



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Tlajomulco



TESIS

**“GENERACIÓN DE ENERGÍA CALORÍFICA MEDIANTE UN  
CAPTADOR SOLAR HÍBRIDO PARA SECADORES  
CONVECTIVOS DE FRUTAS”**

QUE PRESENTA:

**M.C. Eduardo Figueroa Garcia**

DIRECTOR DE TESIS:

**Dr. Arturo Moisés Chávez Rodríguez**

---

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**DOCTOR EN CIENCIAS EN BIOTECNOLOGÍA EN PROCESOS AGROPECUARIOS**

---

TLAJOMULCO DE ZÚÑIGA, JALISCO. MARZO, 2022.



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Tlajomulco



TESIS

**“GENERACIÓN DE ENERGÍA CALORÍFICA MEDIANTE UN CAPTADOR SOLAR HÍBRIDO PARA SECADORES CONVECTIVOS DE FRUTAS”**

QUE PRESENTA:

**M.C. Eduardo Figueroa Garcia**

DIRECTOR DE TESIS:

**Dr. Arturo Moisés Chávez Rodríguez**

Codirector de Tesis:

**Dr. Isaac Andrade González**

Asesores:

**Dra. Vania S. Farias Cervantes**

**Dra. Mayra I. Montero Cortés**

**Dra. Irma G. López Muraira**

**Dr. Héctor Silos Espino**

---

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**DOCTOR EN CIENCIAS EN BIOTECNOLOGÍA EN PROCESOS AGROPECUARIOS**

---

TLAJOMULCO DE ZÚÑIGA, JALISCO. MARZO, 2022.



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Tlajomulco

## DICTAMEN DE TESIS APROBADA



### CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco el día 08/02/2022, el que suscribe, C. Eduardo Figueroa García, alumno del Programa de Doctorado en Ciencias en Biotecnología en Procesos Agropecuarios con número de control D15940003, adscrito al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tlajomulco, manifiesta ser autor del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de la Dr. Arturo Moisés Chávez Rodríguez, y cede los derechos del trabajo intitulado "GENERACIÓN DE ENERGÍA CALORÍFICA MEDIANTE UN CAPTADOR SOLAR HÍBRIDO PARA SECADORES CONVECTIVOS DE FRUTAS", y de patentes y beneficios que puedan originarse del presente, al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tlajomulco.

ATENTAMENTE



---

M.C. Eduardo Figueroa García.



## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de estudios proporcionada, la cual me permitió realizar mis estudios de posgrado.

Al Tecnológico Nacional de México/Campus Tlajomulco y Campus El llano por haberme dado la oportunidad de adentrarme en la investigación y otorgarme el apoyo y las facilidades para poder desarrollar mi proyecto de tesis.

Al programa Multisede de DOCTORADO EN CIENCIAS EN BIOTECNOLOGÍA EN PROCESOS AGROPECUARIOS por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado.

Al Dr. Arturo Moisés Chávez Rodríguez por permitirme colaborar con él, así como su asesoría, apoyo, motivación y de manera especial agradecer la amistad y confianza hacia mi persona.

A los miembros de mi comité tutorial por todas sus observaciones, sugerencias y apoyo en el desarrollo de mi trabajo de tesis.



## DEDICATORIA

*A mis padres Agustín y Rosaura por los valores, las enseñanzas y el apoyo incondicional que me dieron día con día.*

*A mi esposa Monserrat por todo su amor e incondicional apoyo.*

*A mis hermanos Paty, Emma, Chuy y Kiko por su cariño que siempre creyeron en mí y me apoyaron en todo momento para cumplir con mis metas.*

*A Geraldine y Lalito que son una inspiración y con su cariño alientan a ser una mejor persona.*

*A todos Gracias Totales.*



## ÍNDICE GENERAL

DICTAMEN DE TESIS APROBADA .....	ii
CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS .....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
DEDICATORIA .....	v
RESUMEN .....	xix
ABSTRACT .....	xx
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS .....	4
2.1 Objetivo general .....	4
2.2 Objetivos específicos .....	4
III. PROBLEMÁTICA.....	6
IV. JUSTIFICACIÓN .....	6
V. HIPÓTESIS .....	6
VI. ESTADO DEL ARTE .....	7
6.1.1 Energía .....	7
6.1.2. Energía solar.....	8
6.1.3 Radiación solar entrante .....	11
6.1.4 Aprovechamiento de la energía solar .....	14



