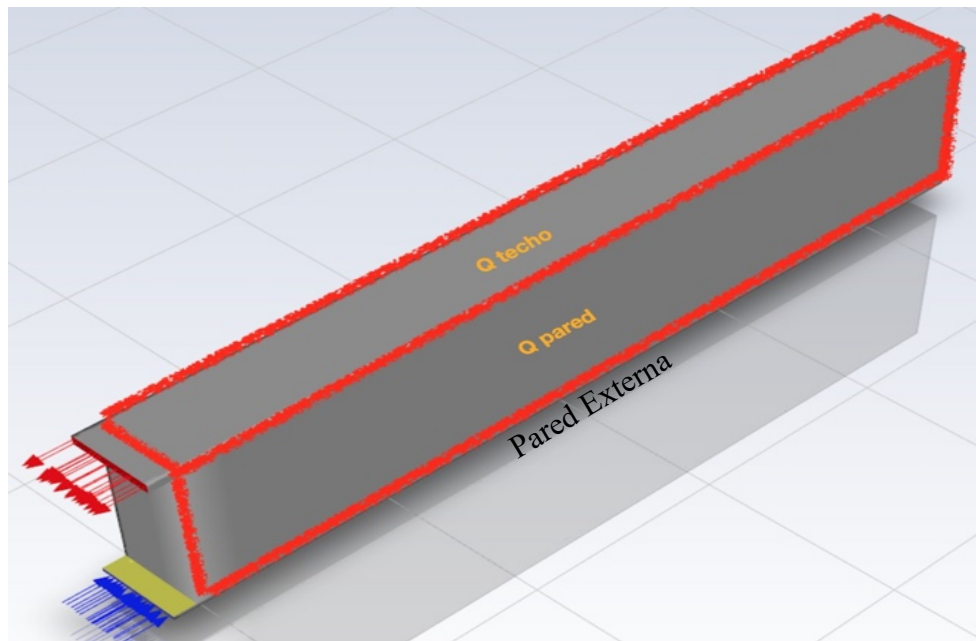
térmico a través de la capa de aislante durante 24 h. Las propiedades termofísicas de los materiales se encuentran en el

#### ANEXO I.

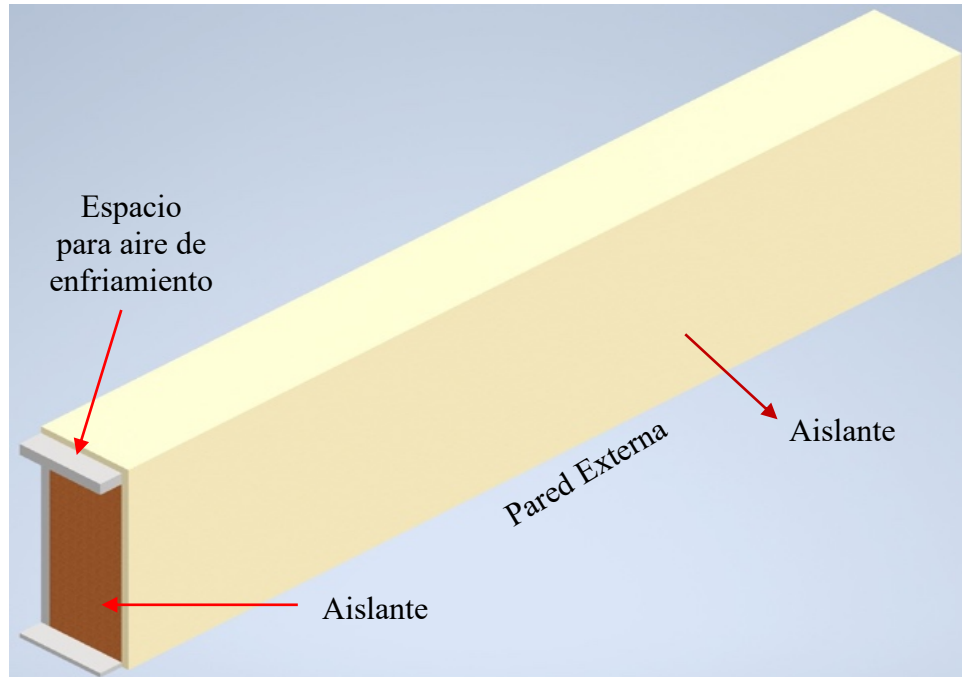
Se hizo uso del modelo de viscosidad realizable  $\kappa - \epsilon$  con paredes escalables en el que se asigna el método kinético y de disipación de turbulencia de primer a segundo orden, con valores de 0,8 cada uno.

Se asignó una velocidad al fluido de aire frío de 10,48 m/s y presión de succión del mecanismo frigorífico de 125 Pa, según las especificaciones en Daikin (53). Aunado, la fuente de calor por el concepto de respiración del follaje es de  $9,239W/m^3$  dados en la sección 2.3.4. El flujo de calor por condiciones ambientales, deviene del **Cuadro V** como condiciones de frontera para estado transitorio. Por último, la emisividad es de 0,96 y es dada por Kayansan *et al.* (54). La convección forzada por la brisa al mar es de  $12,961W/m^2K$ , calculada en el cuadro **Cuadro IV** en la sección 4.2.1. Lo dicho anteriormente será utilizado en todas las simulaciones. En la

**Figura 19** se presentan las zonas de ingreso de calor a causa de las condiciones ambientales; además, se incorpora una recreación gráfica con el relleno de aislante térmico en las paredes, véase la **Figura 20**.

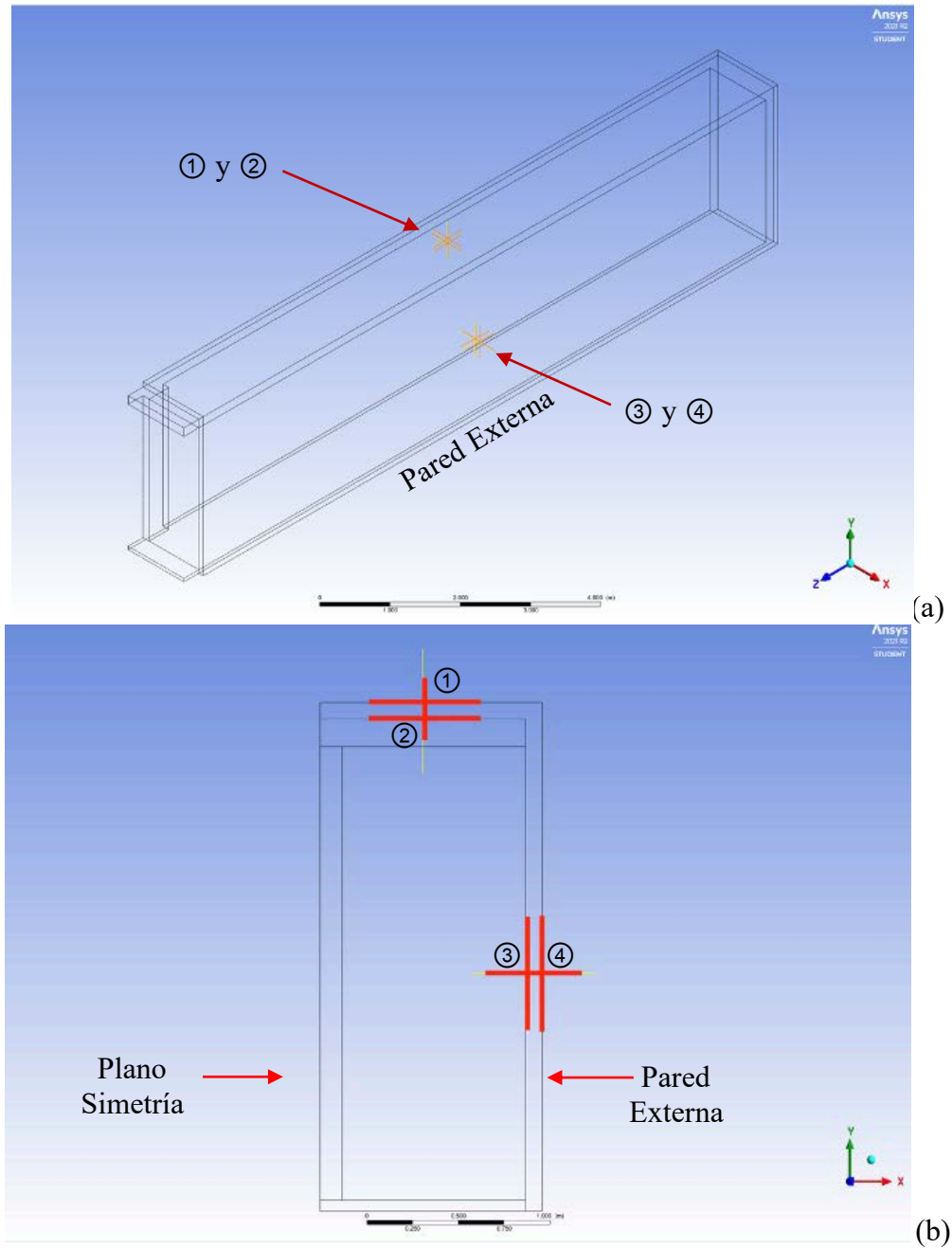


**Figura 19.** Ilustración de las zonas de aplicación de las condiciones de frontera. Las flechas azules representan la entrada de aire, las rojas la salida. Las dos zonas delineadas en rojo representan el área de aplicación de calor.

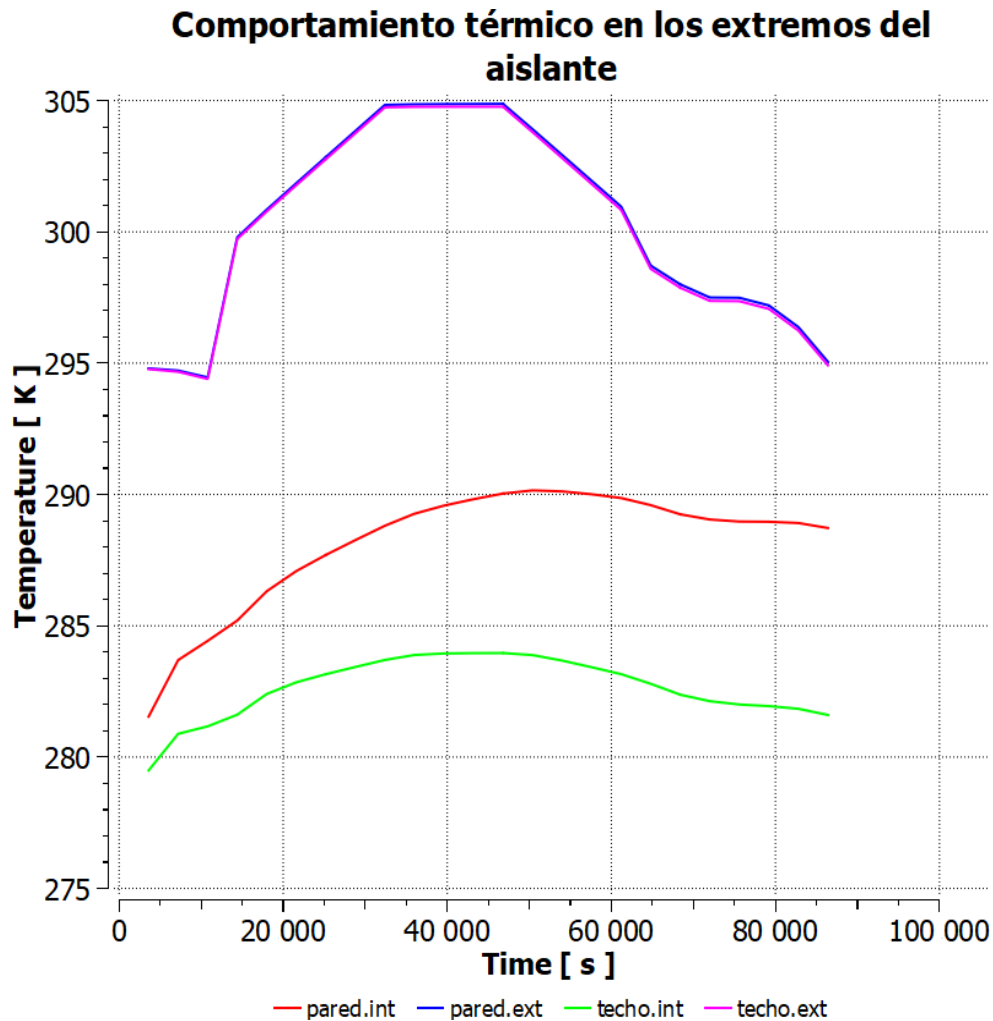


**Figura 20.** Construcción digital del acomodo en condiciones originales con la capa de aislante.

En la simulación realizada se registran datos en cuatro puntos de interés para conocer la variación de temperatura por causa de las condiciones ambientales. La ubicación de estos puntos se especifica en la **Figura 21** y la curva de temperatura de estos puntos durante 24 h se da en la **Figura 22**.



**Figura 21.** Ubicación de los puntos: ①techo externo, ②techo interno, ③pared interna y ④pared externa (a) Vista Isométrica; (b) Vista Frontal.

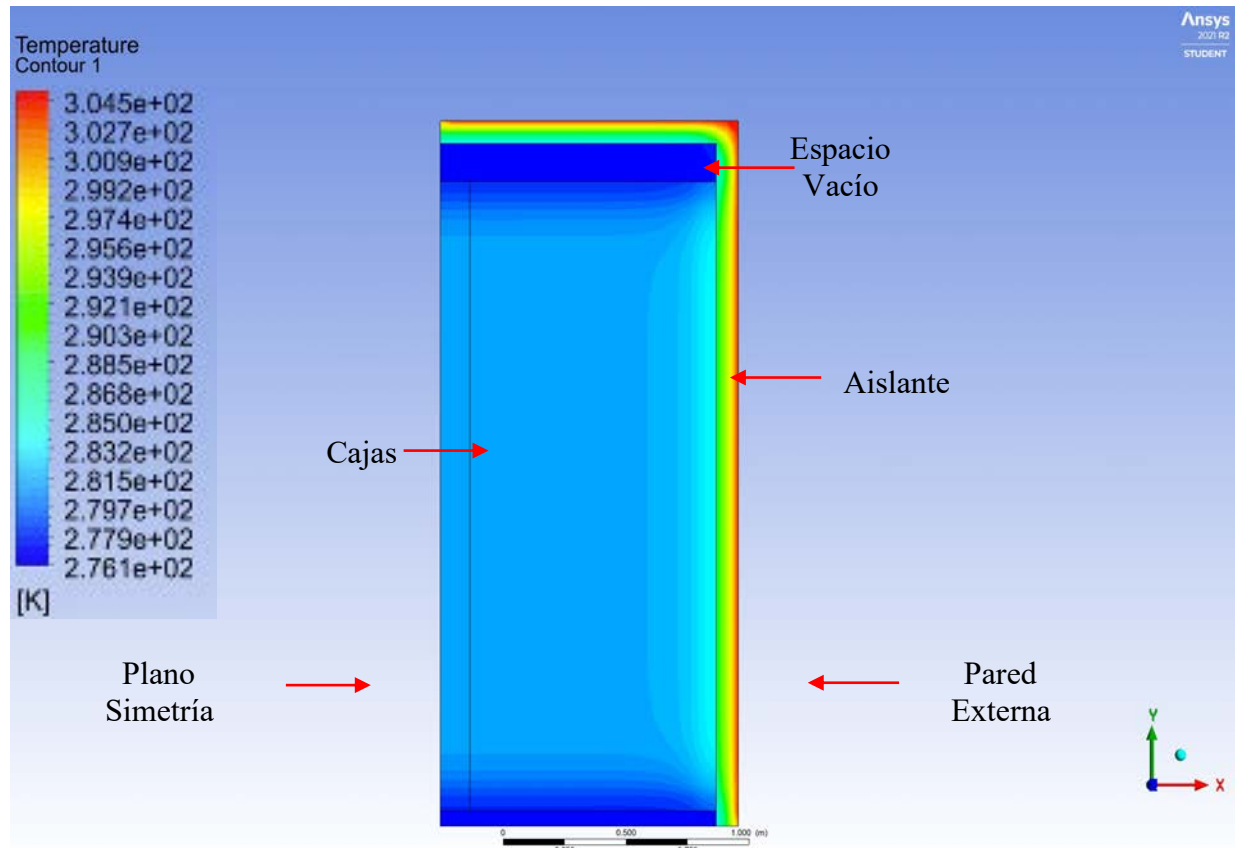


**Figura 22.** Comportamiento térmico de la cara interna y externa del aislante ubicado en la pared y techo a partir de las 0 h del día.

Por último, se observa en la gráfica de la **Figura 22** como el aislante evita un ingreso de temperatura de al menos  $10^{\circ}\text{C}$  al interior del contenedor, comprobando la eficacia de la espuma de poliuretano como aislante. Cabe también resaltar como la cara interna del techo al estar expuesta al flujo frío de aire, cambia poco su temperatura al final del día, y posiblemente se reduzca a su temperatura inicial con el pasar de unas horas más en las cuales no hay incidencia de radiación por ser de noche.

La cara interna aumenta su temperatura en alrededor de  $6^{\circ}\text{C}$ , motivo al contacto con la masa de cajas que se encuentran generando calor por respiración. Según se ve en la **Figura 22** la hora con mayor temperatura registrada es a las 12 medio día (correspondiente a 43 200 segundos), en la **Figura 23** se observa el perfil de temperatura en un corte transversal a través de la capa de

aislante, las cajas con producto y los espacios vacíos con aire frío. El **ANEXO II** muestra el cambio de gradiente de temperatura para las 24 horas de simulación.



**Figura 23.** Perfil de temperatura en el plano central del contenedor a las 12 horas.

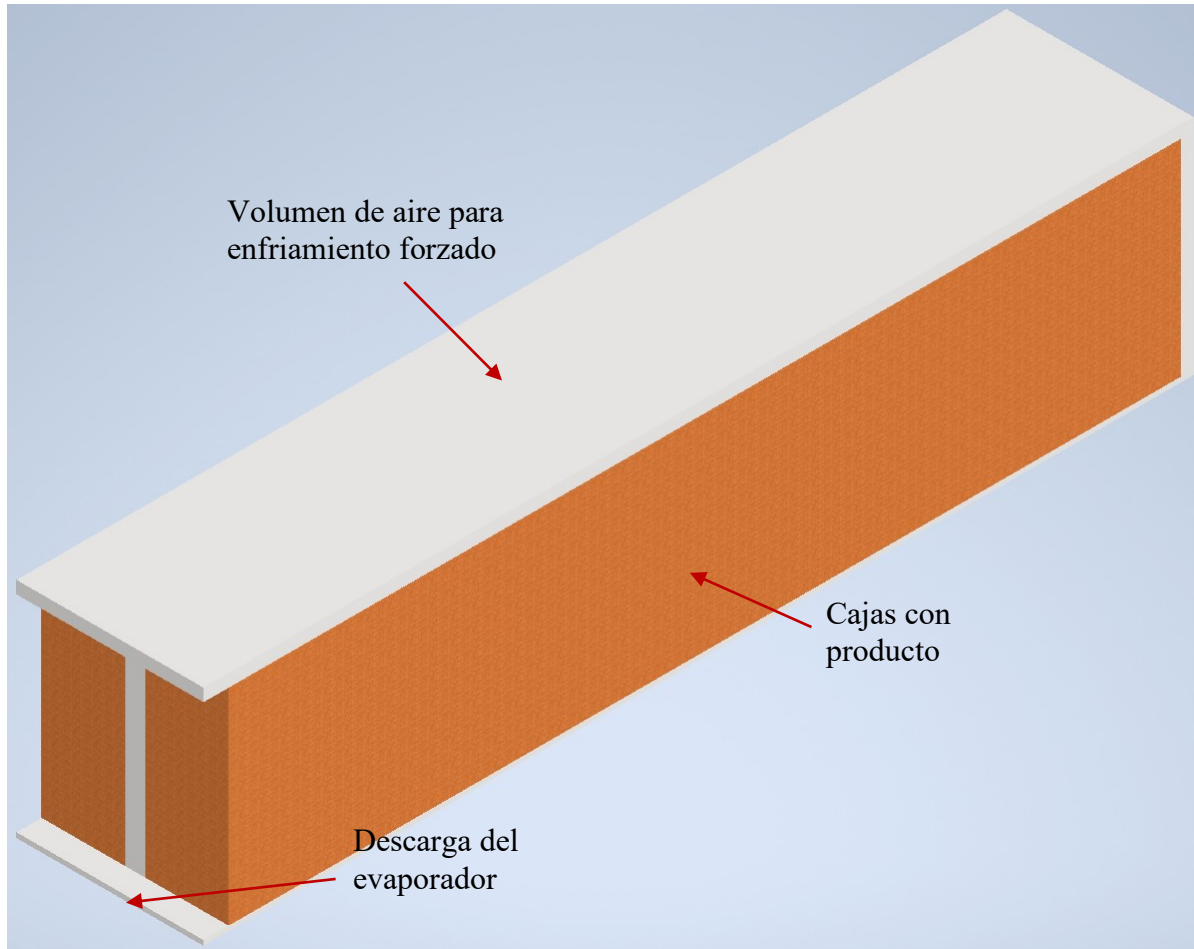
En la **Figura 23** se manifiesta el efecto del aislante y la capacidad que tiene el aislante para limitar el flujo de calor del ambiente externo al producto; en la simulación de 24 horas se observa que en la zona de la pared, donde no hay un flujo de aire, el flujo de calor proveniente del ambiente logra transmitirse a las cajas, mas no en el caso del techo, donde el flujo de aire frío elimina el efecto del calor proveniente del ambiente sobre las cajas. Esta fue la primera simulación, hecha con el objetivo de conocer la eficacia del aislante para prevenir el flujo de calor desde el ambiente, tal que se pudiera definir si este valor era significativo de considerar para los futuros modelos.

#### 4.2.4 Modelación del comportamiento térmico dentro del contenedor en las condiciones actuales de embalaje.

En las modelaciones se consideró la temperatura ambiental como la de un punto específico detallado en la sección 4.2.1, no con la temperatura ambiental en el transporte. Estas temperaturas ambientales no es posible medirlas debido a que el contenedor se encuentra en un barco y no había posibilidad de colocar un sensor en el exterior de este. Motivo a que el transporte es por barco, no se contempla la transferencia del calor desde el suelo, como se indica por Arif *et al.* (46).

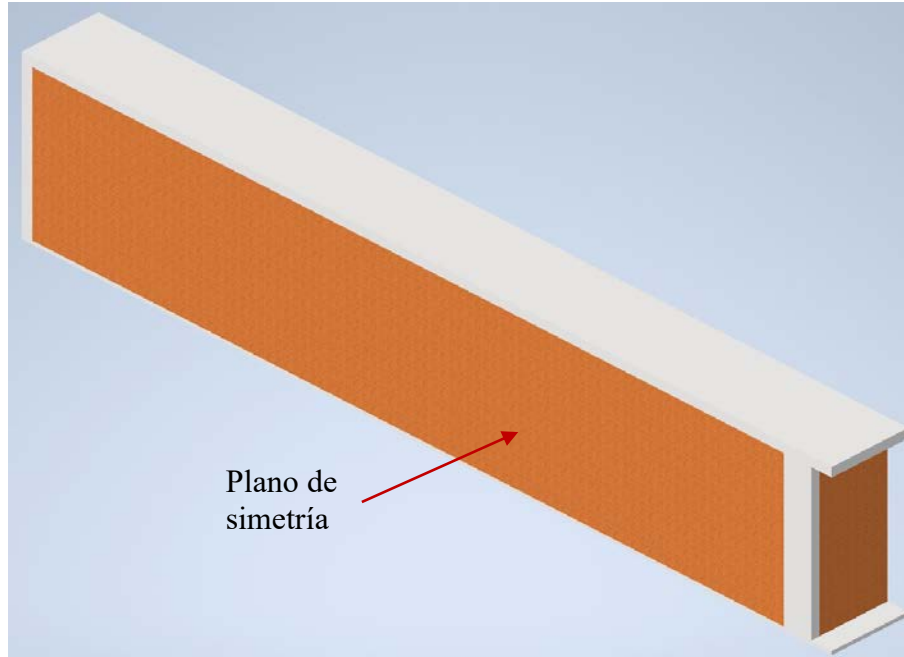
Se realizó una construcción digital del acomodo actual de las cajas (**Figura 24**). Este modelo representa únicamente el interior del contenedor, incluyendo solamente el espacio con aire frío y las cajas. Al ingresar esta geometría en ANSYS se encuentra que el tamaño de los elementos de la malla no pueden tener una dimensión menor a 10 cm sin excederse del número de elementos máximo permitido para la licencia estudiantil(512 000 elementos máximos). Con este tamaño de malla se inicia la corrida del programa; sin embargo, por motivo de una malla tan gruesa, se encuentra un incremento exponencial en los residuales de la energía, esto se da cuando el tamaño de cada celda es muy grande, ocasionando divergencia.





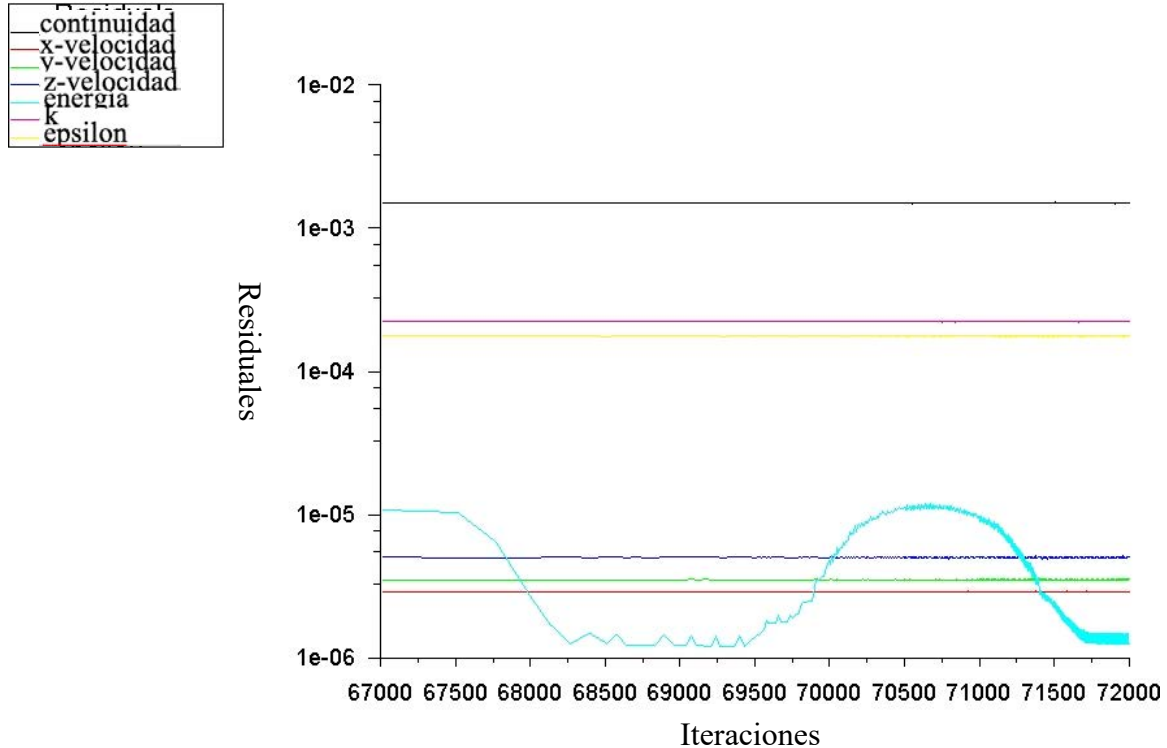
**Figura 24.** Representación digital del acomodo actual de las cajas en el contenedor. El espacio con aire para enfriamiento se representa con el color gris y las cajas con color café.

Para solucionar el problema, se decide realizar el modelo con una sección simétrica de este, en el cual el eje de simetría se encuentra en la dirección longitudinal del contenedor, ver **Figura 25**. Con esta nueva geometría se utiliza un tamaño de elemento de máximo 5 cm, para un total de 487 090 divisiones.



**Figura 25.** Representación del modelo original con un corte en el plano de simetría.

Con esta nueva geometría ilustrada en la **Figura 25** se corre el modelo en estado transitorio durante los 20 días de trasiego indicados por la empresa. El  $\Delta t$  en la simulación utilizado es de 120 s ya que permite reducir el tiempo computacional de cálculo de la solución sin incurrir en un comportamiento caótico de la gráfica de residuales; además, se realizan 5 iteraciones por cada  $\Delta t$  y se guardan resultados cada 4 horas de simulación. El total de  $\Delta t$  es de 14 400, equivaliendo a 72 000 iteraciones ó 1 728 000 segundos (correspondiente a los 20 días). La simulación se realizó en computadora científica de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la UCR, Dell Precision Tower 7810 con una capacidad de 64 GB de memoria RAM, con un procesador Intel Xeon de 3.10 GHz; el tiempo necesario para este número de iteraciones fue de 58 horas. La gráfica de residuales en las últimas 5 000 iteraciones calculadas se ilustra en **Figura 26**.

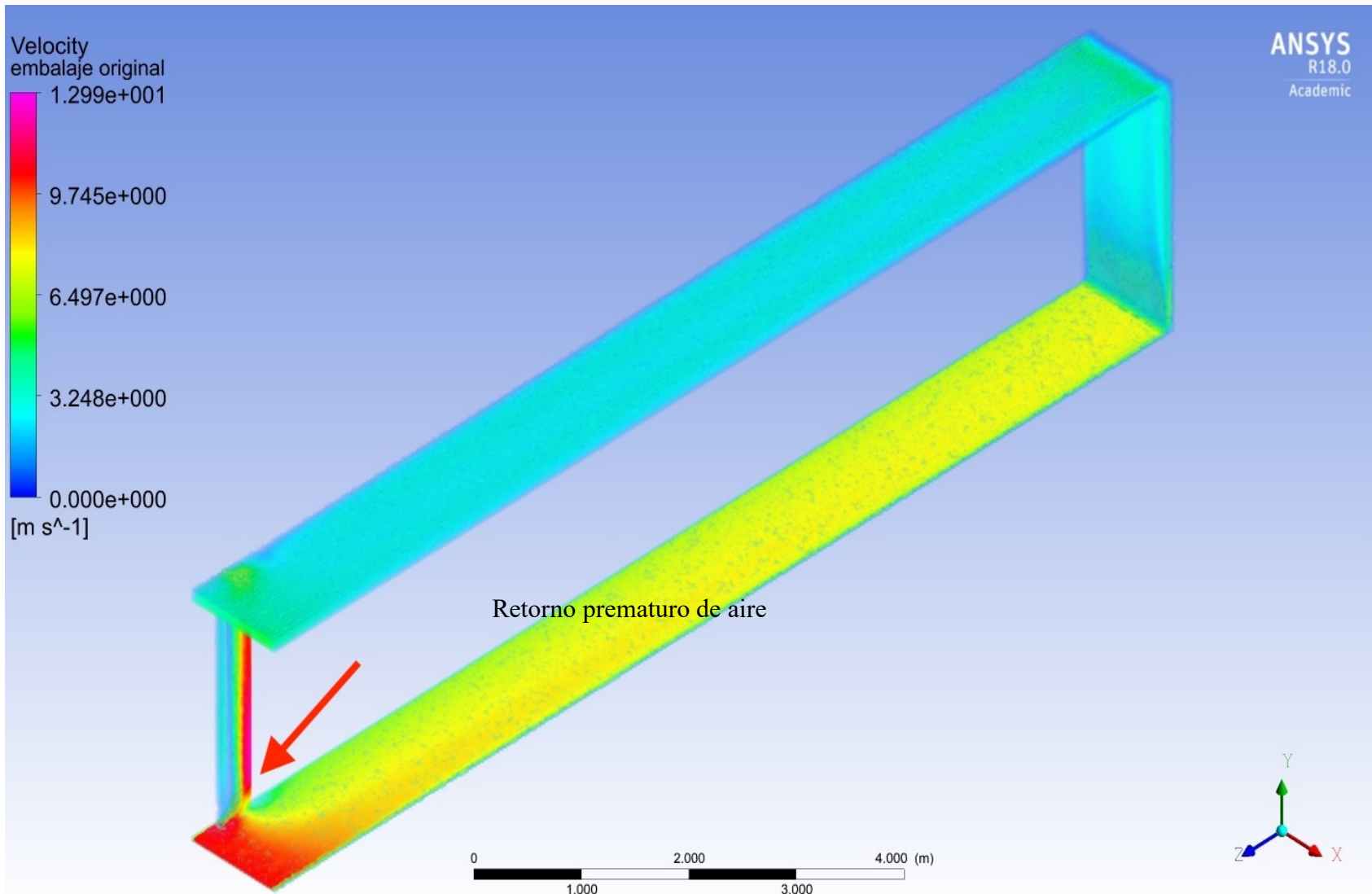


**Figura 26.** Diagrama del comportamiento de residuales para las últimas 5 000 iteraciones del modelo de envío en condiciones originales de embalaje.

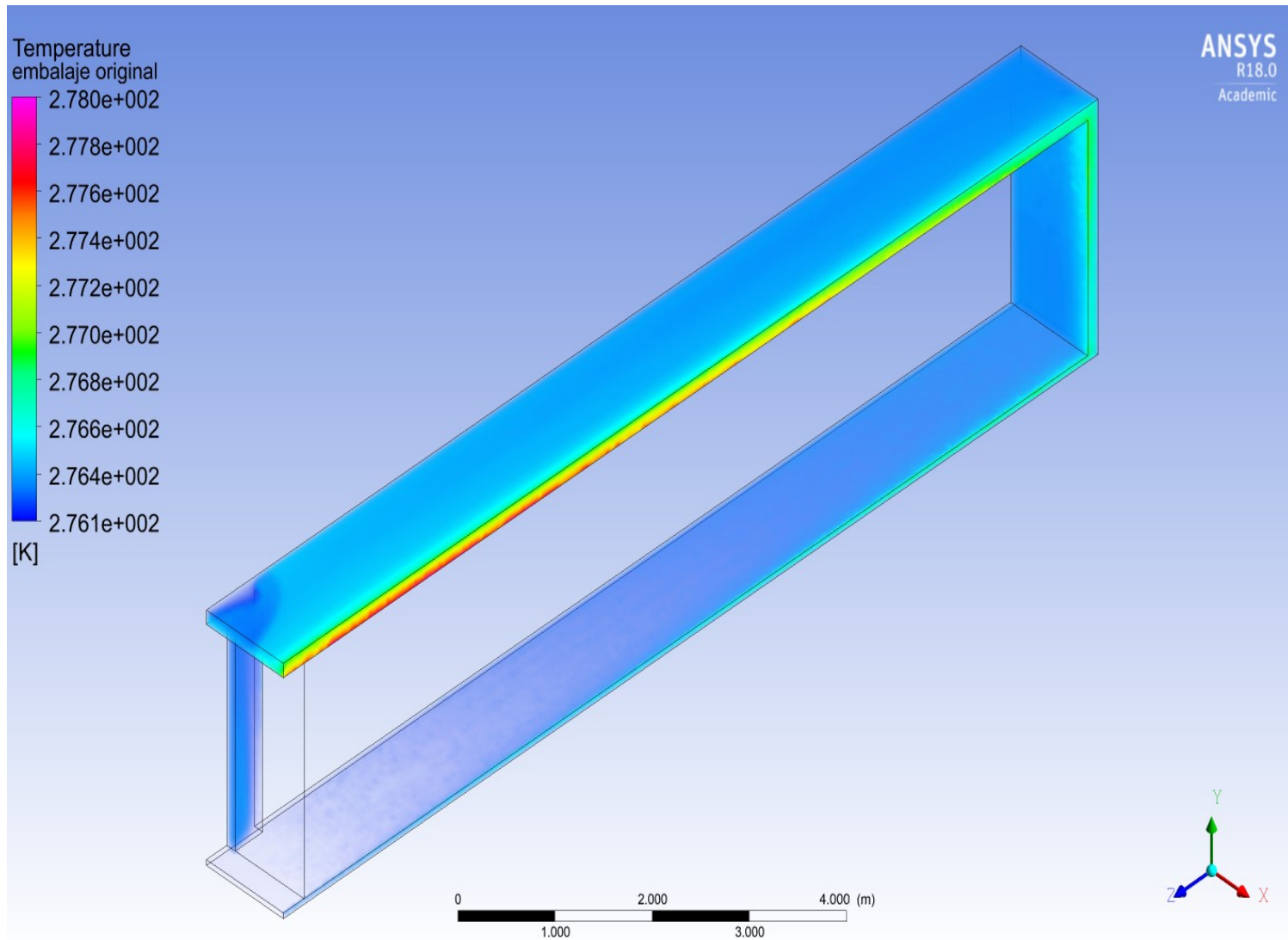
Ahora bien, en la

**Figura 27** se señala el espaciamiento entre las dos columnas en la primera fila (detallado en la **Figura 15a**) que regresa prematuramente aire al evaporador, provocando una menor disponibilidad de aire frío para enfriar las cajas. Esto tiene un efecto desventajoso para el enfriamiento ya que ocasiona zonas con poco flujo de aire, esto se transfiere en una menor capacidad de enfriamiento. Este impacto se puede visualizar como repercute en la constancia de temperatura del aire frío como se observa en la **Figura 28**, donde se ilustra en la parte inferior poca constancia en el ingreso de temperatura a 3 °C por falta de caudal.



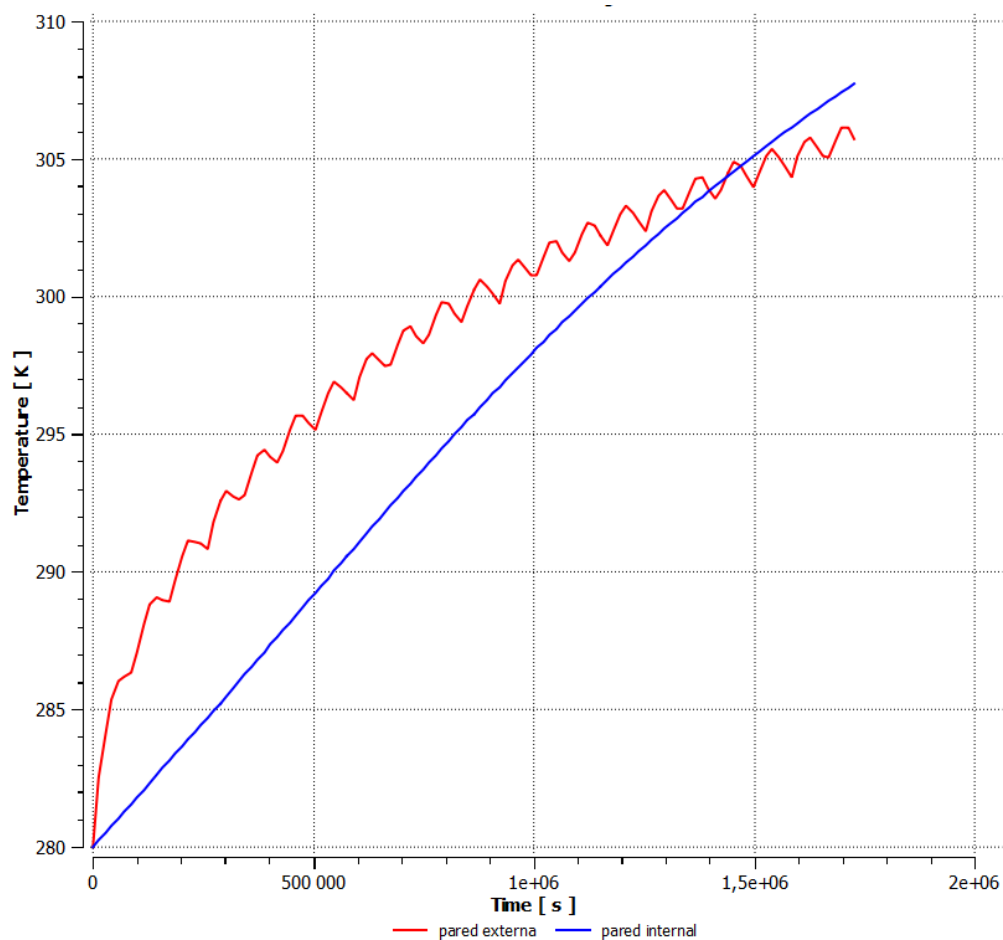


**Figura 27.** Comportamiento del fluido de aire frío una vez se encuentra completamente desarrollado.



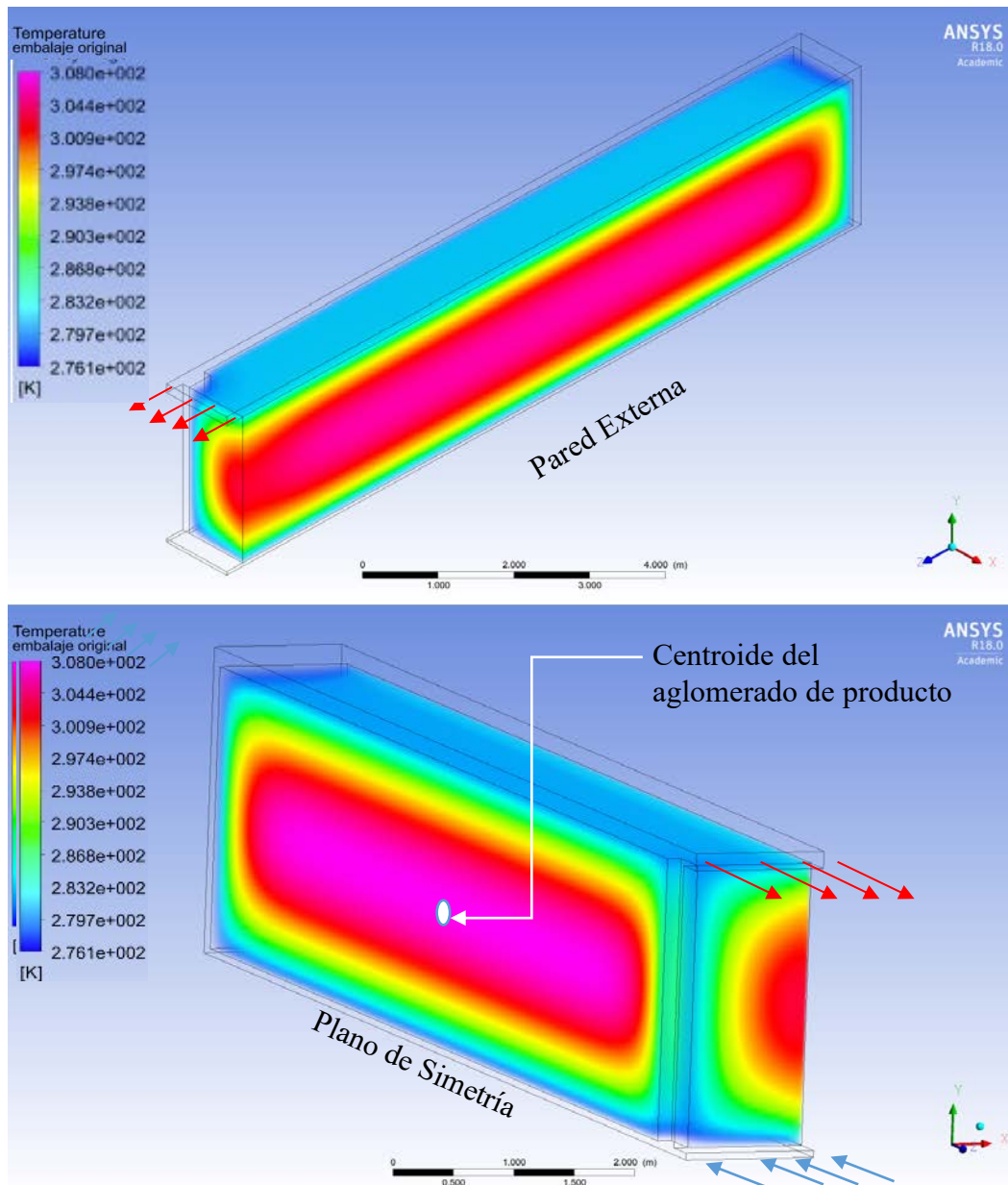
**Figura 28.** Perfil de temperatura del aire en su paso a través del espacio vacío en el contenedor