6.1.5 Energía solar térmica en México .....	16
6.2.1 Industria .....	20
6.2.1.1 Industria Alimentaria .....	21
6.2.2 Secado de alimentos.....	21
6.2.3 Secado solar .....	26
6.2.3.1.2 Captador solar de placa plana.....	29
6.2.3.1.3 Captador solar híbrido.....	34
6.2.4 Sistema de calentamiento auxiliar con energía eléctrica .....	37
6.2.4.1 Calentamiento por inducción magnética.....	37
6.2.4.1.1 Principios básicos del calentamiento por inducción (CPI).....	38
6.2.4.2 Calentamiento con resistencias eléctricas (RE) .....	40
6.3.1 Modelación.....	41
6.3.1.1 Modelación estadística.....	43
6.3.1.2 Modelos de regresión lineal .....	44
6.3.1.3 Regresión lineal múltiple .....	47
6.3.1.4 Análisis de componentes principales.....	50
6.3.1.5 Regresión sobre componentes principales.....	52
6.4.1 Generalidades del arándano .....	55
6.4.1.1 Antioxidantes .....	56
6.4.2 Antocianinas .....	57
6.4.3 Secado de alimentos.....	59
6.4.3.1 Secado convectivo .....	59
6.4.3.2 Secador de bandejas .....	60



6.4.3.3 Secado de arándano .....	61
VII. MATERIALES Y MÉTODOS .....	64
7.1 Ubicación .....	64
7.1.2 Obtención de datos climatológicos .....	64
7.2.1 Selección de tipo de captador, materiales y diseño del captador solar híbrido.....	64
7.2.2 Matriz de evaluación .....	67
7.2.3 Diseño del captador en software CAD.....	70
7.2.4 Selección del método auxiliar de calentamiento eléctrico.....	70
7.2.4.1 Selección de módulo de calentamiento por inducción .....	70
7.2.4.2 Selección de módulo de calentamiento con resistencias eléctricas ...	70
7.2.5 Preparación experimental del CSH sin calentamiento auxiliar.....	70
7.2.6 Análisis de eficiencia térmica .....	71
7.2.7 Diseño y construcción de la cabina de secado.....	71
7.2.8 Control de temperatura para el secador solar híbrido.....	72
7.2.9 Evaluación térmica del secador solar híbrido con sistema auxiliar de calentamiento por inducción y cabina de secado .....	72
7.2.10 Evaluación térmica del secador solar híbrido con sistema auxiliar de calentamiento con resistencias eléctricas y cabina de secado .....	73
7.3 Modelo de regresión sobre componentes principales (PCR).....	73
7.4 Secado convectivo de arándano en secador de bandejas eléctrico .....	74
7.4.1 Análisis fisicoquímicos .....	75
7.4.1.1 Determinación de humedad .....	75



7.4.1.2 Actividad de agua.....	76
7.4.1.3 Índice de higroscopicidad.....	76
7.4.1.4 pH .....	76
7.4.1.5 Solidos solubles totales.....	77
7.4.1.6 Contenido de azúcares reductores por método DNS .....	77
7.4.1.7 Determinación de antocianinas por pH diferencial.....	79
7.4.2 Análisis de colorimetría .....	80
7.4.3 Análisis sensoriales.....	81
7.4.4 Evaluación energética y comparación del secado de arándano entre un secador solar híbrido y un secador de bandejas .....	82
7.4.4.1 Secado de arándano en un secador solar híbrido y un secador de bandejas eléctrico.....	82
7.4.4.2 Evaluación energética del secado de arándano en un secador solar híbrido y un secador de bandejas eléctrico .....	82
7.5 Análisis estadístico.....	84
VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	86
8.1 Análisis climatológico de la región Tlajomulco de Zúñiga para el uso de energía solar.....	86
8.2 Diseño y construcción del CSH.....	90
8.2.1 Construcción de la cabina de secado e implementación del control de temperatura en la cabina de secado .....	106
8.2.2 Evaluación térmica del CSH sin sistema auxiliar de calentamiento ....	109
8.2.3 Evaluación térmica del secador solar híbrido con sistema auxiliar de calentamiento por inducción y cabina de secado .....	112



8.2.4 Evaluación térmica del secador solar híbrido con sistema auxiliar de calentamiento con resistencias eléctricas y optimización del equipo.....	117
8.3 Multicolinealidad .....	126
8.3.1 Modelo de regresión sobre componentes principales.....	126
8.4 Evaluación energética y fisicoquímica del secado de arándano con el secador solar híbrido y el secador de bandejas eléctrico .....	130
8.4.1 Determinación de cinéticas de secado .....	130
8.4.2 Análisis fisicoquímicos .....	132
8.4.3 Colorimetría .....	138
8.4.4 Análisis sensorial .....	141
8.5 Comparación energética y fisicoquímica del secado de arándano en el secador de bandejas eléctrico y el secador solar híbrido. ....	144
8.5.1 Análisis fisicoquímicos .....	144
8.5.2 Evaluación energética.....	149
IX. CONCLUSIONES.....	155
X. BIBLIOGRAFÍA .....	156
XI. NOMENCLATURA .....	179
XII. ANEXOS .....	182
Anexo 1 Artículos.....	182
Anexo 2 Cuadro de evaluación térmica con sistema auxiliar de calentamiento por inducción, flujo $1.4 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ .....	184
Anexo 3 Cuadro de evaluación térmica con sistema auxiliar de calentamiento por resistencias eléctricas (2) con flujo $5.1 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ .....	189



Anexo 4 Cuadro de evaluación térmica con sistema auxiliar de calentamiento por resistencias eléctricas (4) con flujo $5.1 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ .....	190
Anexo 5 Cuadro de análisis fisicoquímicos del secado de arándano. ....	193
Anexo 6 Cuadro de análisis sensorial del secado de arándano. ....	194



## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Relaciones Geométricas entre El Sol y la Tierra (Duffie y Beckman, 1991).</i>	9
<i>Figura 2. Mapa de radiación global (fuente, SOLARGIS).</i>	13
<i>Figura 3. Tipos de consumo de energía utilizadas en la industria (SENER 2016).</i>	15
<i>Figura 4. Mapa de Irradiación Solar, México, kWh/m<sup>2</sup>al día. Fuente: SOLARGIS.</i>	18
<i>Figura 5. Radiación mensual del estado de Jalisco (Ulloa y col., 2017).</i>	19
<i>Figura 6. Esquema de un secador de horno o estufa (El-Khadraoui y col., 2017).</i>	24
<i>Figura 7. Secador de bandejas de planta piloto de procesos agroindustriales (Fuente propia).</i>	25
<i>Figura 8. Representación de los experimentos de Horace Saussure (<a href="http://solarcooking.org/saussure.html">http://solarcooking.org/saussure.html</a>).</i>	27
<i>Figura 9. Captador solar de placa plana (Gómez, 2010).</i>	28
<i>Figura 10. Clasificación de los captadores solares (Fuente propia).</i>	29
<i>Figura 11. Captador solar de placa plana (Fuente propia).</i>	30
<i>Figura 12. CPP con materiales con cambio de fase (parafina) (El-Khadraoui y col., 2017).</i>	33
<i>Figura 13. Captador solar híbrido (solar-biomasa) (Tarigan, 2018) Descripción numérica: 1. Cubierta de vidrio, 2. Cubierta absorbente, 3. Entrada de aire, 4. Cubierta inferior, 5. Aislamiento, 6. Quema de biomasa, 7. Almacenamiento térmico, 8. Puerta de carga, 9. Ventilación, 10. Cubierta de vidrio para cámara de secado, 11. Pared interna, 12. Hueco para calor paso de gas, 13. Pared exterior con aislamiento, 14. Bandejas perforadas, 15. Cubierta inferior para cámara de secado.</i>	34



*Figura 14. Inducción de corriente en un conductor de electricidad (Varsano y col., 2019). ..... 39*

*Figura 15. Proceso de modelado (Fuente propia). ..... 42*

*Figura 16. Diagramas de dispersión en a) hay ausencia de relación (independencia), en b) existe asociación lineal positiva (varían en general en el mismo sentido), en c) existe asociación lineal negativa (varían en sentido contrario), en d) existe fuerte asociación, pero no lineal (Restrepo y González, 2007)..... 45*

*Figura 17. Estructura de compuestos polifenólicos comunes en las frutas (Hangun-Balkir y col., 2012). ..... 57*

*Figura 18. Estructura básica y sustituyentes de las antocianinas (Garzón, 2008). 58*

*Figura 19. Bandeja de malla metálica con arándano fresco (Fuente propia). ..... 75*

*Figura 20. Curva de calibración de azúcares reductores por metodología de ácido dinitrosalicílico (DNS), se utilizó glucosa como estándar (Fuente propia)..... 78*

*Figura 21. Radiación solar en Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México. (Invierno(W), Primavera (S), Verano (SM), Otoño (F)) (Fuente propia). ..... 87*

*Figura 22. Temperatura ambiente en Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México. (línea azul, año 2020, línea naranja, año 2019, línea amarilla, promedio 2019, línea verde, promedio 2020), (Invierno (W), Primavera (S), Verano (SM), Otoño (F)) (Fuente propia). ..... 87*

*Figura 23. Precipitación en Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México, (Invierno (W), Primavera (S), Verano (SM), Otoño (F)) (Fuente propia). ..... 88*

*Figura 24. Horas luz in Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México, (Invierno (W), Primavera (S), Verano (SM), Otoño (F)) (Fuente propia). ..... 89*

*Figura 25. Diagrama de flujo del CSH (Fuente propia)..... 91*

*Figura 26. Estructura del CSH (Fuente propia). ..... 93*

*Figura 27. Placas internas y externas del CSH (Fuente propia). ..... 94*

*Figura 28. Placas de la estructura del CSH (Fuente propia)..... 95*

*Figura 29. Placa aislante del CSH (Fuente propia). ..... 96*



<i>Figura 30. CSH con módulo de calentamiento por inducción, barras de calentamiento y bobinas helicoidales (Fuente propia).</i>	97
<i>Figura 31. Sistema de secado con CSH y cabina de secado (Fuente propia).</i>	98
<i>Figura 32. Corte de materiales para estructura del CSH (Fuente propia).</i>	99
<i>Figura 33. Estructura del CSH (Fuente propia).</i>	100
<i>Figura 34. Vista superior de estructura del CSH (Fuente propia).</i>	100
<i>Figura 35. Estructura interna del CSH con bobinas helicoidales y barra de calefacción (Fuente propia).</i>	101
<i>Figura 36. Estructura del CSH- con sistema de ingreso y salida de flujo de aire (Fuente propia).</i>	101
<i>Figura 37. CSH-CPI con sistema de inducción (Fuente propia).</i>	102
<i>Figura 38. a) módulo de CPI. b) CSH-CPI terminado (Fuente propia).</i>	103
<i>Figura 39. CSH con sistema auxiliar de calentamiento de resistencias eléctricas (Fuente propia).</i>	103
<i>Figura 40. Construcción de cámara de secado (Fuente propia).</i>	108
<i>Figura 41. Control de temperatura del secador solar híbrido (Fuente propia).</i>	109
<i>Figura 42. CSH (Fuente propia).</i>	110
<i>Figura 43. Histograma de diferentes flujos de aire de alimentación del CSH (Fuente propia).</i>	111
<i>Figura 44. ANOVA de los diferentes flujos de alimentación del CSH (Fuente propia).</i>	111
<i>Figura 45. Secador solar híbrido (Fuente propia).</i>	114
<i>Figura 46. Calentamiento de barra del CSH-CPI (Fuente propia).</i>	114
<i>Figura 47. Evaluación térmica del CSH-CPI (Fuente propia).</i>	115
<i>Figura 48. Secador solar híbrido, A) temperatura de entrada del CSH-CPI, B) temperatura dentro del CSH-CPI medio, C) temperatura de salida del CSH-CPI, D) temperatura dentro del CSH-CPI medio salida, E) conexión de CSH-CPI y cabina de secado y F) temperatura de cabina de secado (Fuente propia).</i>	116



*Figura 49. Sistema auxiliar de calefacción mediante resistencias eléctricas (Fuente propia)..... 118*

*Figura 50. Evaluación térmica del CSH-RE (Fuente propia)..... 119*

*Figura 51. Secador solar híbrido, A) temperatura de entrada del CSH-RE, B) temperatura dentro del CSH-RE, medio, C) temperatura de salida del CSH-RE, D) temperatura de cabina de secado (Fuente propia). .... 120*

*Figura 52. Evaluación térmica del CSH-RE final (4 resistencias eléctricas) (Fuente propia)..... 121*

*Figura 53. Secador solar híbrido optimizado, A) temperatura de entrada del CSH-RE, B) temperatura dentro del CSH-RE, medio, C) temperatura de salida del CSH-RE, D) temperatura dentro del CSH-RE medio salida, E) conexión de CSH-RE y cabina de secado y F) temperatura de cabina de secado (Fuente propia). . 122*

*Figura 54. Incrementos de temperatura del secador solar híbrido (Fuente propia).122*

*Figura 55. Correlograma de variables climáticas a modelar (Fuente propia)..... 126*

*Figura 56. Curva de secado de arándano a 60, 70 y 80 °C (Fuente propia)..... 131*

*Figura 57. Velocidad de secado de arándano a diferentes temperaturas (Fuente propia)..... 131*

*Figura 58. ANOVA de humedad del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia). .... 132*

*Figura 59. Actividad de agua del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia). .... 133*

*Figura 60. ANOVA de índice de higroscopicidad del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia). .... 134*

*Figura 61. ANOVA de pH del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia). .... 135*

*Figura 62. ANOVA de sólidos solubles del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia)..... 136*



*Figura 63. ANOVA de azúcares reductores del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia)..... 137*

*Figura 64. ANOVA de antocianinas del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia). .... 138*

*Figura 65. Arándano seco para análisis de color, A) tratamiento de 60 °C, (B) tratamiento de 70 °C, (C) tratamiento de 80 °C (Fuente propia)..... 140*

*Figura 66. ANOVA de análisis sensorial de la variable color (Fuente propia). .... 141*

*Figura 67. ANOVA del análisis sensorial de la variable sabor (Fuente propia)... 142*

*Figura 68. ANOVA de análisis sensorial de la variable textura (Fuente propia).. 143*

*Figura 69. ANOVA de humedad del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia)..... 144*

*Figura 70. Actividad de agua del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia). .... 145*

*Figura 71. ANOVA de índice de higroscopicidad del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia)..... 146*

*Figura 72. ANOVA de pH del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia). .... 147*

*Figura 73. ANOVA de sólidos solubles del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia)..... 148*

*Figura 74. ANOVA de azúcares reductores del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia)..... 149*

*Figura 75. ANOVA de antocianinas del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia). .... 149*

*Figura 76. Diagrama de relación de trabajo (uso de energía eléctrica) del secador de bandejas eléctrico (Fuente propia). .... 151*

*Figura 77. Diagrama de relación de trabajo (uso de energía eléctrica) del secador solar híbrido (Fuente propia). .... 151*



## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Aplicación de secadores.....	23
Cuadro 2. Matriz de ponderación.....	66
Cuadro 3. Resultado de ponderación de factores .....	68
Cuadro 4. Comparación de captadores solares.....	69
Cuadro 5. Parámetros del CSH.....	104
Cuadro 6. Parámetros del sistema auxiliar de calentamiento CPI.....	105
Cuadro 7. Parámetros del sistema auxiliar de calentamiento resistencias eléctricas. .....	105
Cuadro 8. Materiales del CSH.....	106
Cuadro 9. Materiales de la cabina de secado.....	107
Cuadro 10. Parámetros del CSH.....	108
Cuadro 11. Eficiencia del CSH-CPI.....	112
Cuadro 12. Parámetros de temperatura del CSH- CPI.....	115
Cuadro 13. Parámetros de temperatura del CSH-RE.....	119
Cuadro 14. Parámetros de temperatura del CSH final (FLUJO 5.1).....	120
Cuadro 15. Incrementos de temperatura del secador solar híbrido.....	122
Cuadro 16. Parámetros del CSH.....	123
Cuadro 17. Parámetros del sistema auxiliar de calentamiento resistencias eléctricas. .....	123
Cuadro 18. Materiales de construcción del CSH.....	124
Cuadro 19. Componentes principales de variables climáticas para el modelo de temperatura del CSH.....	127



Cuadro 20. Importancia de los componentes principales para el modelo de temperatura del CSH. ....	128
Cuadro 21. Parámetros e índice de color de los arándanos. ....	139
Cuadro 22. Costo de energía eléctrica de los secadores. ....	153
Cuadro 23. Evaluación térmica con sistema auxiliar de calentamiento por inducción. ....	184
Cuadro 24. Evaluación térmica con sistema auxiliar de calentamiento por resistencias eléctricas. ....	189
Cuadro 25. Evaluación térmica con sistema auxiliar de calentamiento por resistencias eléctricas (4). ....	190
Cuadro 26. Análisis fisicoquímicos del secado de arándano. ....	193
Cuadro 27. Análisis sensorial del arándano seco. ....	194



## RESUMEN

La industria alimenticia representa un gasto energético de 10% a 15% del total de energía eléctrica utilizada en el mundo, principalmente en procesos de secado, el secado de alimentos es uno de los principales procesos de conservación de alimentos, los cuales se abastecen con energía eléctrica (EE). Recientemente la EE ha tenido constantes incrementos en sus costos, suscitando la integración de fuentes de energía renovables, principalmente la energía solar. Por lo que, el objetivo de esta investigación fue diseñar, construir y modelar un captador solar híbrido (CSH) conformado por energía solar a través de un captador solar (CS) y EE por medio de un sistema de calentamiento auxiliar en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, este trabajo prioriza la incorporación de un sistema auxiliar de calentamiento (SAC) para los CS minimizando la variabilidad de temperatura y aumentando su capacidad calorífica que pueden presentar por su dependencia de las condiciones climáticas, el CSH desarrollado cuenta con una superficie de captación de  $1 \text{ m}^2$  con flujo regulable de  $0 - 5.1 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$  y temperatura máx. de  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ , capaz de realizar secado convectivo de alimentos; además, la radiación obtenida en este municipio en el año 2020 fue de  $698.26 \text{ Wm}^{-2}$  siendo favorable para el uso de energía solar, el modelo estadístico lineal de predicción desarrollado con PCR, para determinar la temperatura de salida ( $TS$ ) que aporta el CSH con solo el uso de energía solar y estimar la energía que aportara la EE con el SAC, el modelo presenta una  $R^2$  de 0.934 y se puede utilizar para comprender la  $TS$  del CSH, el gasto energético obtenido del CSH fue de \$ 147.5 pesos (MXN) para un secado de arándano de 12 horas a  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ , en el cual los productos obtenidos presentaban características fisicoquímicas  $H 0.29(\pm 0.093) \text{ g H}_2\text{O g MS}$ ,  $Aw 0.248(\pm 0.0451)$ ,  $IH 0.2123(\pm 0.0117) \text{ g H}_2\text{O abs/100g MS}$ ,  $pH 3.33(\pm 0.259)$ ,  $SST 49(\pm 5.6) \text{ }^\circ\text{Brix}$ ,  $AR 0.512(\pm 0.027) \text{ mg/100g}$  y  $A 41(\pm 14.45) \text{ mg/100g}$ , similares al secado realizado en un secador eléctrico.

**PALABRAS CLAVE:** *energía solar, secado solar, secado convectivo, captador solar híbrido, captador solar de placa plana, arándano, modelación, regresión sobre componentes principales.*