En cuanto a la simulación de la temperatura se puede observar en la **Figura 29** con el paso del tiempo como aumenta la temperatura, muy lejanas a las adecuadas para su transporte. El cambio de la temperatura de la cara aledaña a la pared se da por el cambio de las condiciones ambientales durante el día; cabe resaltar que las horas sin luz no son suficientes para disminuir la temperatura de las cajas de regreso a su temperatura original al inicio del transporte,  $280K(6,85^{\circ}C)$ . Aunado al aumento de temperatura a causa de la radiación solar, se demuestra una atribución a su incremento por el calor de respiración; esto porque, en la pared interna, donde no surge efecto el ingreso de calor a causa del ambiente, hay un incremento de temperatura.



**Figura 29.** Varianza de la temperatura durante 20 días en el centro geométrico del plano de simetría del contenedor y la cara externa aledaña a la pared para las condiciones actuales de embalaje.

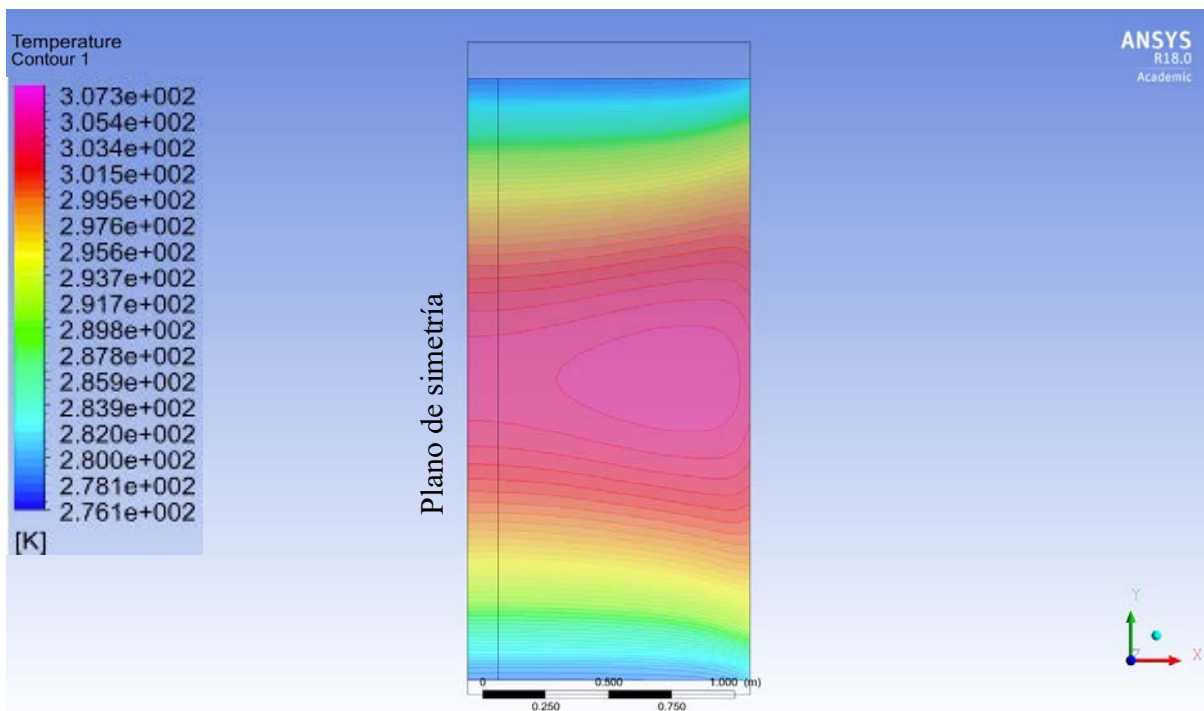
En la **Figura 30**, se muestra el perfil de temperatura del contenedor y producto después de 20 días de trasiego. Se observa como debido al calor por respiración, la temperatura y radiación ambiental, la masa de cajas y producto reporta una temperatura de hasta 35 °C en su punto más caliente (centroide del aglomerado de producto). Es visible también como el flujo de aire frío no logra extraer más calor que el producido y transferido del ambiente, por la reducida zona de contacto aire/caja que permitiría la disminución de temperatura gracias a la convección forzada.



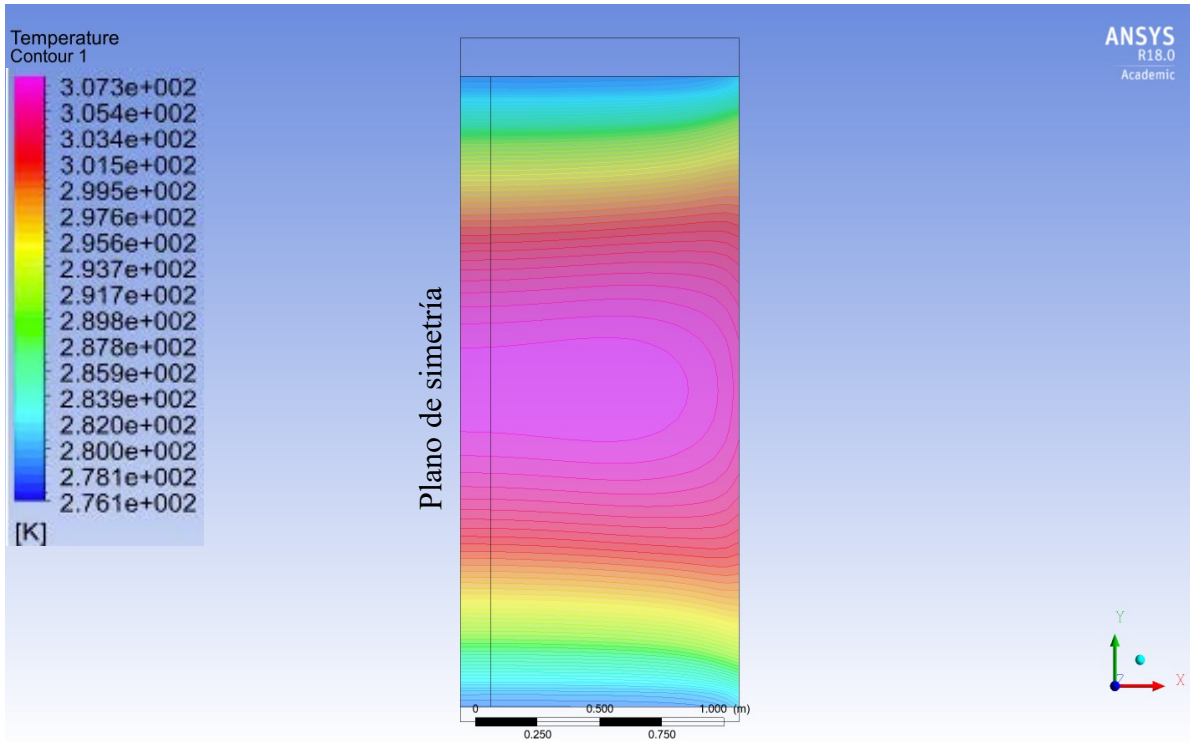
**Figura 30.** Distribución de temperatura en el producto empacado una vez finalizado el tiempo de transporte para las condiciones originales de embalaje.



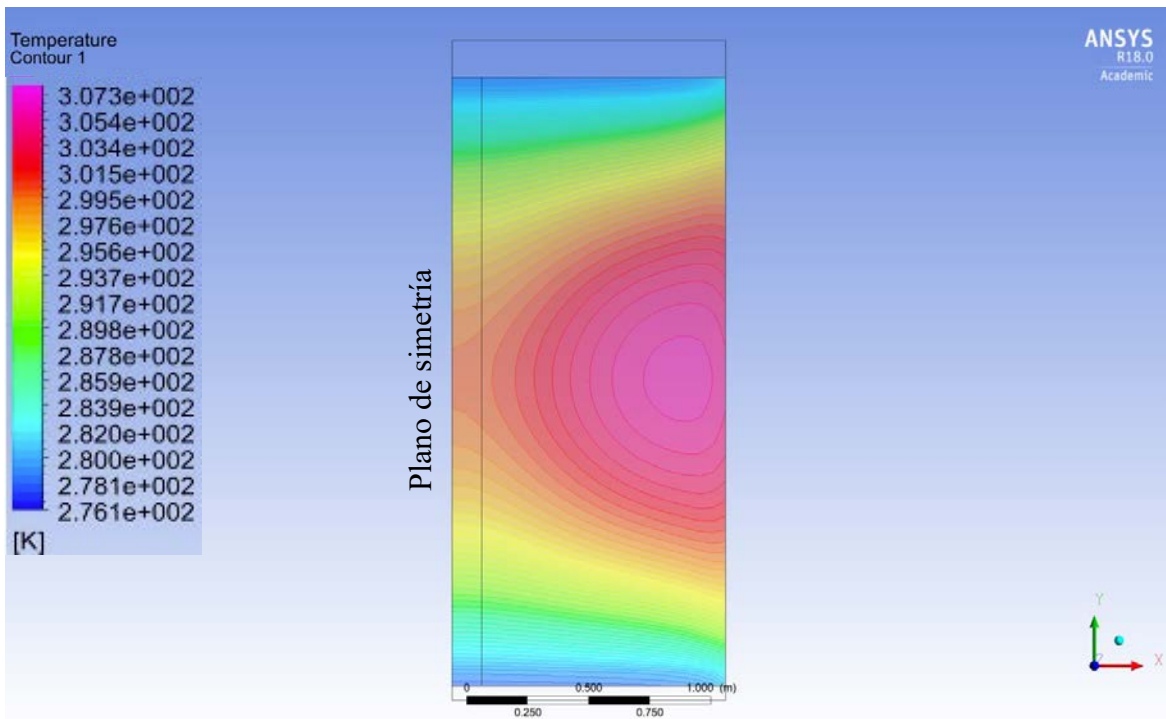
Con el fin de conocer la distribución de temperatura a través de la longitud del contenedor se representa en la **Figura 31, 32 y 33** contornos de temperatura en diferentes ubicaciones detalladas en la **Figura 34**; en dichas figuras se aprecia como la columna de aire frío que tempranamente escapa reduce la temperatura en el plano de simetría de las cajas, pero comparándolo con la **Figura 30**, estas menores temperaturas no perduran. Ahora bien, en el plano más cercano a las compuertas, donde el aire retorna, la franja rosada representante de mayor temperatura, es más pequeña que el plano central, comprobando como a mayor exposición con aire frío, menor será la temperatura en las cajas.



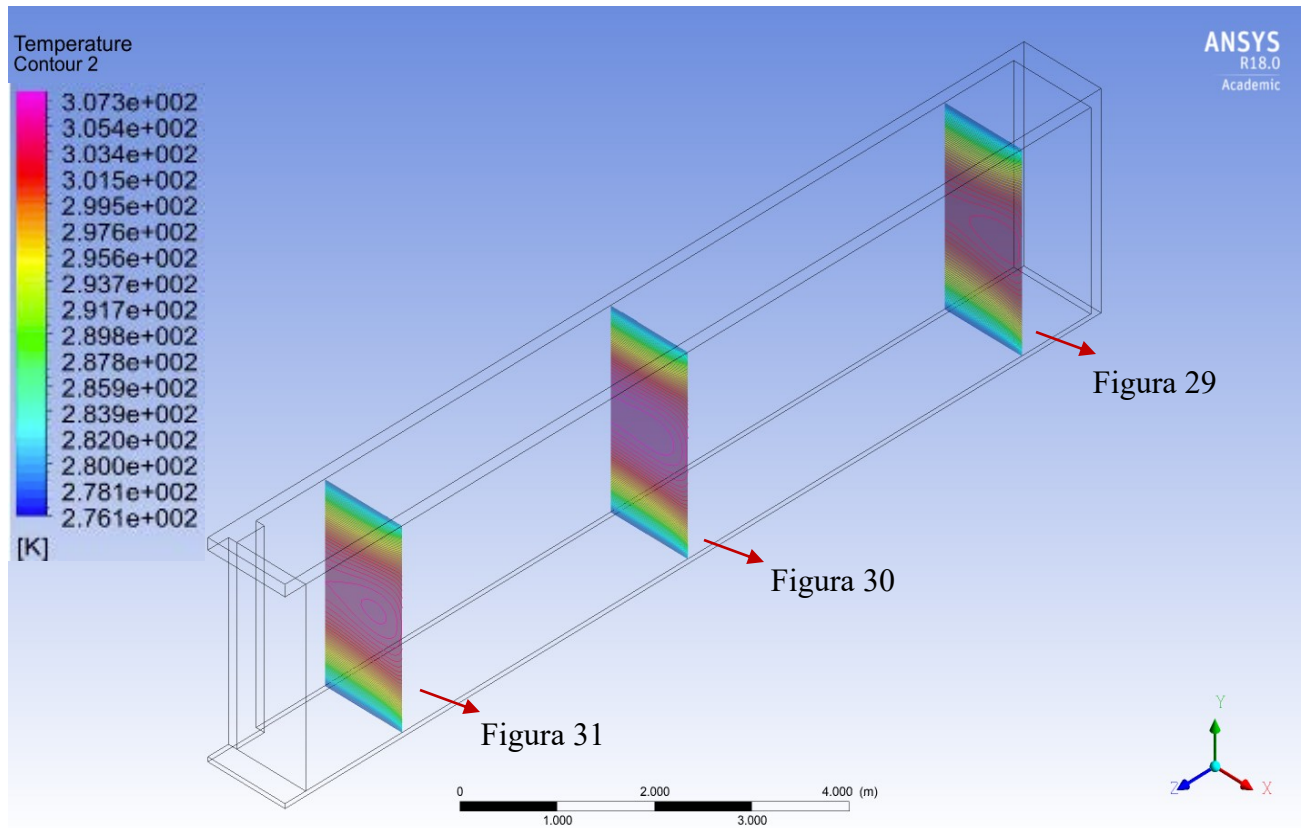
**Figura 31.** Contorno de temperatura en un plano ubicado a 1 m de las compuertas del contenedor.



**Figura 32.** Contorno de temperatura en un plano ubicado a la mitad del contenedor.



**Figura 33.** Contorno de temperatura en un plano ubicado a 1m del final del contenedor.



**Figura 34.** Detalle de los contornos de temperatura representados de la **Figura 31** a **33**.

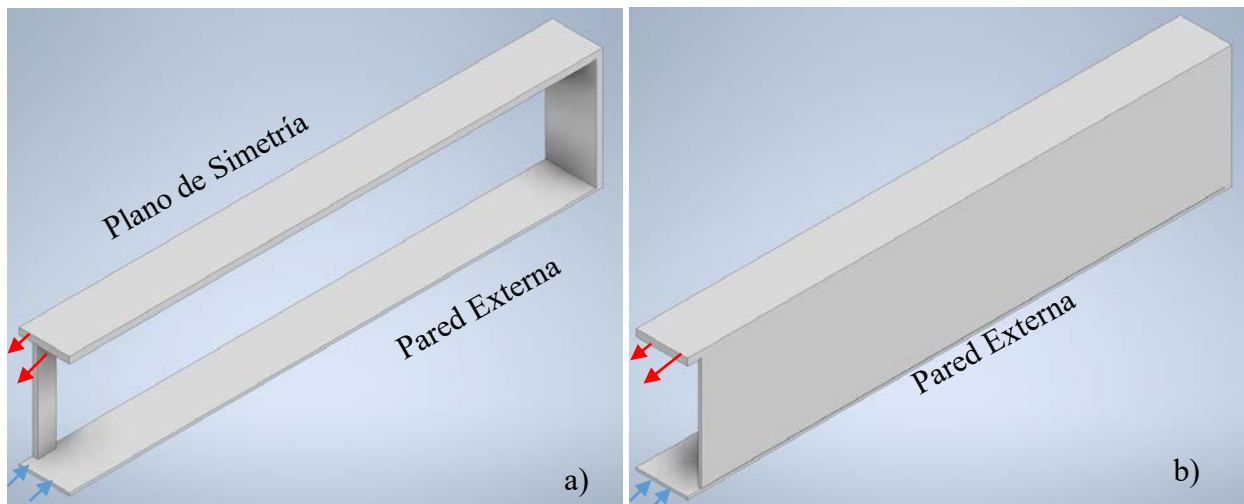
Con base a lo observado en los resultados de esta sección 4.2 se aprecia como a pesar de la presencia del aire frío a la temperatura asignada para su transporte, no se logra llegar a la temperatura de almacenaje de los empaques. Esto se atribuye a las condiciones ambientales y el calor de respiración proveniente del follaje. Debido a estas condiciones se procede en la sección 4.3 a realizar una modelación en la que se elimine el ingreso de calor proveniente del ambiente al incluir un flujo de aire frío entre la pared externa y el aglomerado de cajas.

### 4.3 Simular mediante la modelación computacional de fluidos diferentes orientaciones y acomodo de las cajas, con elementos espaciadores entre ellas para mejorar la transferencia de calor entre el producto y el aire enfriado.

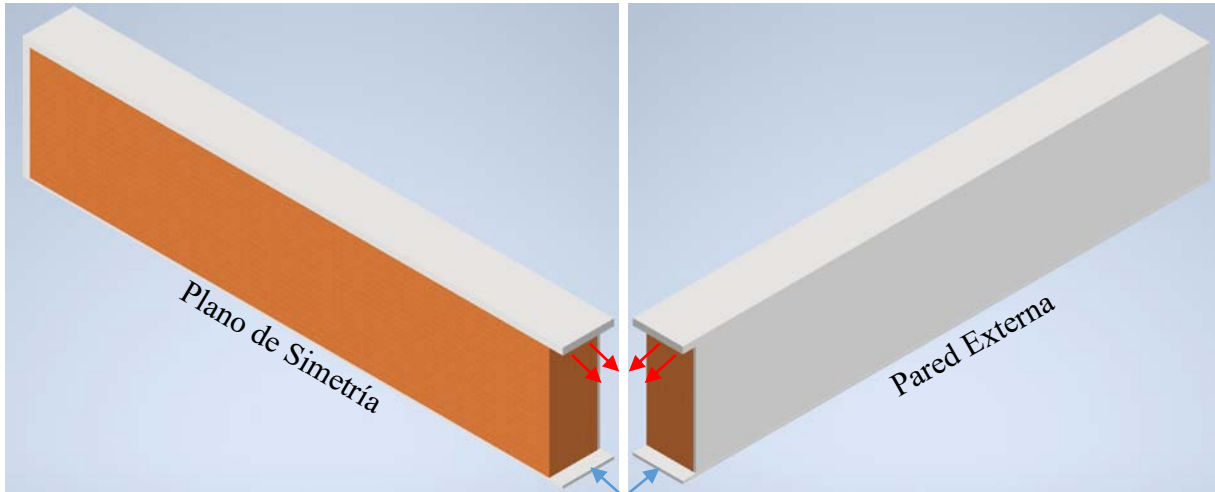
#### 4.3.1 Primera propuesta de mejora

Como se presenta en los resultados de la modelación en las condiciones originales, en la

**Figura 27** se aprecia un regreso indeseable de aire frío a la succión del evaporador; además, se muestra como existe una entrada importante de calor proveniente de las condiciones ambientales externas al contenedor. Por lo mencionado anteriormente se evalúa una propuesta de mejora que consta en eliminar el espacio entre ambas columnas de la primera fila (el señalado en la **Figura 15a**), e incluir un espaciamiento en las paredes laterales, para proveer de una capa de aire frío entre la pared y las cajas. Las propiedades de los materiales serán las mismas, al igual que las condiciones de frontera y los modelos utilizados en la modelación en condiciones originales. Las modificaciones realizadas se ven representadas a continuación en la **Figura 35**, y la construcción digital en la **Figura 36**. Cabe resaltar que esta propuesta repercute en la cantidad de cajas que se coloquen en el contenedor, el número de cajas a exportar disminuye en 66 unidades (un 4,125% del total original).

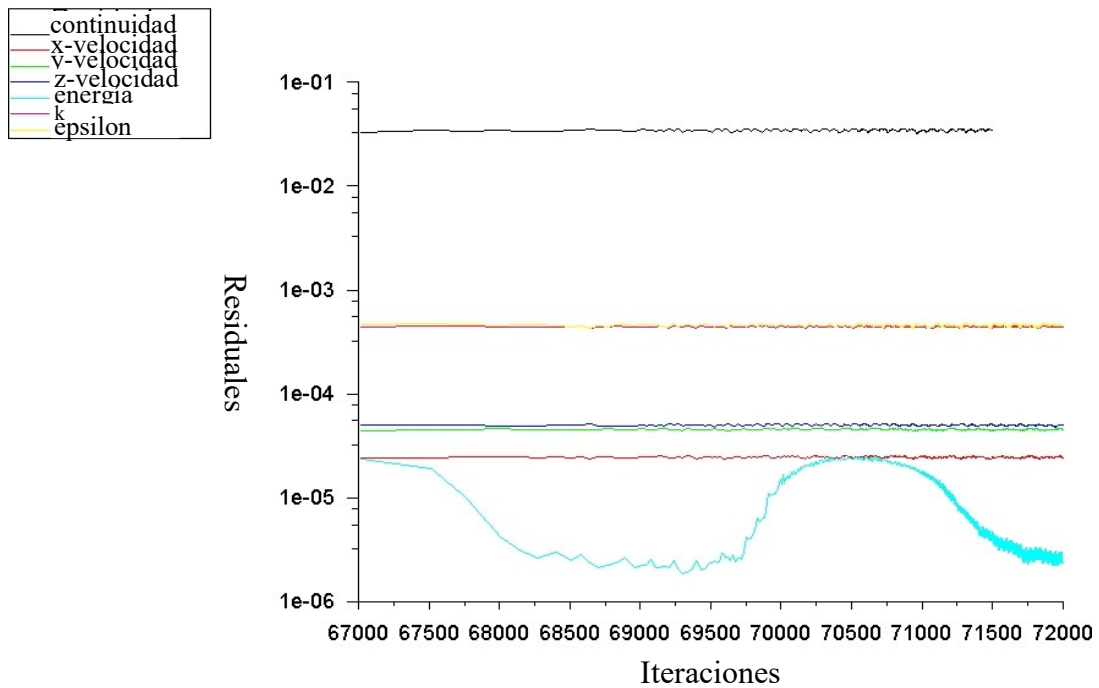


**Figura 35.** Representación del espacio vacío del contenedor, a) en condiciones originales y b) opción 1 de mejora



**Figura 36.** Representación digital de la propuesta de mejora del arreglo. Cuerpo gris representa el espacio vacío contenido por aire y lo café el aglomerado de producto.

La modelación de la primera propuesta de mejora se realizó con el mismo equipo de cómputo utilizado para el cálculo en condiciones de embalaje originales. Aunado, se aplicaron las mismas condiciones transitorias de cálculo; refiriéndose a las iteraciones por  $\Delta t$  y número de iteraciones. El número de elementos fue de 509 289. El tiempo de uso computacional fue de 101 h y se muestra en la **Figura 37** el diagrama de residuales para las últimas 5000 iteraciones.

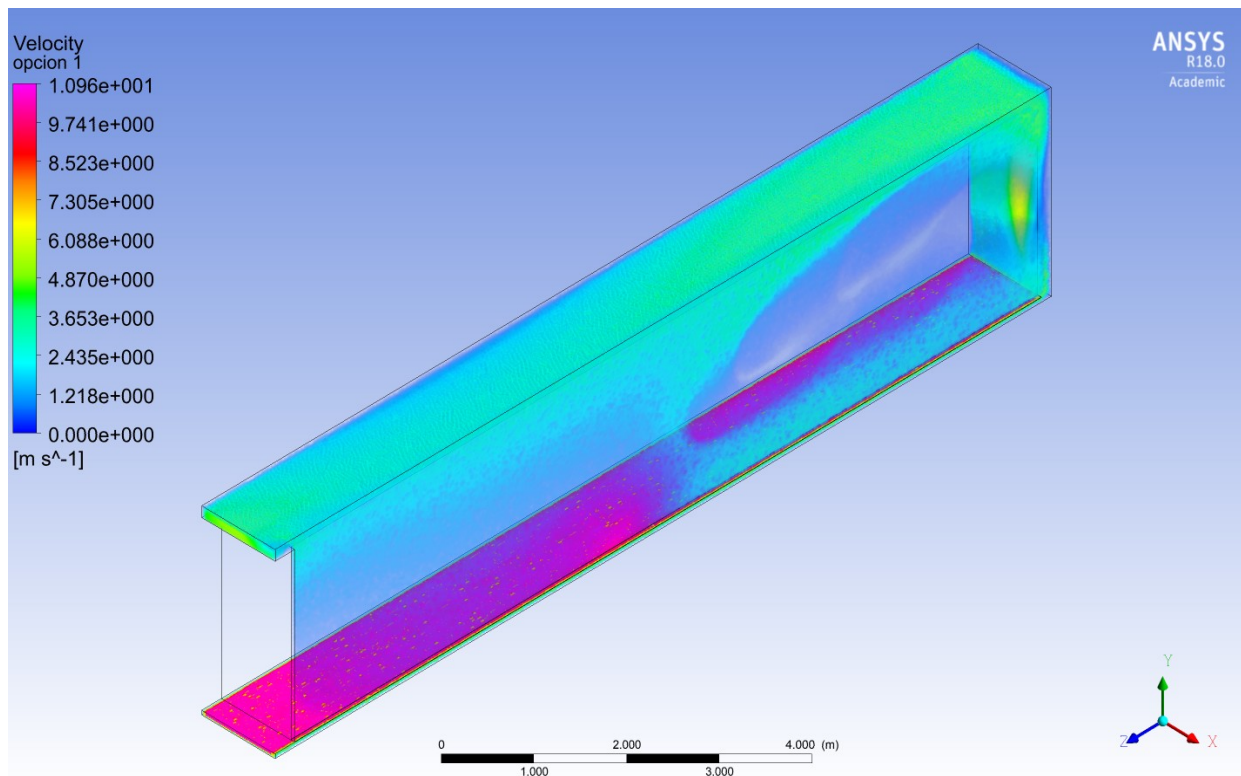


**Figura 37.** Diagrama del comportamiento de residuales para las últimas 5 000 iteraciones del modelo de la primera propuesta de embalaje

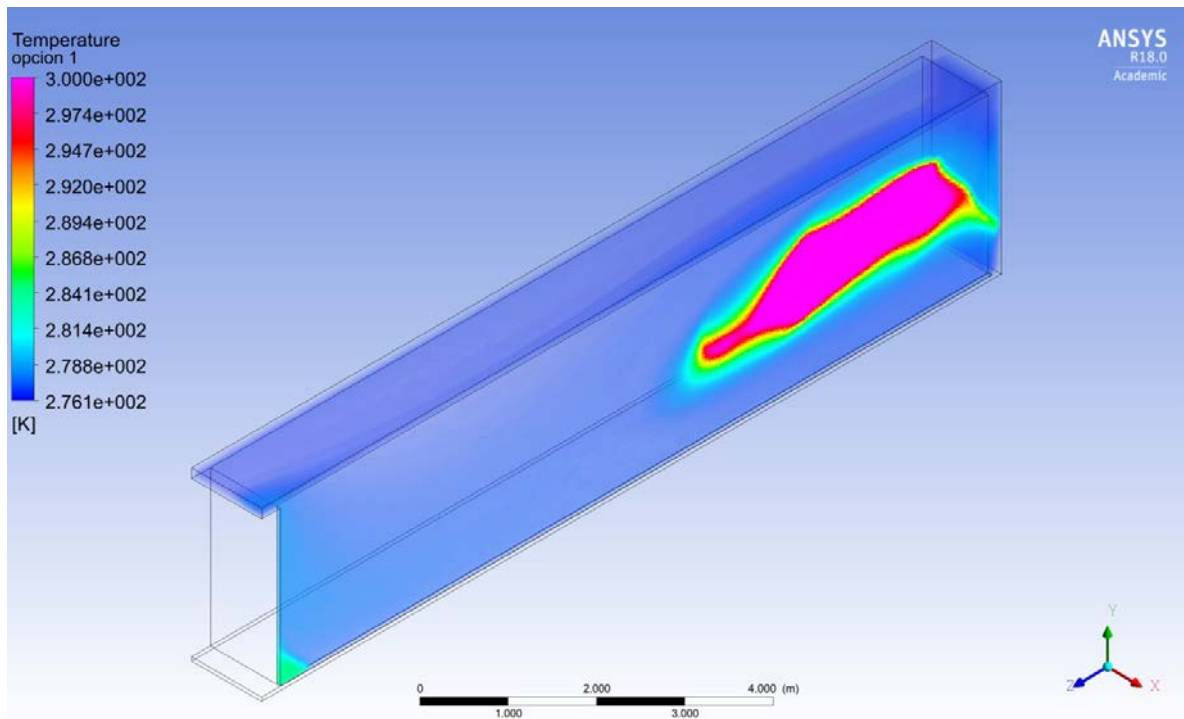
El perfil de velocidad del aire se ve representado en la **Figura 38**; en esta se observa un incremento en la velocidad por la homogeneidad del aire en la zona del contrapiso, debido a la eliminación del espacio entre cajas señalado en la

**Figura 27** (véase la distribución de la velocidad del aire en la zona del contrapiso en la

**Figura 27** vs. **Figura 38**); sin embargo, la distribución del flujo de aire frío no se encuentra constante como se desearía en la pared, viendo que existen muchos espacios transparentes, estos espacios transparentes representan zonas donde no fluye el aire. Esto se atribuye a que la entrada a esta zona se da una vez que el aire sale al final del contrapiso, donde el aire va con un momento que hace que un mayor flujo de aire suba paralelo a la puerta hacia el retorno por el techo. Cuando se equiparan las presiones es que se produce un retorno, aproximadamente a la mitad del contenedor, como se observa en la **Figura 38**, siendo el techo la zona donde se concentran las mayores velocidades después de salir del piso falso. Esta faltante de flujo de aire se ve reflejada en la **Figura 39** donde se encuentra un foco de calor en dichas zonas de poco tránsito de aire frío.

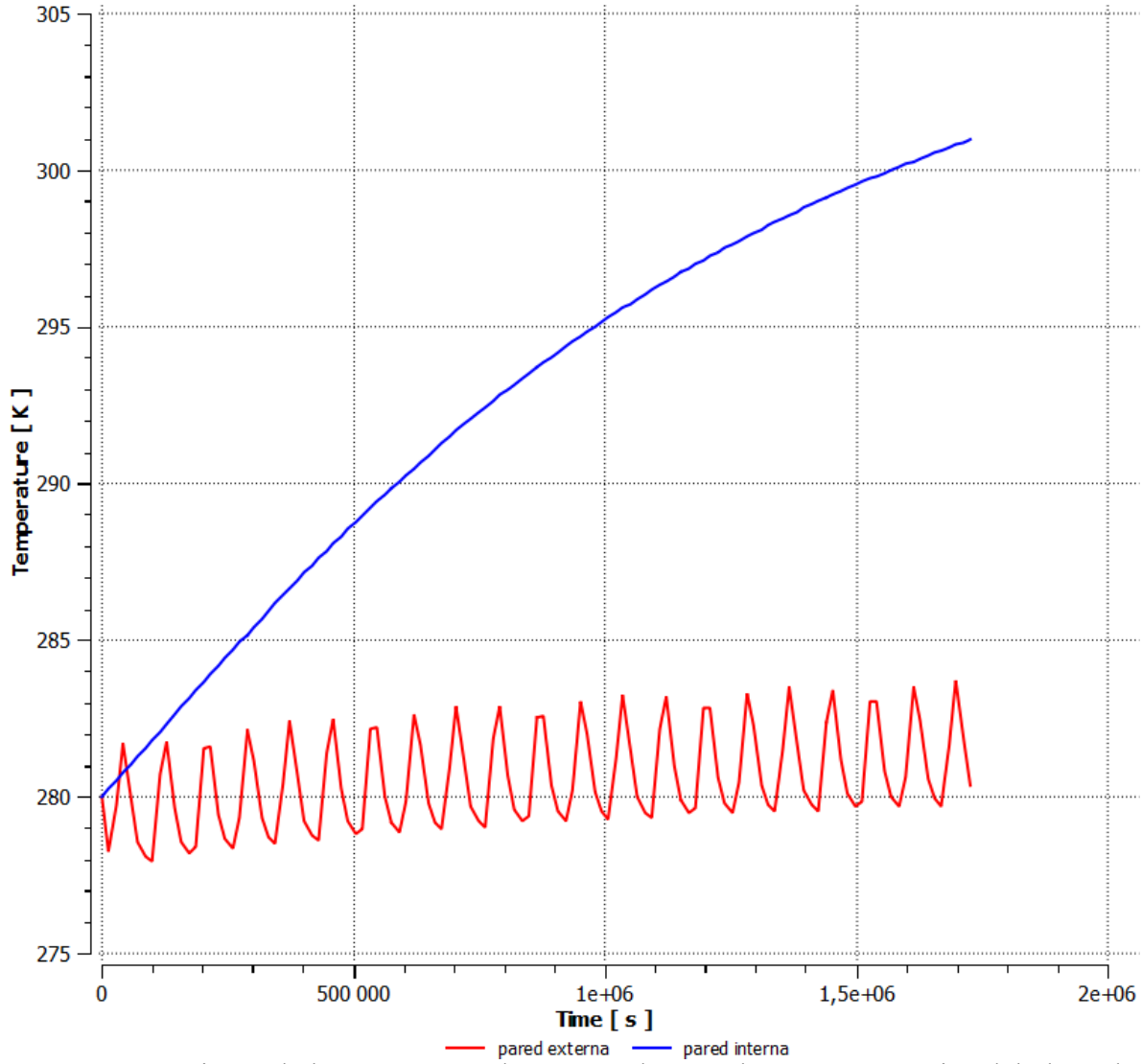


**Figura 38.** Representación digital del comportamiento del flujo de aire a través del espacio vacío para la primera propuesta de mejora del arreglo.



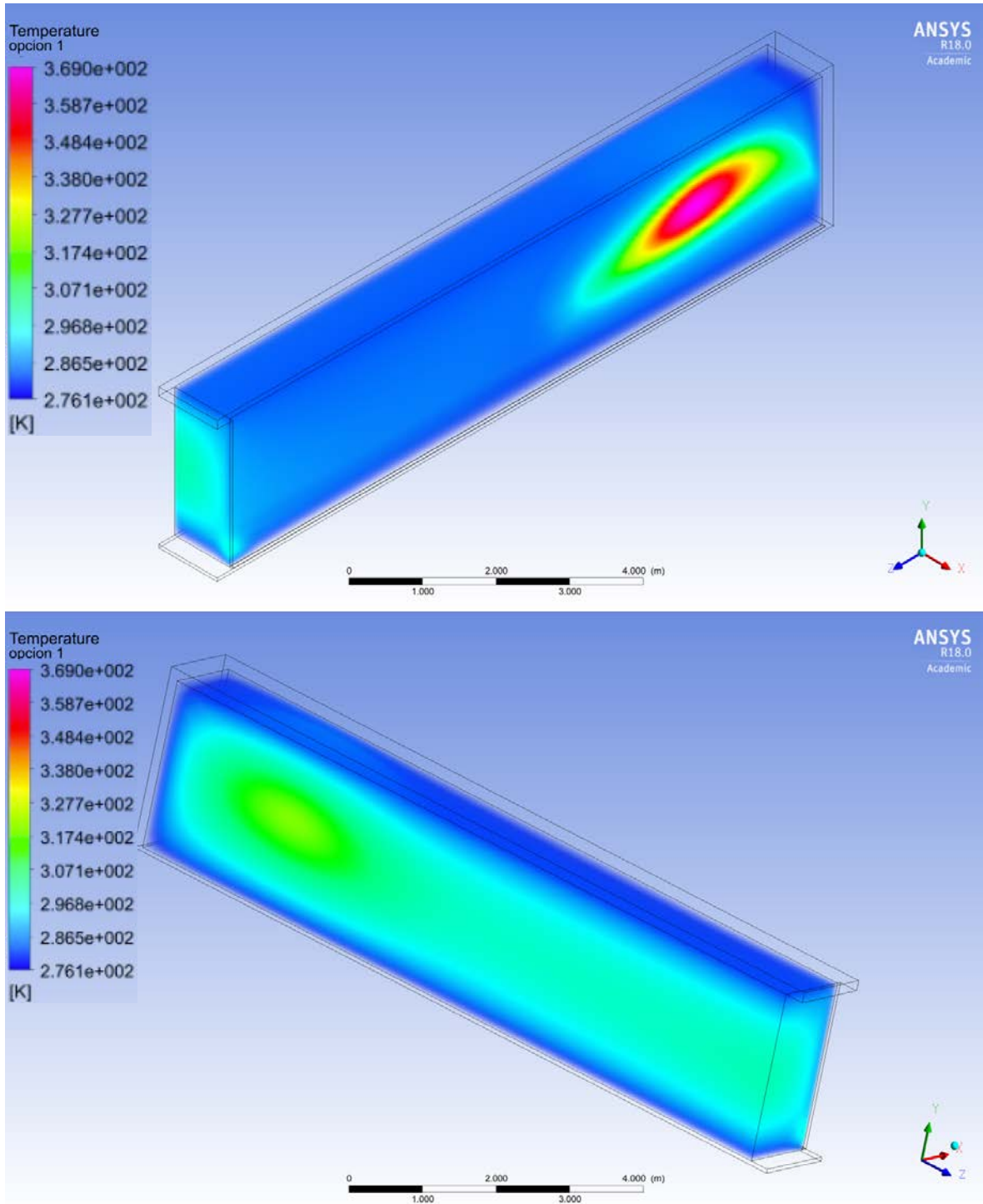
**Figura 39.** Representación digital del comportamiento de la temperatura del fluido a través del espacio vacío para la primera propuesta de mejora del arreglo.

En cuanto al comportamiento de la temperatura de las cajas después del trasiego, se encuentra una importante mejora en la temperatura promedio de las cajas. En el gráfico presentado en la **Figura 40** se aprecia una disminución de  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  en el centroide de la masa de cajas respecto al acomodo original y de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  en la pared externa. Sin embargo, existen focos de calor en la pared externa como se observa en la **Figura 41**, con relación a lo mencionado sobre la **Figura 39**; además, este foco de calor afecta la temperatura de las cajas sobre el plano de simetría. Se incluyen tres planos de distribución de temperatura para especificar el comportamiento térmico a través de la masa de cajas, desde la **Figura 42** a la **Figura 44** y la ubicación de estos en la **Figura 45**.

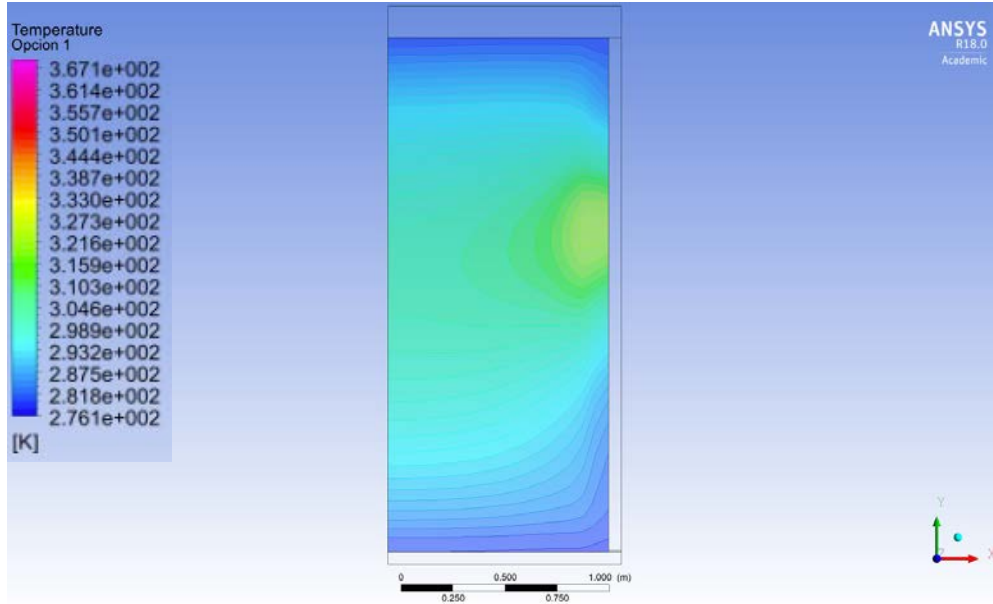


**Figura 40.** Varianza de la temperatura durante 20 días en el centro geométrico del plano de simetría del contenedor y la cara externa aledaña a la pared en la opción 1 de acomodo de las cajas en el contenedor.