## ABSTRACT

The food industry represents an energy expenditure of 10% to 15% of the total electrical energy used in the world, mainly in drying processes, food drying is one of the main food preservation processes, which are supplied with energy electrical (EE). Recently the EE has had constant increases in its costs, prompting the integration of renewable energy sources, mainly solar energy. Therefore, the objective of this research was to design, build and model a hybrid solar collector (CSH) made up of solar energy through a solar collector (CS) and EE through an auxiliary heating system in the municipality of Tlajomulco of Zúñiga, Jalisco, this work prioritizes the incorporation of an auxiliary heating system (SAC) for the SC minimizing the variability of temperature and increasing its heat capacity that they can present due to their dependence on climatic conditions, the developed CSH has a surface collection area of  $1 m^2$  with adjustable flow from  $0 - 5.1 m^3 min^{-1}$  and max.  $70 ^\circ C$ , capable of convective drying of food; In addition, the radiation obtained in this municipality in the year 2020 was  $698.26 W m^{-2}$ , being favorable for the use of solar energy, the prediction model developed with PCR, to determine the outlet temperature (TS) provided by the CSH with only the use of solar energy and estimate the energy provided by the EE with the SAC, the model presents an  $R^2$  of 0.934 and can be used to understand the TS of the CSH, the energy expenditure obtained from the CSH was \$147.5 pesos (MXN) for a 12-hour blueberry drying at  $70 ^\circ C$ , in which the products obtained presented physicochemical characteristics H  $0.29(\pm 0.093) g H_2O g MS$ , Aw  $0.248(\pm 0.0451)$ , IH  $0.2123(\pm 0.0117) g H_2O abs/100g MS$ , pH  $3.33(\pm 0.259)$ , SST  $49(\pm 5.6) ^\circ Brix$ , AR  $0.512(\pm 0.027) mg/100g$  y A  $41(\pm 14.45) mg/100g$ , similar to drying done in an electric dryer.

**KEYWORDS:** *solar energy, dry solar, convective drying, hybrid solar collector, flat plate solar collector, modeling, principal components regression.*



## I. INTRODUCCIÓN

El costo de la energía eléctrica (EE) en la actualidad tiene constantes incrementos; lo cual, influye directamente en los gastos de operación de las industrias alimentarias (IA), ya que los procesos que estas llevan a cabo consumen grandes cantidades de energía eléctrica. Actualmente las industrias requieren procesos de secado convectivo para el procesamiento de sus productos con el fin de eliminar el agua del producto para evitar problemas de deterioro y dejarlos en condiciones favorables para su consumo, lo que genera un alto gasto energético debido a que este proceso es abastecido principalmente con energía eléctrica; al respecto, estas industrias utilizan entre 10% a 15% del total de energía que emplean todas las industrias en el mundo (Bennamoun, 2011); por lo cual, se ha optado por el aprovechamiento de Energías Renovables (ER), y sustituir o complementar los procesos que utilizan la EE con menores costos. La tierra recibe en promedio  $1\ 366\ W\ m^{-2}$  de radiación, lo que representa más de 10 000 veces la energía que necesita el planeta, pudiéndose aprovechar  $1\ 000\ W\ m^{-2}$ , por lo que, el uso de la Energía Solar (ES), en la actualidad es una alternativa utilizada para reducir el consumo de EE (Montero y col., 2015). México es un país que se encuentra dentro del llamado cinturón solar y es de los países con mayor incidencia solar, por lo que, el aprovechamiento de la ES debe ser una prioridad para el país. Aunado a ello, Del Toro y col. (2009), señalan que las condiciones climatológicas están altamente relacionadas con la cantidad de radiación solar que se capta en un territorio y no necesariamente puede ser las mismas a otro sitio cercano. La energía solar se utiliza en sistemas de secado solar para generar energía térmica, que puede ser de tipo directo (TD) o indirecto (TI) (Téllez y col., 2019). Para el secado TI se utilizan captadores solares (CS) con cabinas de secado, que se emplean en el secado de productos agrícolas (El-Hage y col., 2018); sin embargo, las temperaturas y eficiencias que alcanzan los CS son bajas (aprox. 20-40 %) y prolongan los tiempos de secado (Sharma y col., 2017); por lo que, para incrementar la eficiencia se han propuesto diferentes diseños y materiales para la



elaboración de estos CS, entre los que se encuentran captadores solares de placa plana (CPP), con materiales con cambio de fase o almacenamiento (CPPMCF), CS con nanofluidos (CSN), captadores mixtos y principalmente los captadores solares híbridos (CSH) (Shalaby y col., 2014; Espinoza, 2016); con los que se ha obtenido beneficios en el secado solar, en el consumo de energía eléctrica, el tiempo de secado y su eficiencia logrando en algunos casos un secado solar energéticamente eficiente para la operación de secado continuo (Hashim y col., 2014; Bokor y col., 2019; Murali y col., 2020), Otras opciones viables para la industria del secado de alimentos, la constituye el calentamiento por inducción (CPI) y el uso de resistencias eléctricas para calentamiento; principalmente, se puede mencionar la inducción electromagnética, que puede acortar hasta 2.5 veces el tiempo de secado y se obtienen productos de calidad (Ortiz-Hernández y col., 2020). Respecto a las resistencias eléctricas la eficiencia que reportan es menor pero su disponibilidad y accesibilidad económica las convierte en una opción viable. Lo anterior permite suponer que nuevos desarrollos CSH solar-eléctrico con la integración de un sistema auxiliar de calentamiento mejorara la eficiencia de los CSH y pueden ser utilizados en procesos de secado industrial. La predicción del comportamiento térmico de los sistemas de secado, mediante modelos matemáticos, es un aspecto de suma importancia para el manejo eficiente de captadores solares híbridos, debido a la variabilidad que pueden presentar las condiciones climatológicas (Hao y col., 2021). Al respecto, generalmente se utilizan modelos de caja negra, que describen correlaciones empíricas basadas en experiencias o mediciones (Sałat y Korpysz, 2017), como es el caso de la utilización de modelos de regresión lineal múltiple que se han utilizado para predecir el comportamiento de alguna variable de interés del captador solar (Kicsiny, 2014). Sin embargo, estos modelos presentan problemas de multicolinealidad entre las variables predictoras, lo cual podría conducir a una identificación errónea de los predictores más importantes (Jadhav y col., 2019). El análisis de componentes principales (PCA) es un método que se utiliza de forma