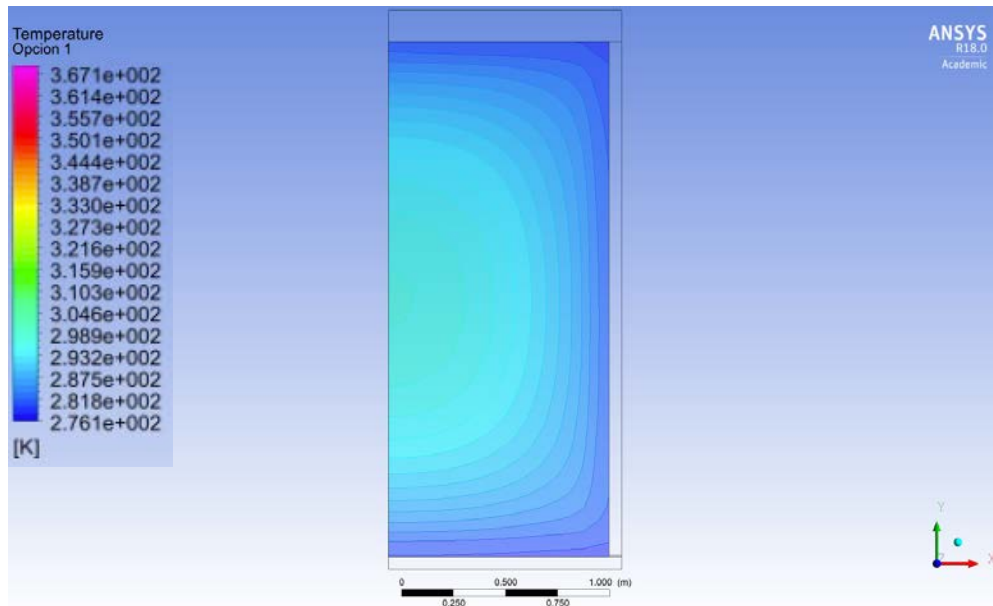




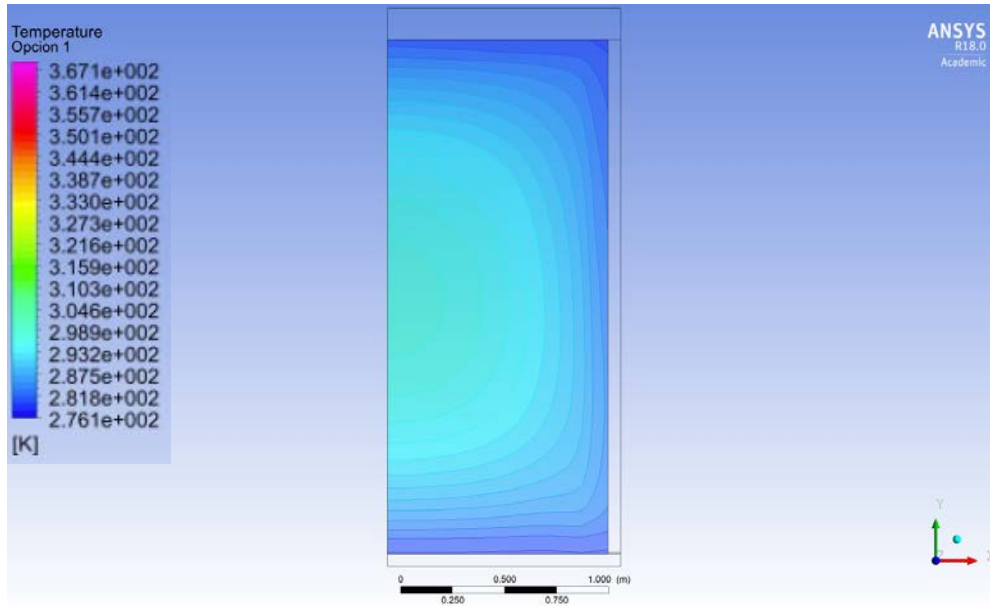
**Figura 41.** Distribución de temperatura del producto empacado una vez finalizado el tiempo de transporte en la condición 1 de mejora.



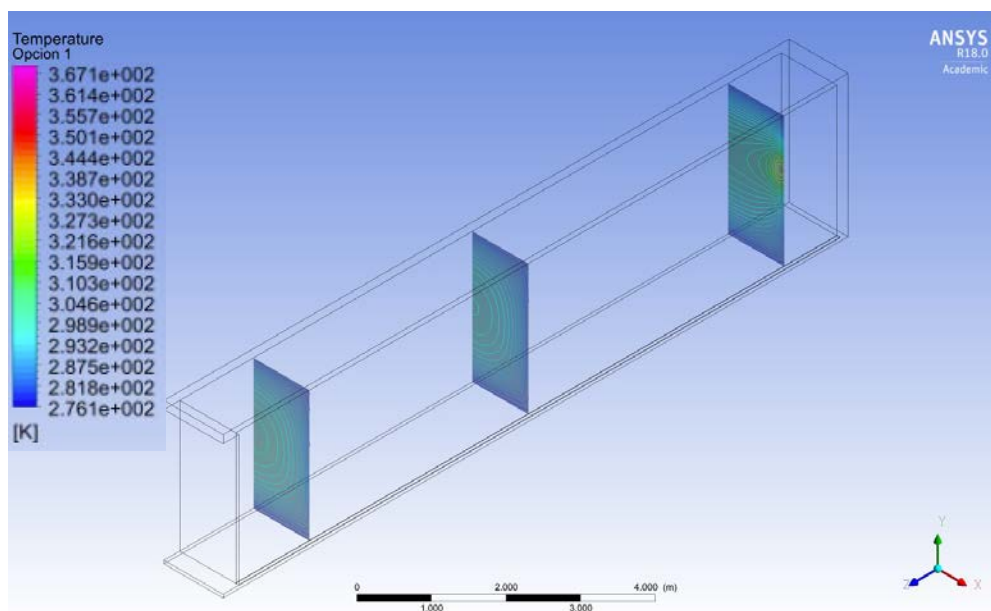
**Figura 42.** Contorno de temperatura en un plano ubicado a 1m de las compuertas del contenedor.



**Figura 43.** Contorno de temperatura en un plano ubicado a la mitad del contenedor.



**Figura 44.** Contorno de temperatura en un plano ubicado a 1m del final del contenedor.



**Figura 45.** Detalle de los contornos de temperatura representados de la **Figura 42** a **44**.

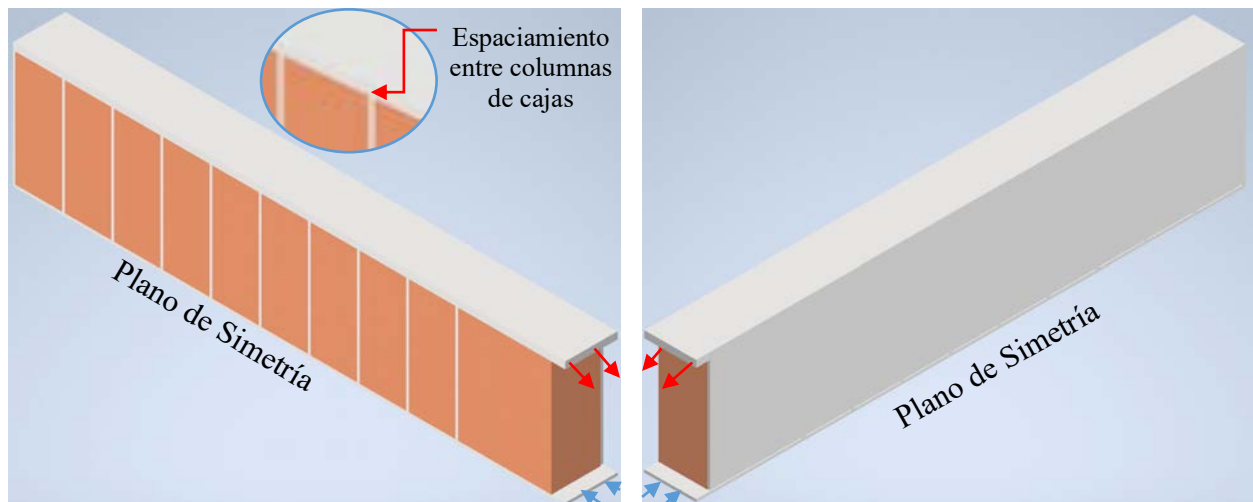
Esta primera opción de mejora consigue disminuir drásticamente el ingreso de calor proveniente del ambiente, disminuyendo en  $22^{\circ}\text{C}$  la temperatura del punto central de la pared externa y  $7^{\circ}\text{C}$  en el plano de simetría. Sin embargo sigue existiendo problema con la temperatura de las cajas y la distribución del aire frío por el foco de calor visto en la **Figura 41**. En la opción dos de mejora se ahonda en mejorar esta distribución de aire frío para reducir la entrada de calor

desde el ambiente e incluir espaciamiento entre las cajas para aumentar la superficie de contacto entre empaque y flujo de aire.

#### 4.3.2 Segunda propuesta de mejora

En la primera opción de mejora se presenta una solución que disminuye drásticamente el flujo de calor proveniente del ambiente hacia la masa de cajas. Esta alternativa a pesar de que logra contrarrestar esta adición de calor, no provee de una convección suficiente que mantenga y disminuya la temperatura inicial de las cajas. Por esto se propone una segunda opción de embalaje que incremente el área de contacto de las cajas con aire frío, como se muestra en la **Figura 46**.

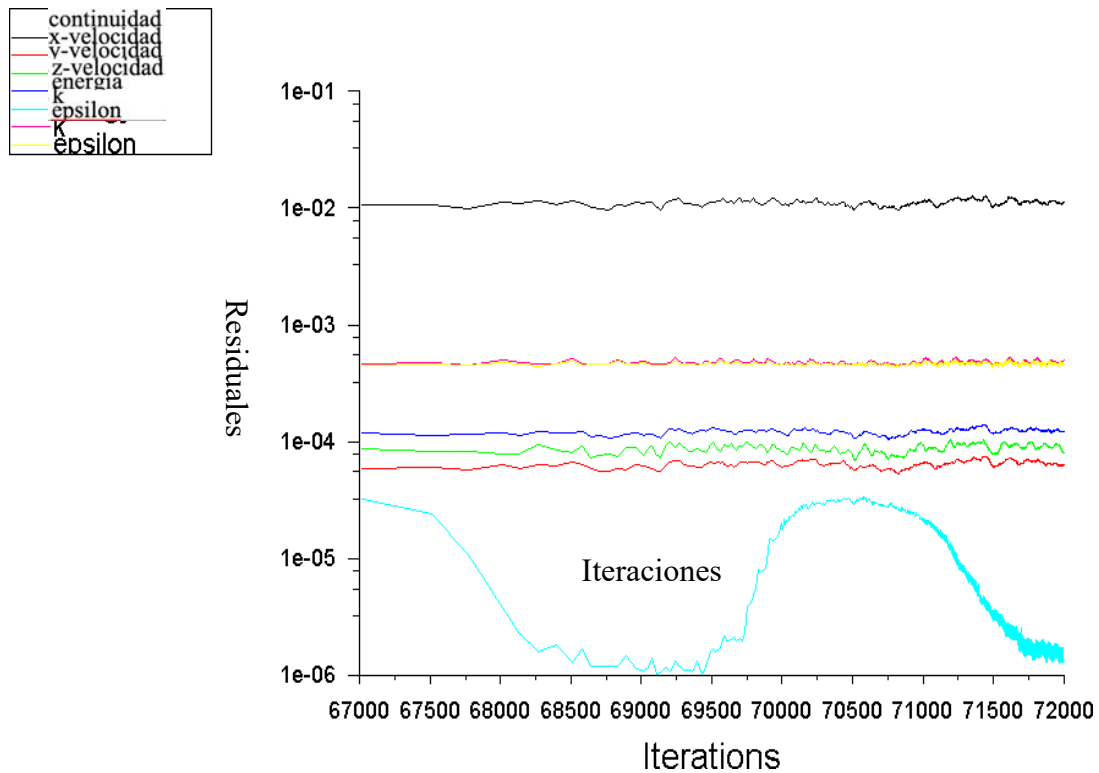
Esta propuesta parte de la anterior, en la que se elimina el espacio vacío detallado en la **Figura 15a** y se incluye un espacio vacío en la pared lateral; el cambio de esta propuesta se da en eliminar la primera columna de cajas, 20 empaques, para sumar espacio entre cada columna de cajas. Una reducción de 7 % respecto a la cantidad original de cajas. El espacio entre cada columna de cajas es de 5,5 cm, el máximo posible sin decrecer el número de columnas de cajas.



**Figura 46.** Reconstrucción digital de la segunda propuesta de mejora en el arreglo.

La modelación de la segunda propuesta de mejora se realizó con el mismo equipo utilizado para el cálculo en condiciones de embalaje originales. Aunado, se aplicaron las mismas condiciones transitorias de cálculo; refiriéndose a las iteraciones por cada  $\Delta t$ , número de  $\Delta t$  calculados y tiempo entre cada uno. El número de elementos fue de 509 889. El tiempo de uso computacional fue de 140 h y se muestra en la **Figura 47** el diagrama de residuales para las

últimas 5000 iteraciones.

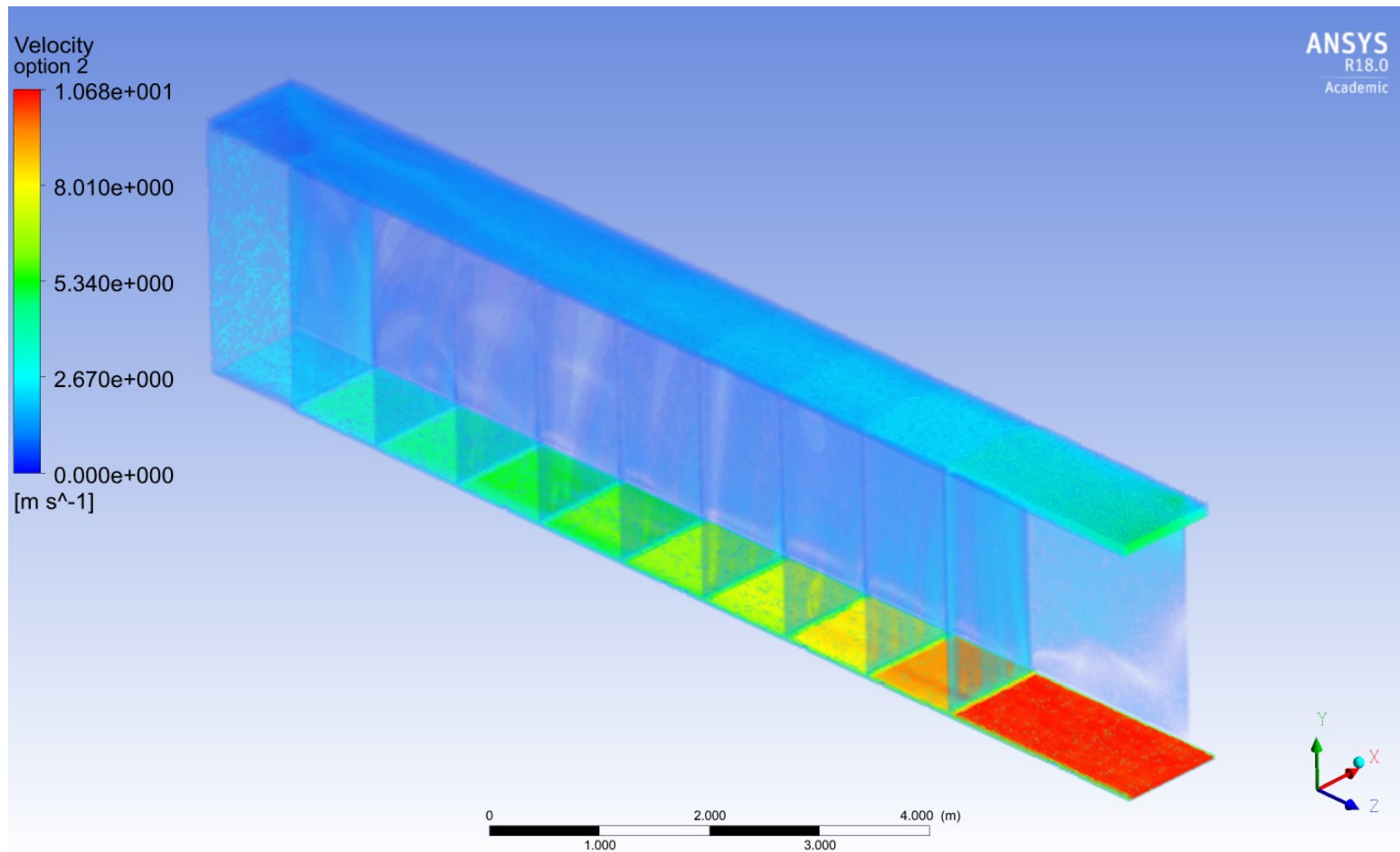


**Figura 47.** Diagrama del comportamiento de residuales para las últimas 5 000 iteraciones del modelo de la segunda propuesta de embalaje

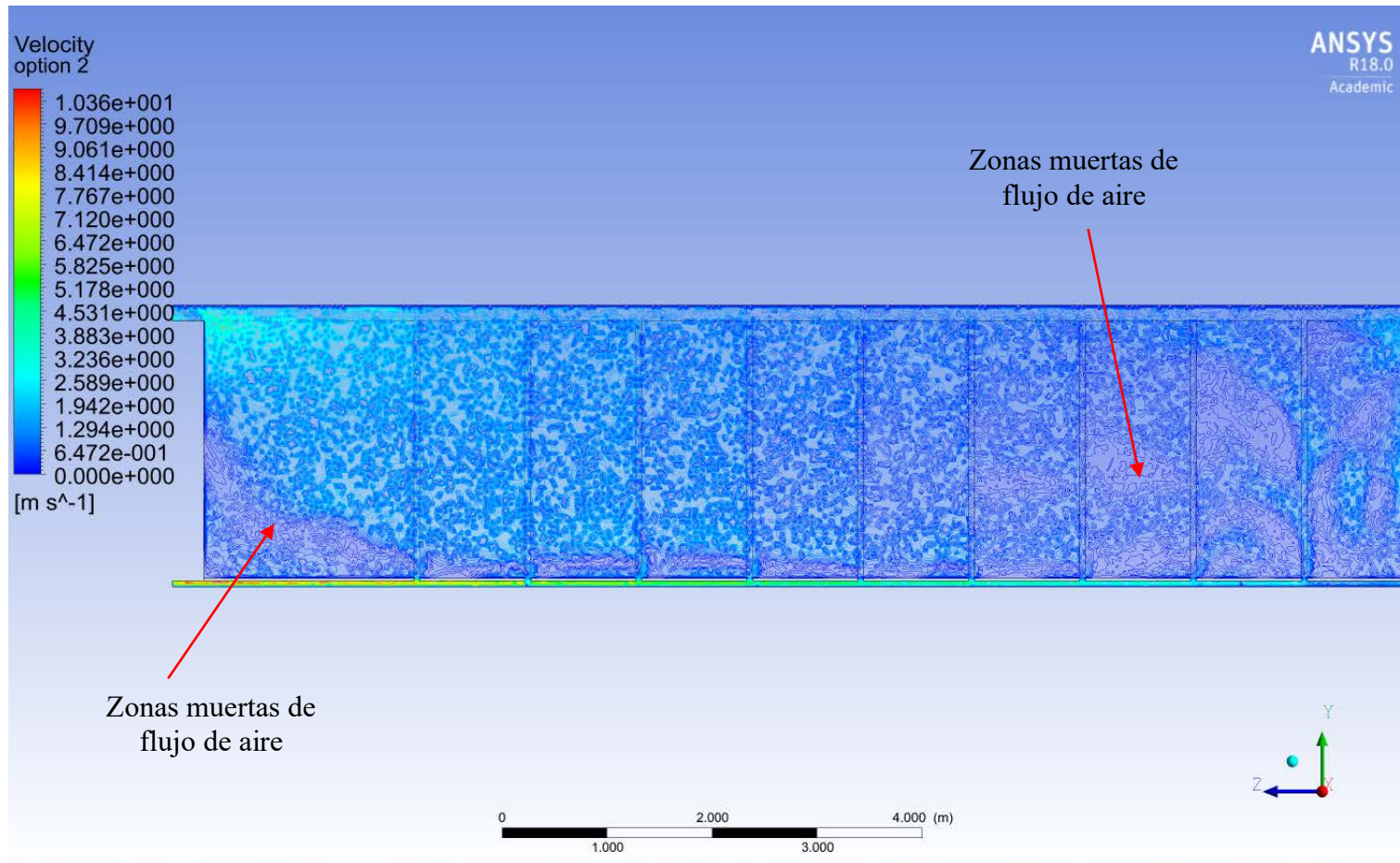
Este reacondicionado tiene como meta además de contrarrestar el efecto proveniente de las condiciones ambientales, disminuir el incremento de temperatura a causa de la respiración celular del follaje. En el espacio alrededor a las cajas contra las paredes se debe sellar el piso y dejar las ranuras entre las cajas que permitan al aire subir (**Figura 48**).