intensiva para encontrar la relación entre varios parámetros, evita problemas de multicolinealidad y ayuda a desarrollar modelos de predicción más robustos (Camdevyren y col., 2005; Wuttichaikitcharoen y Babel, 2014). Los métodos de la regresión sobre componentes principales (PCR) se han utilizado con éxito para analizar datos y mejorar la precisión de los modelos generados con características multivariantes (Chen y col., 2018). La PCR es un método robusto de aprendizaje automático que se ha aplicado ampliamente para obtener modelos de predicción (Luan y col., 2018; Yang y col., 2018). Por lo tanto, el objetivo principal de este estudio fue diseñar y construir un CSH con una fuente de energía solar a través de un CS y una fuente de calentamiento auxiliar con EE para el secado de futas en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, asimismo modelar el comportamiento térmico del CSH utilizando PCR.



## II. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

Diseñar, construir y modelar un captador solar híbrido (Solar-Eléctrico) con sistema auxiliar de calentamiento para el proceso de secado de alimentos en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco.

### 2.2 Objetivos específicos

1.-. Determinar el potencial solar en Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México para la utilización de energía solar como energía térmica.

1.1.-. Evaluar el clima de la región.

1.2.-. Determinar la factibilidad para el uso de energía solar como energía térmica.

2.-. Diseñar y construir un captador solar híbrido (Solar-Eléctrico) para el proceso de secado de alimentos.

2.1.-. Diseñar y construir un CSH con sistema auxiliar de calentamiento:

a) Calentamiento por inducción electromagnética.

b) Resistencias eléctricas.

2.2.-. Construcción de una cabina de secado.

2.3.-. Evaluación térmica del CSH con la energía solar.

2.4.-. Evaluación térmica del CSH.



3.-. Modelar el comportamiento de temperatura de un CSH para el calentamiento de aire, con un CPP de doble paso y un sistema de calentamiento auxiliar y desarrollar un enfoque estadístico multivariado para clasificar las variables predictoras de acuerdo con sus interrelaciones y predecir la temperatura de salida (TS) del CSH utilizando PCR.

3.1.-. Determinar los componentes principales de las variables climáticas en el CSH.

3.2.-. Determinar el modelo de comportamiento de temperatura del CSH.

3.3.-. Simular la aportación de energía calorífica de la segunda fuente de energía del CSH.

4.-. Optimizar la temperatura del secado de arándano (*V. corymbosum* L) en un secador de bandejas eléctrico y comparación del proceso de secado de arándano con el CSH.

4.1.-. Evaluar el efecto de la temperatura de secado sobre los parámetros fisicoquímicos, características antioxidantes y tiempo del secado del arándano (*V. corymbosum*).

4.2.-. Evaluar las características sensoriales del arándano (*V. corymbosum*) deshidratado.

- Comparación energética en el secado de arándano (*V. corymbosum*) entre el secador de bandejas eléctrico y el CSH.



### **III. PROBLEMÁTICA**

Las industrias requieren un proceso de secado convectivo en sus productos, por lo cual utilizan secadores que dispone únicamente energía eléctrica, pero, el constante aumento de los precios de la energía y las políticas ambientales, hacen que busquen nuevas opciones como el uso de la energía solar a través de captadores solares para el secado de alimentos; sin embargo, las condiciones climatológicas de un territorio específico, la inestabilidad, baja temperatura, bajos volúmenes de producción, sin dejar por demás el área que se necesita para la fabricación de los CPP no los convierte en una opción directa.

### **IV. JUSTIFICACIÓN**

Actualmente los países en desarrollo están enfocando sus esfuerzos hacia la producción de las energías renovables en la industria alimentaria, principalmente la energía solar, a través del uso de captadores solares, ya que ha demostrado ser una opción viable para el secado de alimentos, el desarrollo de diferentes diseños y materiales para la elaboración de captadores de placa plana como CPPMCF, CSN, CSH, han incrementado la eficiencia, disminuido el tiempo de secado, operar por un tiempo más prolongado y ahorrando en el consumo de energía eléctrica; por lo que, el desarrollo de nuevos CSH con tecnologías de calentamiento eléctrico incrementara la eficiencia de estos tipos de secadores.

### **V. HIPÓTESIS**

El captador solar híbrido (Solar-Eléctrico) con sistema auxiliar de calentamiento alcanza temperaturas de 70 °C y es utilizable para el proceso de secado de alimentos en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco.