Además, en la **Figura 49** se detalla el comportamiento del aire sobre el espacio entre las cajas y la pared del contenedor. En donde se observa cómo la distribución de aire es más homogénea que en la **Figura 38**, esto se atribuye a que en la propuesta dos existe una entrada de aire al espacio de la pared desde el contrapiso. La dirección del aire se encuentra orientada hacia  $Z$ , donde se encuentra la salida de aire, y hacia  $-Z$  en el contrapiso; estos dos factores aunados a la ranura de espacio entre las cajas, permite una entrada de aire por pérdida de presión, ya que en el contrapiso el aire tiene suficiente presión que, al haber espacios abiertos, se escapa. Este escape de flujo desde el piso falso hacia la pared de espacio vacío se ilustra en la **Figura 50**. Sumado a la **Figura 50** se observa en la **Figura 51** y **52** la recreación de los vectores del flujo del aire frío a través de los espacios vacíos entre las torres de cajas. Estas columnas ascendentes desde el

contrapiso posibilitan mayor homogeneidad en la pared de aire para la opción 2 vs. la opción 1. Cabe resaltar que esta propuesta repercute en la cantidad de cajas que se coloquen en el contenedor, el número de cajas se ve disminuido en 106.

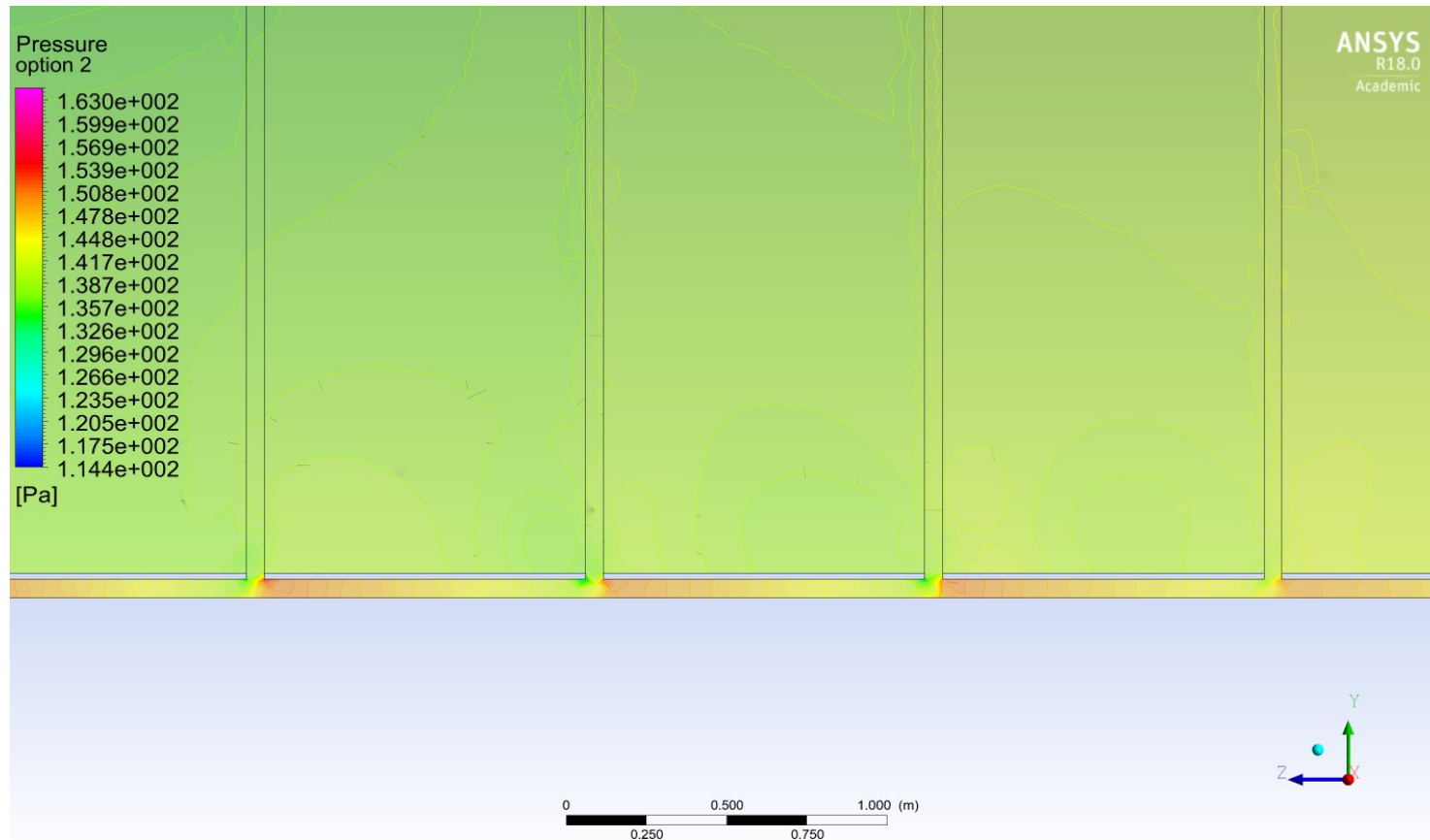


**Figura 48.** Comportamiento del flujo de aire a través del espacio vacío en la segunda propuesta de mejora en el arreglo de las cajas.

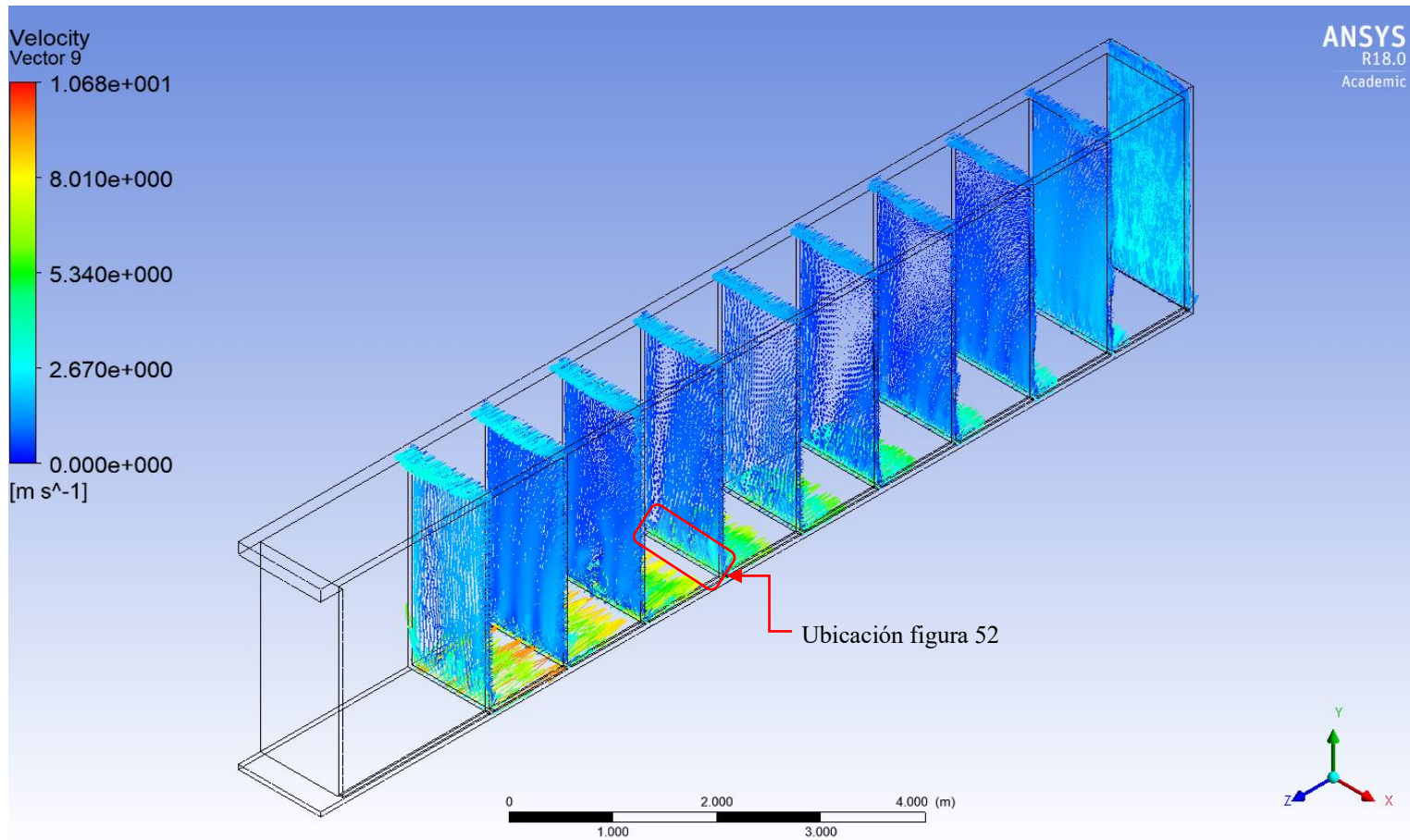


**Figura 49.** Comportamiento del flujo de aire a través del espacio vacío entre el aglomerado de cajas y la pared del contenedor para la opción 2. Figura superior es una toma completa del contenedor y la inferior detalla el escape hacia arriba del aire por el espacio entre columnas.

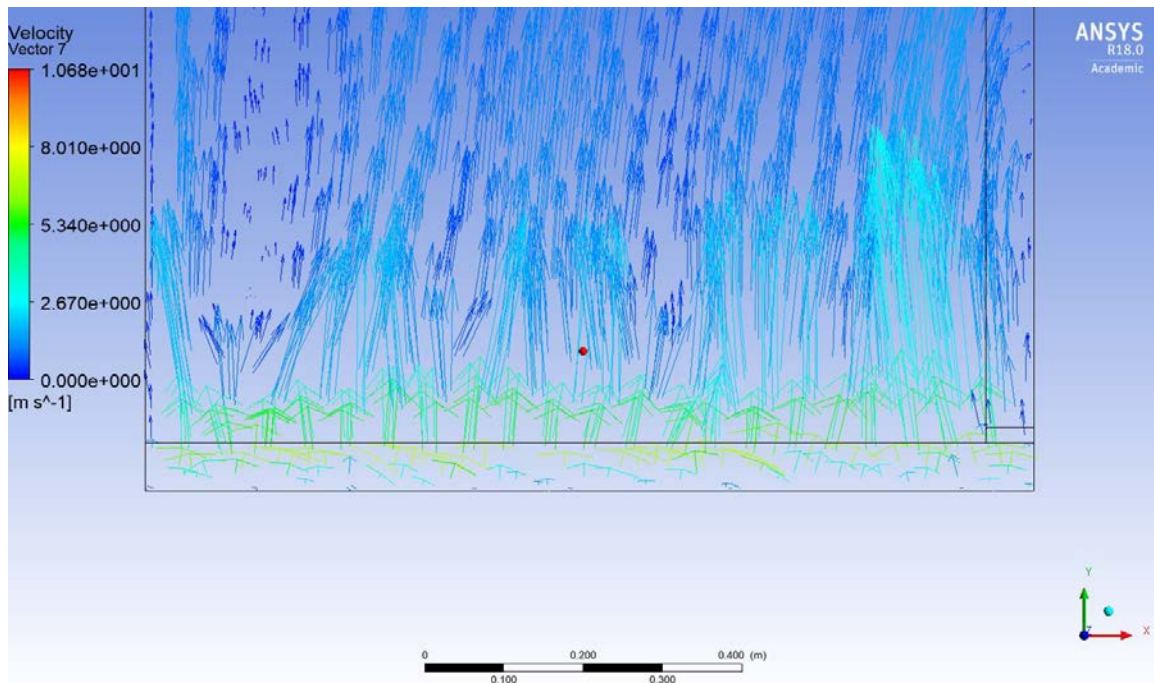




**Figura 50.** Comportamiento de la presión en el aire a través del espacio vacío entre el aglomerado de cajas y la pared del contenedor para la opción 2 en las primeras cuatro columnas de espacio entre cajas.

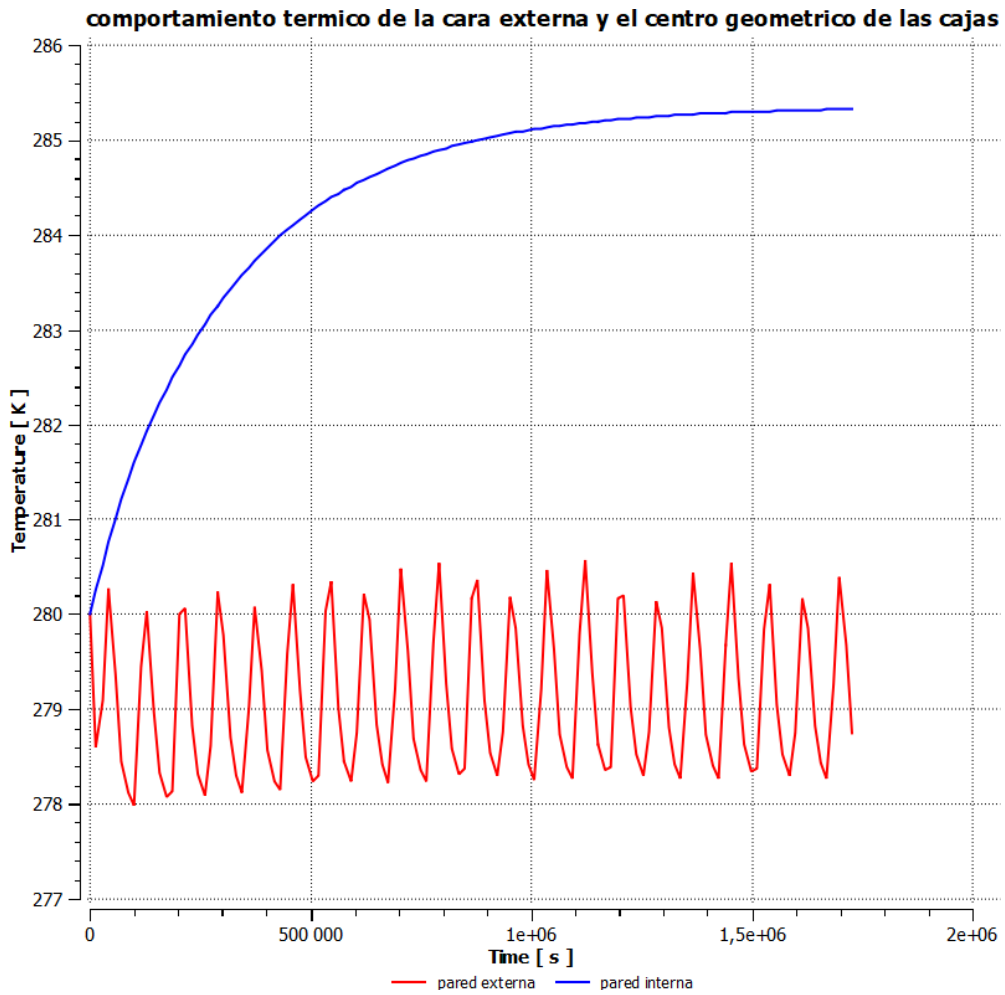


**Figura 51.** Recreación de vectores del flujo de aire frío en el espaciado entre columnas de cajas.

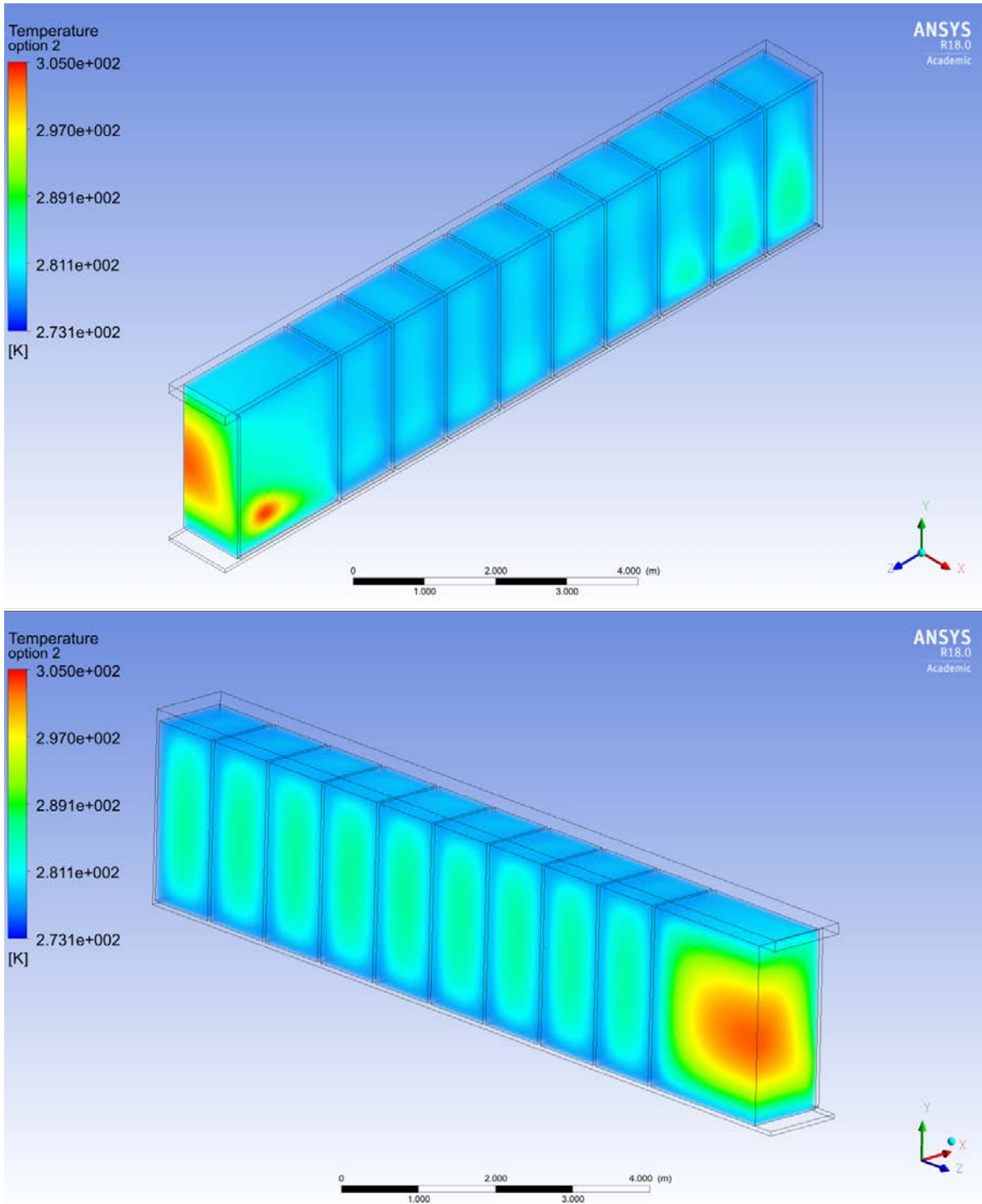


**Figura 52.** Acercamiento a los vectores de flujo de aire frío en un espacio vacío entre columnas de cajas. Referirse a la **Figura 51** para ver la ubicación.

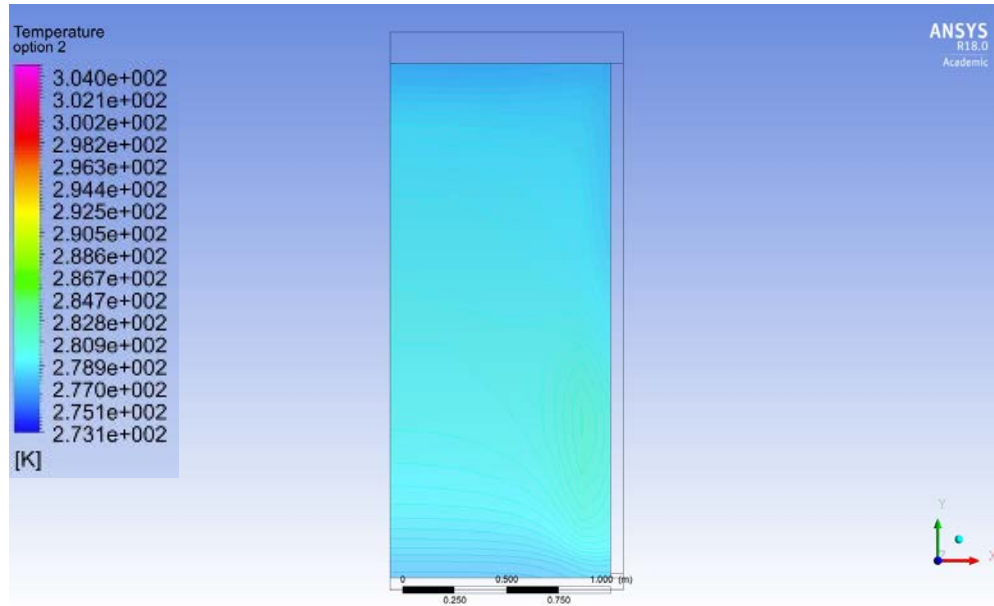
Con relación al comportamiento de la temperatura en la masa de cajas, se logra con esta propuesta la menor temperatura de las cajas en el centro geométrico de la masa total de cajas con una temperatura máxima de  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y de  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  sobre el centro de la pared externa, dado por la **Figura 53**. Sin embargo, existe una zona de mayor temperatura entre las dos primeras columnas de cajas embaladas como se observa en la **Figura 54** (producto cercano al evaporador), atribuido a la falta de flujo de aire a través de ambas columnas. En esta zona en el plano de simetría se dan las mayores temperaturas en el contenedor,  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ . No fue posible incluir un espaciado entre estas dos columnas de producto ya que se vería reducido el espacio entre el resto de las columnas, y esta reducción dificultaría el del aire desde el contrapiso del contenedor. Se incluyen tres planos de distribución de temperatura para especificar el comportamiento térmico a través de la masa de cajas, desde la **Figura 55 a 57** y la ubicación de estos en la **Figura 58**.



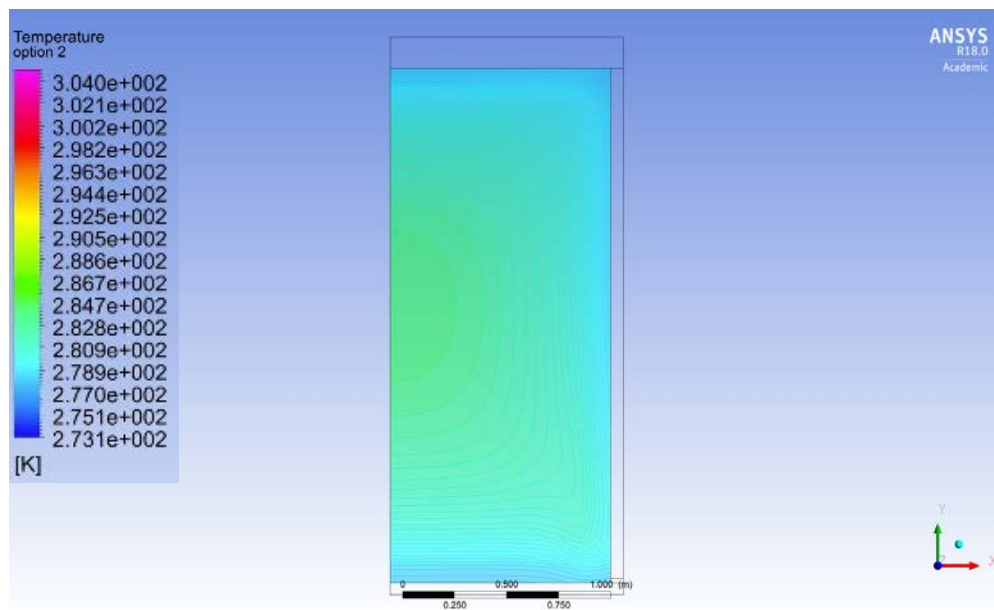
**Figura 53.** Varianza de la temperatura durante 20 días en el centro geométrico del plano de simetría y la cara externa aledaña a la pared en la opción 2 de arreglo de cajas.



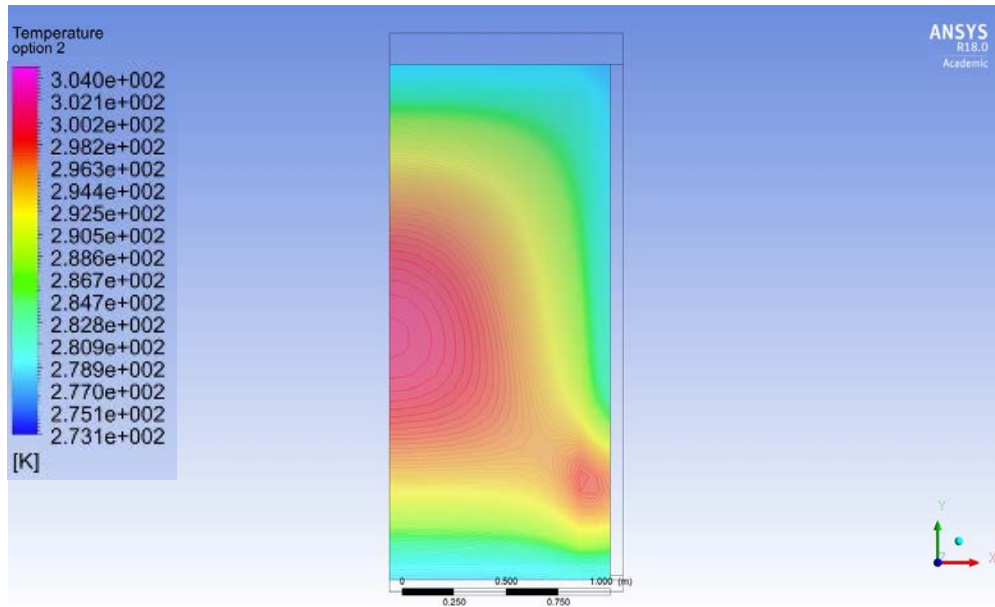
**Figura 54.** Distribución de temperatura del producto empacado una vez finalizado el tiempo de transporte en la condición 2 de mejora.



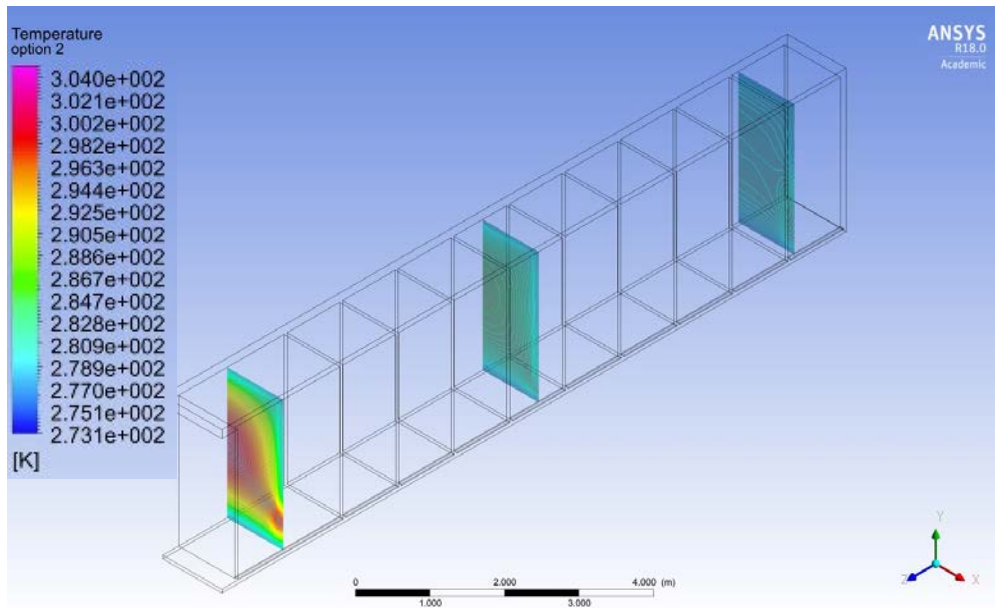
**Figura 55.** Contorno de temperatura en un plano ubicado a 1 m de las compuertas del contenedor.



**Figura 56.** Contorno de temperatura en un plano ubicado a la mitad del contenedor.



**Figura 57.** Contorno de temperatura en un plano ubicado a 1 m del final del contenedor.



**Figura 58.** Detalle de los contornos de temperatura representados de la **Figura 55** a **57**.

Para la segunda opción de mejora la temperatura en el plano de simetría es mayoritariamente de 13 °C, a excepción de las dos primeras filas de cajas, como fue mencionado anteriormente y se aprecia en la **Figura 57**. En el ámbito de la pared externa la temperatura máxima alcanzada fue de 7 °C. La reducción de temperatura de la opción 2 de mejora respecto al acomodo

original y la opción 1 de mejora es de; I) En la pared externa, 22 °C menos respecto al acomodo original y 2,5 °C contra la opción 1. II) En el plano de simetría, 25.5 °C menos respecto al acomodo original y 16 °C.

Una vez se tienen los resultados en todas las condiciones de embalaje, actuales y propuestas, cabe decir como bajo las condiciones actuales es necesario garantizar un flujo de aire entre las cajas y las paredes del contenedor para evitar una transferencia de calor proveniente del exterior de este. Aun con las mejoras en el acomodo propuestas, no es posible evitar el incremento de temperatura en las cajas, y menos las cajas llegar a la temperatura de almacenamiento recomendada por los compradores, de 3 °C. A pesar que no se logra proponer una opción de embalaje que asegure la temperatura en las cajas similar a la recomendada, para la opción 2 de embalaje la mayor parte de las cajas se encuentran a una temperatura por debajo de los 18 °C mencionados en Ali *et al.* (6), temperatura mínima requerida para el afloramiento del hongo que produce *Antracnosis*.

A nivel comercial, la empresa debe evaluar el beneficio económico que puede generar la comercialización del follaje con productos orgánicos, ya que, con las propuestas mencionadas, el número de cajas se reduce en hasta 100 por contenedor, alrededor de un 13% menos de lo actualmente exportado; además, asegurar temperaturas próximas a 3 °C durante el transporte va a incurrir en disminuir aún más la cantidad de cajas que exportan según lo encontrado en esta investigación.

Por último, para esta investigación no se consideró una etapa de validación por varios factores; I) El método de evaluación más sencillo, sería de introducir sensores dentro de algunas cajas de interés y registrar la temperatura durante todo el transporte, pero dentro de las restricciones del comprador, no permiten introducir nada dentro del producto y los sellos de las cajas tampoco se pueden romper a la hora de llegada al país. II) Es posible realizar modelos a escala, mas lograr construir un espacio que recree el ingreso y succión de aire, a la temperatura seteada en el contenedor se sale de los alcances de este trabajo.



## 5 CONCLUSIONES

### ***5.1 Calcular las propiedades termofísicas de la A. japónica con el empaque utilizado en la empresa para tener las constantes requeridas para realizar la modelación de fluidos computacional.***

En la búsqueda de los parámetros termofísicos del sistema caja/follaje, con el método propuesto y con medición de caída de temperatura de las cajas, se encuentra la conductividad térmica del sistema de 0,1269W/mK y una capacidad calorífica de 3,6052 kJ/kg.

### ***5.2 Evaluación de la eficiencia de enfriamiento del follaje con las condiciones de embalaje actuales de manera que se pueda establecer las condiciones base, sin mejoras.***

En la modelación de las condiciones actuales de embalaje se haya que la temperatura máxima de las cajas al final del transporte es de 35 °C, ocasionado por el ingreso de calor proveniente de las condiciones ambientales, y el bajo contacto de aire frío con superficie de empaque. Se encuentra que el espacio vacío en la primer fila de cajas ocasiona un regreso prematuro del aire al evaporador. Disminuyendo el caudal de aire disponible para enfriamiento.

### ***5.3 Simular mediante la modelación computacional de fluidos diferentes orientaciones y acomodo de las cajas, con elementos espaciadores entre ellas para mejorar la transferencia de calor entre el producto y el aire enfriado.***

La primera propuesta de mejora disminuye la temperatura de las cajas en el plano de simetría a 28 °C y a 13 °C en la segunda opción. Por esto se puede decir que fue efectiva la opción 1 para reducir el ingreso de calor proveniente del ambiente y que la opción 2 redujo drásticamente la temperatura de las cajas en el plano de simetría. Todas las propuestas de mejora involucran una reducción en la cantidad de cajas que se exportan, más ninguna logra llegar a la temperatura de transporte recomendada en la caja, 3 °C.

## 6 RECOMENDACIONES

Esta investigación viene a construir bases en el país para la aplicación de la modelación computacional de fluidos en cadenas productivas de productos vegetales; herramienta capaz de solucionar problemas en la etapa de poscosecha de los productos que permitan mejorar la mantención de la calidad con que los productos fueron cosechados, al incrementar la eficiencia en la disminución de temperatura de las frutas y vegetales. De manera en que sea posible mejorar la precisión en los resultados en futuros trabajos finales de graduación realizados en instituciones, es necesario se haga el uso de licencias profesionales que permitan el afinamiento del tamaño de la malla para construcciones digitales amplias, de manera en que se puedan reducir los errores y el orden de los residuales después de cada iteración.

En el proceso de realización de este trabajo final de graduación no es posible realizar otra propuesta de arreglo de las cajas que aumente la transferencia de calor entre el aire frío y las cajas respecto a la opción dos, ya que con esta opción es alto el decrecimiento de número de cajas a exportar. En vista a que no fue alcanzada la temperatura de transporte deseada, una estrategia de enfriamiento que puede lograr disminuir la temperatura máxima sería mejorar la etapa de pre-enfriamiento de las cajas en planta. Esto sería posible construyendo túneles de viento en el cuarto frío que disminuyan la temperatura de los empaques antes de ser enviados.

Por otra parte, se puede explorar la modificación de los empaques; Como se mencionó, este es completamente resguardado para mantener contenido de humedad dentro del empaque y así conservar la calidad con la que se cosecha el follaje. Se puede utilizar materiales que suministren de humedad a las hojas a través del tallo, en lugar de proveerla por humedad ambiental. El beneficio de esto es tener un menor contenido de humedad dentro de las cajas, lo cual facilita su enfriamiento; además, enfriarlas internamente por convección al agregar ventilas a estas cajas.

## 7 REFERENCIAS

1. Helpdesk EUT, Union E, States M, Kingdom U. Which requirements should fresh fruit or vegetables comply with to be allowed on the European market ? Europe is very demanding about food safety , which is why dealing with fresh Contents of this page 1 . Which legal and non-legal requirements must your [Internet]. [cited 2020 May 3]. Available from: <https://www.cbi.eu/node/2441/pdf/>
2. Mora S. Comercio Exterior del Sector Agropecuario 2018-2019 [Internet]. 2019. Available from: [http://www.sepsa.go.cr/docs/2020-002-Comercio\\_Exterior\\_2018-2019.pdf](http://www.sepsa.go.cr/docs/2020-002-Comercio_Exterior_2018-2019.pdf)
3. DATA C. Costa Rica CR: Fertilizer Consumption: per Hectare of Arable Land. World Bank.
4. FAO. Costa Rica: Número uno del mundo en uso de agroquímicos [Internet]. Agronoticias: Actualidad agropecuaria de América Latina y el Caribe. 2011 [cited 2020 Jun 13]. Available from: <http://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/508248/>
5. FAO. Fertilizer use - Country Rankings.
6. Ali A, Bordoh PK, Singh A, Siddiqui Y, Droby S. Post-harvest development of anthracnose in pepper ( *Capsicum spp* ): Etiology and management strategies. *Crop Prot* [Internet]. 2016;90:132–41. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cropro.2016.07.026>
7. Garden MB. *Fatsia japonica*.
8. Shikov AN, Pozharitskaya ON, Makarov VG. Phytomedicine *Aralia elata* var . *mandshurica* ( Rupr . & Maxim .) J . Wen : An overview of pharmacological studies. *Phytomedicine* [Internet]. 2016;23(12):1409–21. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.phymed.2016.07.011>
9. Wenxin X, Zhou X, Ma J, Li T, Zhang X, Li J, et al. A Review on a Medicinal and Edible Plant: *Aralia elata* (Miq.) Seem. *Mini Rev Med Chem*. 2021;21(17):2567–83.
10. USDA. *Metodos para el Cuidado de Alimentos Precederos*. 1995;(669).
11. Reid MS. *Cut Flowers and Greens*. 1999;
12. USDA. *The Commercial Storage of Fruits, Vegetables, and Florist and Nursery Stocks*. *Agric Handb*. 2016;(66):688–9.
13. Gilman EF. *Fatsia japonica* 1. 1999;1–3.

14. Beard M. *Fatsia japonica*. Ruston, Louisiana; 2015.
15. Xu XL, Xiao QG, Yang CL LY. First report of Anthracnose caused by *Colletotrichum karstii* on *Fatsia japonica* in Sichuan, China. *Plant Dis*. 2021;105(1):216.
16. Wang G. Study on scab-anthracnose of *Fatsia japonica*. *Zhejiang For Sci Technol*. 2007;27(5):7.
17. Zamora J. Control de antracnosis (*Colletotrichum gloesporioides* Penz.) en frutos de papaya (*Carica papaya* L.) cv. Pococí mediante aplicaciones poscosecha de agua caliente y cloruro de calcio. Universidad de Costa Rica; 2012.
18. Abellea\_08. *Fatsia* problems. *GardenersWorld.com*. 2019.
19. Jiménez E. Métodos de Control de Plagas [Internet]. Universidad Nacional Agraria; 2009. Available from: <https://cenida.una.edu.ni/relectronicos/RENH10J61me.pdf>
20. Castillo-matamoros R, Brenes-angulo A. COMBATE QUÍMICO DE LA ANTRACNOSIS DE *Sansevieria trifasciata*. 2015;26(2):305–13.
21. Vilaplana R, Hurtado G, Valencia-chamorro S. LWT - Food Science and Technology Hot water dips elicit disease resistance against anthracnose caused by *Colletotrichum musae* in organic bananas ( *Musa acuminata* ). *LWT - Food Sci Technol* [Internet]. 2018;95(April):247–54. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.085>
22. Glowacz M, Mogren L, Reade J, Cobb A, Monaghan J. Can hot water treatments enhance or mantain postharvest quality of spinash leaves? *Postharvest Biol Technol*. 2013;81:23–8.
23. Braga P, Alencar G, Alves S, Fechine J, Anderson W, Paz M, et al. International Journal of Biological Macromolecules Application of coatings formed by chitosan and *Mentha* essential oils to control anthracnose caused by *Colletotrichum gloesporioides* and *C . brevisporum* in papaya ( *Carica papaya* L . ) fruit. *Int J Biol Macromol* [Internet]. 2019;139. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.010>
24. Vilaplana R, Pazmiño L, Valencia-chamorro S. Postharvest Biology and Technology Control of anthracnose , caused by *Colletotrichum musae* , on postharvest organic banana by thyme oil. *Postharvest Biol Technol* [Internet]. 2018;138(January):56–63. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.12.008>
25. Maqbool M, Ali A, Ramachandran S, Smith DR, Alderson PG. Control of postharvest anthracnose of banana using a new edible composite coating. *Crop Prot* [Internet].

- 2010;29(10):1136–41. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cropro.2010.06.005>
26. Glowacz M, Roets N, Sivakumar D. Control of anthracnose disease via increased activity of defence related enzymes in ‘ Hass ’ avocado fruit treated with methyl jasmonate and methyl salicylate. *Food Chem* [Internet]. 2017;234:163–7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.063>
  27. Valverde DV. Efecto del metil jasmonato en la reducción del daño por frío en frutos almacenados de jocote (*Spondias purpurea* L.) y de mango (*Mangifera indica* CV. Tommy Atkins L.). Universidad de Costa Rica; 2012.
  28. Hu M, Zhu Y, Liu G, Gao Z, Li M, Su Z. *Scientia Horticulturae* Inhibition on anthracnose and induction of defense response by nitric oxide in pitaya fruit. *Sci Hortic (Amsterdam)* [Internet]. 2019;245(August 2018):224–30. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.10.030>
  29. Lopes C, Amélia E, Duarte A, Brito L, Rodrigues P, Alves T, et al. Postharvest biocontrol of anthracnose in bananas by endophytic and soil rhizosphere bacteria associated with sisal (*Agave sisalana*) in Brazil. *Biol Control* [Internet]. 2019;137(May):104016. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104016>
  30. Elansari AM, Fenton DL, Callahan CW. Postharvest Technology of Perishable Horticultural. In: *Precooling*. 2019. p. 166–80.
  31. Ballesteros L. Enfrimaiento por aire forzado. *Mundo HVAC&R*. 2013.
  32. Kitinoja L, Kader AA. *Small-Scale Postharvest Handling Practices: A Manual for Horticultural Crops* (4. 2003;(8).
  33. Hu H. *Computational Fluid Dynamics*. In: Kundu P, Cohen I, Dowling D, editors. *Fluid Mechanics*. Fifth Edit. Boston: Boston Editorial; 2012. p. 421–72.
  34. Sun D-W. *Computational Fluid Dynamics in Food Processing*. Second. Series, editor. Dublin: CRC press; 2019. 129 p.
  35. Hoang H, Duret S, Flick D, Laguerre O. Preliminary study of air flow and heat transfer in a cold room filled with apple pallets : Comparison between two modelling approaches and experimental results. *Appl Therm Eng* [Internet]. 2015;76:367–81. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.11.012>
  36. Menter FR. AIAA 93 · 2906 Zonal Two Equation  $k - \omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows . Mailing Address : 24th Fluid Dynamics Conference FOR

- AERODYNAMIC FLOWS. 2019;
37. Han J, Zhu W, Ji Z. Artificial Intelligence in Agriculture Comparison of veracity and application of different CFD turbulence models for refrigerated transport. *Artif Intell Agric [Internet]*. 2019;3:1–7. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2019.10.001>
  38. Getahun S, Ambaw A, Delele M, Meyer CJ, Linus U. Analysis of air flow and heat transfer inside fruit packed refrigerated shipping container : Part I e Model development and validation. *J Food Eng [Internet]*. 2017;203:58–68. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.010>
  39. Majid S, Zolfaghari M. Simulation of in-line versus staggered arrays of vented pallet boxes for assessing cooling performance of orange in cool storage. *Appl Therm Eng [Internet]*. 2017;115:337–49. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.063>
  40. Delele MA, Ngcobo MEK, Getahun ST, Chen L, Mellmann J, Linus U. Postharvest Biology and Technology Studying airflow and heat transfer characteristics of a horticultural produce packaging system using a 3-D CFD model . Part I : Model development and validation. *Postharvest Biol Technol [Internet]*. 2013;86:536–45. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.08.014>
  41. Sullivan JLO, Ferrua MJ, Love R, Verboven P, Nicolaï B, East A. Postharvest Biology and Technology Forced-air cooling of polylined horticultural produce : Optimal cooling conditions and package design. *Postharvest Biol Technol [Internet]*. 2017;126:67–75. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.11.019>
  42. Han J, Zhao C, Yang X, Qian J, Fan B. Computational modeling of air flow and heat transfer in a vented box during cooling : Optimal package design. *Appl Therm Eng [Internet]*. 2015;91:883–93. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.060>
  43. Getahun S, Ambaw A, Delele M, Meyer CJ, Linus U. Analysis of air flow and heat transfer inside fruit packed refrigerated shipping container : Part II e Evaluation of apple packaging design and vertical flow resistance. *J Food Eng [Internet]*. 2017;203:83–94. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.011>
  44. Alptekin E, Ezan MA, Kayansayan N, Performance T. Flow and Heat Transfer Characteristics of an Empty Refrigerated Container. 2014;(May).

45. Çengel Y. *Transferencia de Calor y Masa, un enfoque práctico*. 3era ed. Faddeva S, editor. México: McGraw Hill; 2007. 217 p.
46. Arif M, Shinoda T. Case Studies in Thermal Engineering The effect of solar radiation on the energy consumption of refrigerated container. *Case Stud Therm Eng* [Internet]. 2018;12(August):687–95. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.09.005>
47. Mohsenin NN. *Thermal Properties of Food and Agricultural Materials*. First, editor. New York: Gordon and Breach science publisher; 1980. 86–105 p.
48. Ortega S. Determinación de la conductividad térmica del hormigón utilizado en la constucción ecuatoriana mediante simulación CFD [Internet]. Escuela Plitécnica Nacional; 2017. Available from: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18797>
49. Heldman D, Moraru D. *Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering*. 2nd ed. Heldman DR, ., editors. Boca Ratón: CRC press; 2011. 929 p.
50. Hadjiloucas S, Karatzas L, Bowen J. Measurements of leaf water content using terahertz radiation. *Trans Microw Theory Tech*. 1999;47(2):142–9.
51. American Society of Heating R and A-CE. Load Parameters. In: *ASHRAE Hanbook- Refrigeration*. 2014.
52. Heider S, El-Sayed A., El-Leithy A., Khneizy S. Improving Vase-life and Keeping Quality of *Fatsia japonica* Cut Foliages by Post- Harvest Treatments. *Am J Agric Enviromental Sci*. 2015;15(3):339–48.
53. Daikin. *Daikin Zestia Inverter*. p. 4.
54. Kayansayan N, Alptekin E, Ezan MA. Heat Transfer Correlations for Refrigerated Containers. 2016;1–8.
55. Instituto Meteorológico Nacional. Estación Automática de Pithaya, Aranjuez, Puntarenas [Internet]. Estaciones automáticas del instituto meteorológico nacional. 2022. Available from: <https://www.imn.ac.cr/especial/estacionAranjuez.html>
56. Knovel. *Thermal Properties of Selected Materials*. *Frozen Ground Engineering*. p. table 2-11.

## 8 ANEXOS

### ANEXO I

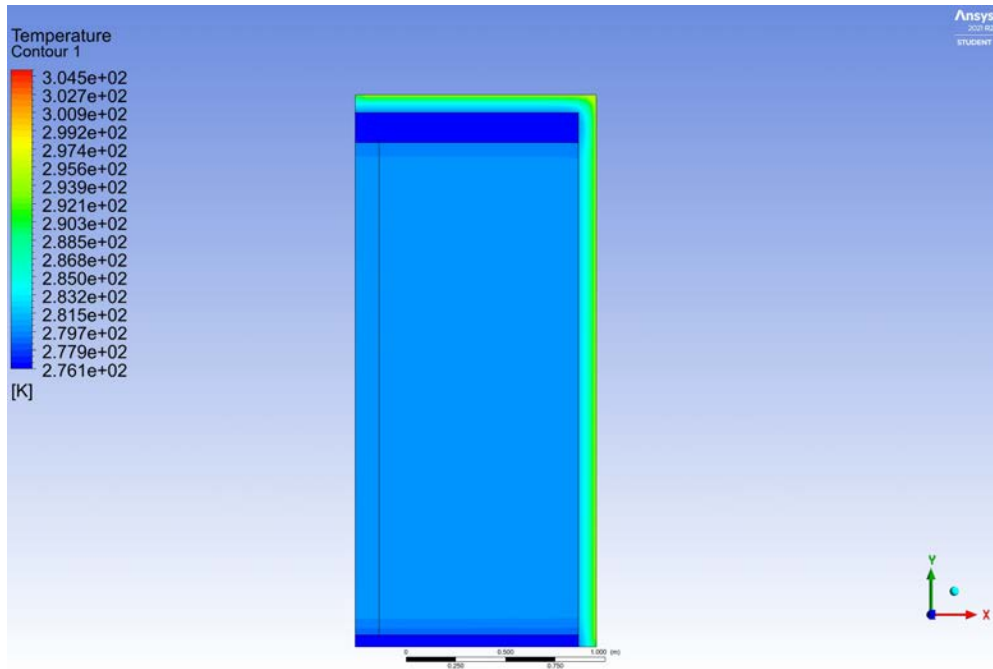
**Anexo 1.** Propiedades térmicas de los materiales usados en las simulaciones CFD de los contenedores.

Material	Conductividad térmica (W/mK)	Calor específico (J/kgK)	Densidad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Viscosidad cinemática ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
Aire @ 3 °C	0,02386	1006	1,2782	$1,7440 \times 10^{-5}$
Producto	141,71	3605,2	0,1753	-
Poliuretano	0,024	1670	32	-

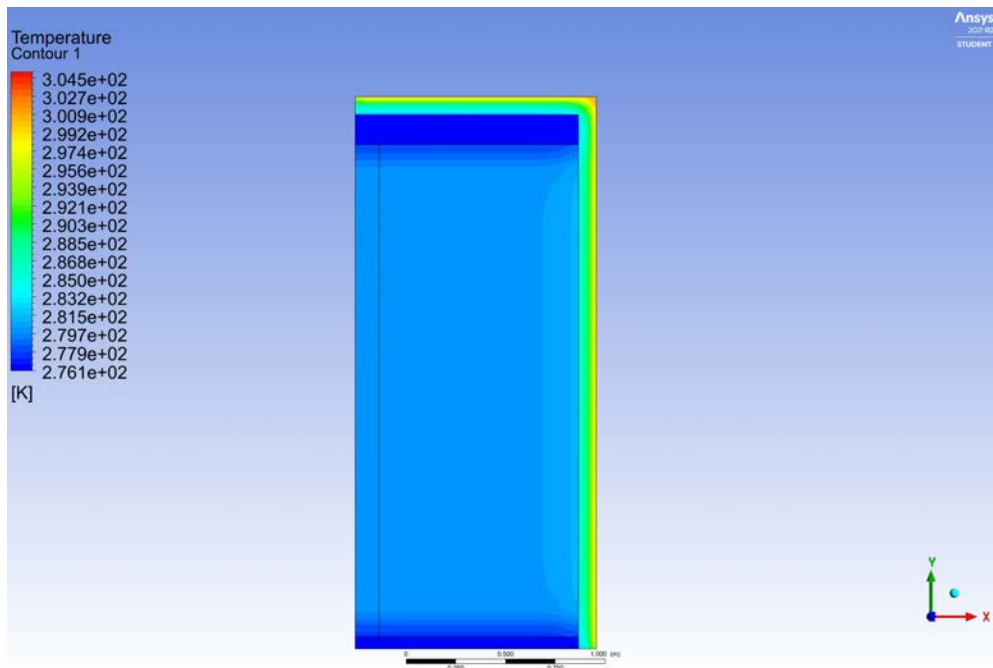
\*\*Fuente de las propiedades de la espuma de poliuretano extraído de Knoel (56).



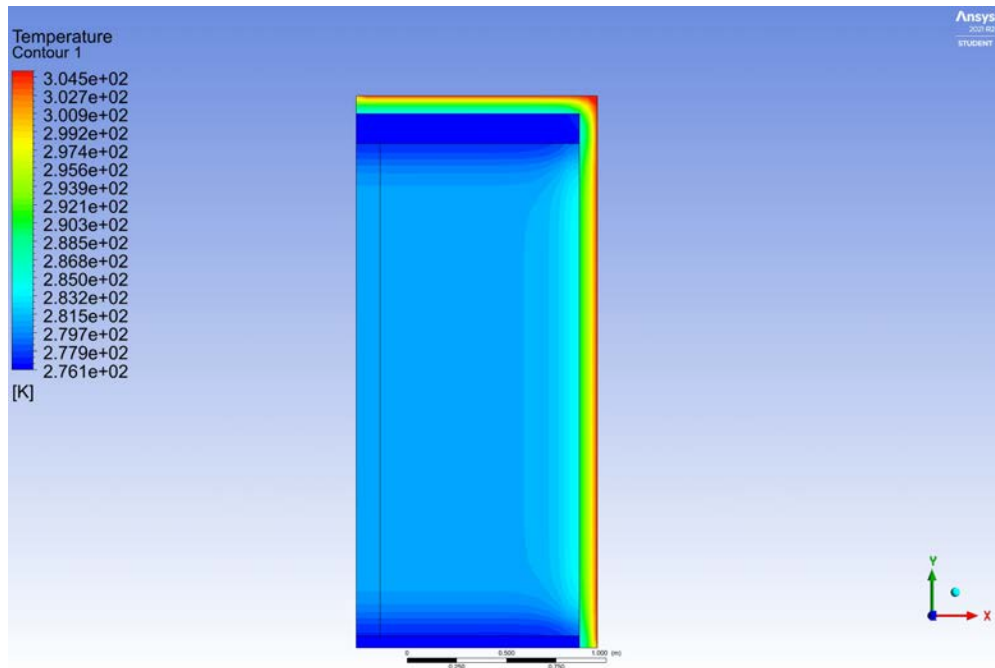
## ANEXO II



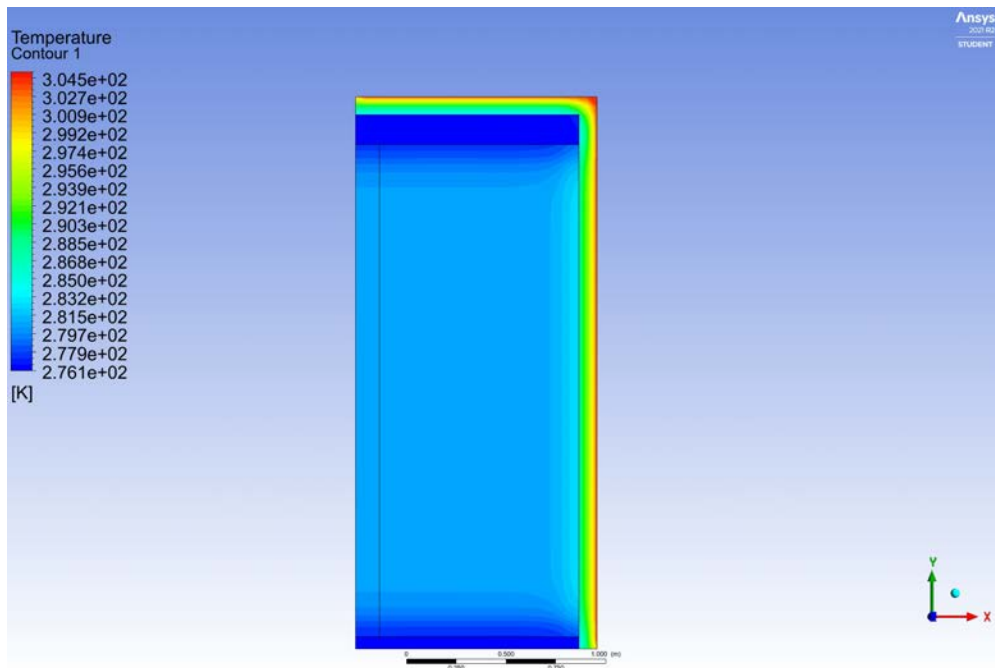
**Anexo 2.1.** Perfil de temperatura de la capa del aislamiento en el plano central del contenedor al inicio de la modelación.



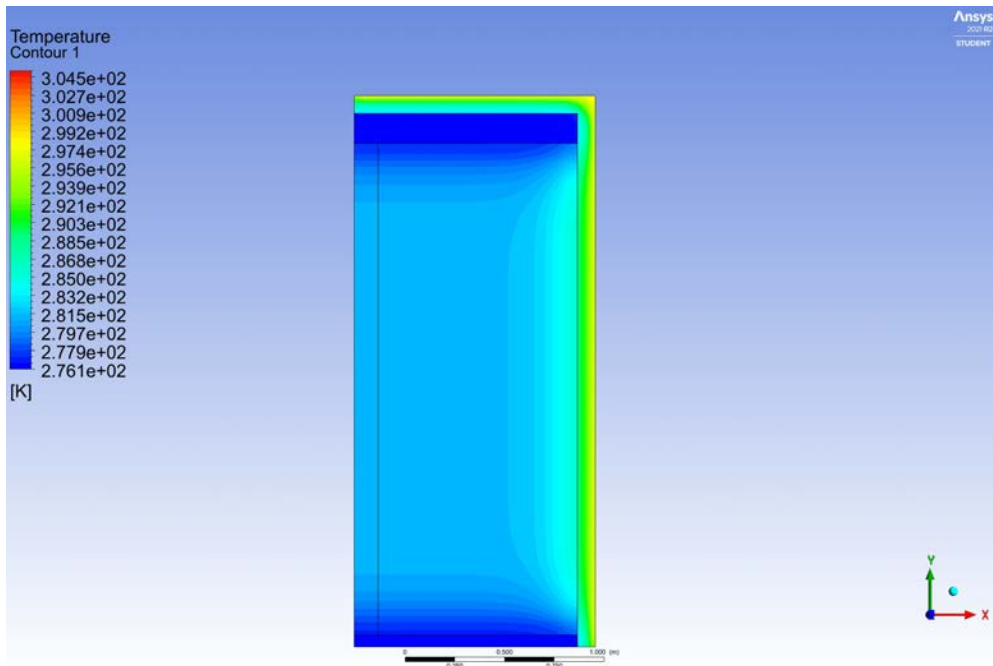
**Anexo 2.2.** Perfil de temperatura de la capa del aislamiento en el plano central del contenedor a las 4 h.



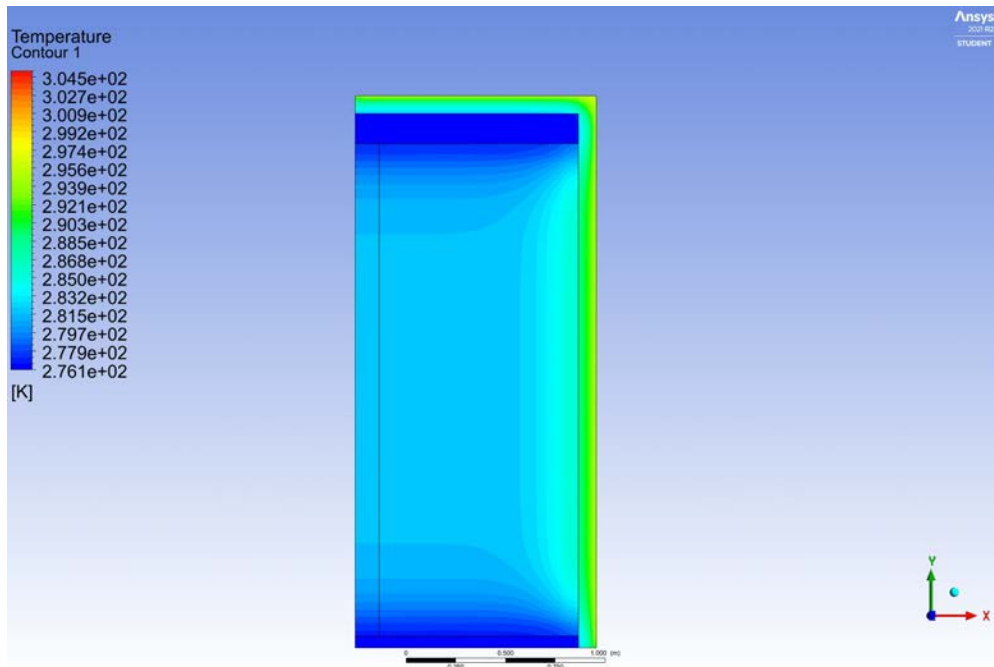
**Anexo 2.3.** Perfil de temperatura de la capa de aislamiento en el plano central del contenedor a las 8 h.



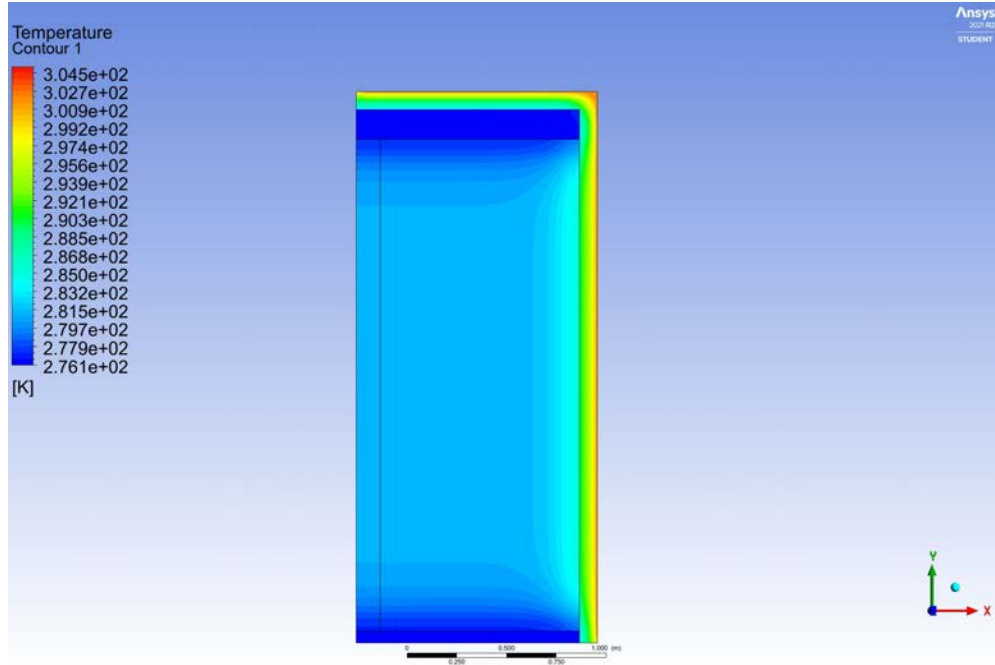
**Anexo 2.4.** Perfil de temperatura de la capa del aislamiento en el plano central del contenedor a las 12 h.



**Anexo 2.5.** Perfil de temperatura de la capa del aislamiento en el plano central del contenedor a las 16 h.



**Anexo 2.6.** Perfil de temperatura de la capa del aislamiento en el plano central del contenedor a las 20 h.



**Anexo 2.8.** Perfil de temperatura de la capa del aislamiento en el plano central del contenedor a las 24 h.**Anexo**