## VI. ESTADO DEL ARTE

### 6.1.1 Energía

La energía es la capacidad que tienen los cuerpos para producir trabajo: mecánico, emisión de luz, generación de calor, etc. La energía puede manifestarse de distintas formas: gravitatoria, cinética, química, eléctrica, magnética, nuclear, radiante, etc., existiendo la posibilidad de que se transformen entre sí, pero respetando siempre el principio de la conservación de la energía (Educa, 2014).

#### 6.1.1.1 Energía eléctrica

La generación de Energía Eléctrica (EE) se fundamenta en transformación de alguna clase de energía, “no eléctrica”, en energía eléctrica, para su producción de manera industrial se utilizan centrales eléctricas, las cuales ejecutan alguna de las transformaciones mencionadas anteriormente, de energía “no eléctrica” en energía eléctrica y constituyen el primer escalón del sistema de suministro eléctrico (Balcells y col., 2010).

La EE, hoy en día es algo indispensable para los países, debido a su versatilidad, controlabilidad, disponibilidad y múltiples usos, siendo difícil de reemplazar en la mayoría de los usos y aplicaciones; por lo que, puede afirmarse que el funcionamiento de las sociedades desarrolladas depende de una forma significativa de la disponibilidad de la energía eléctrica (Djørup y col., 2018). La EE principalmente proviene de energías no renovables (ENR), las cuales, son aquellas que existen en la naturaleza en cantidades limitadas y no se renuevan a corto plazo, por ejemplo, los combustibles fósiles; sin embargo, los constantes incrementos de demanda energética, el costo y agotamiento de estos recursos, suscita la creación de nuevas políticas ambientales priorizando la utilización de las energías renovables



(ER) (CARLEY, 2009). Las ER son fuentes de energía cuyo potencial es inagotable, debido a que provienen de la energía que llega a nuestro planeta constantemente, como consecuencia de la radiación solar o de la atracción gravitatoria de la luna (Velasco, 2009), ejemplo de algunas son la energía hidráulica, energía solar, energía eólica, energía por combustión (biomasa), energía geotérmica, etc.; además, una de las principales ventajas de las ER presenta un nulo o bajo impacto negativo sobre el medio ambiente, por lo que se consideran energías limpias (Labandeira y col., 2012).

## 6.1.2. Energía solar

El planeta recibe del sol ondas electromagnéticas de energía, este fenómeno físico, es el responsable de que nuestro planeta reciba un aporte energético continuo de aproximadamente  $1\ 367\ W\ m^{-2}$ , un valor que recibe el nombre de constante solar y que, al cabo de un año, equivaldría a 20 veces la energía almacenada en todas las reservas de combustibles fósiles del mundo; es una fuente de energía descentralizada, limpia e inagotable (Montero y col., 2015). El aprovechamiento energético está entonces condicionado por la intensidad de radiación solar recibida por la tierra, los ciclos diarios y anuales a los que está sometida y las condiciones climatológicas del lugar (Montero y col., 2015). Se define como ES a la energía que mediante conversión a calor o electricidad se aprovecha de la radiación derivada del sol. Ambas energías permiten su aprovechamiento para calentar agua o aire mediante paneles térmicos y para generar electricidad con paneles fotovoltaicos (Döring, 2016).

### 6.1.2.1 Constante solar

La constante solar es la cantidad de energía, emitida en forma de radiación, por unidad de tiempo y por unidad de área, medida en la parte externa de la atmósfera terrestre y en un plano perpendicular a la dirección de los rayos del sol como se puede observar en la figura 1.

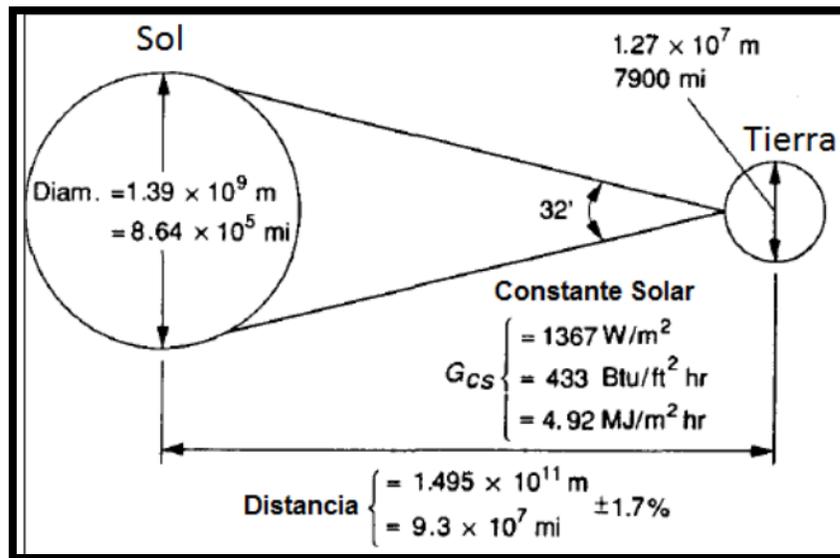


Figura 1. Relaciones Geométricas entre El Sol y la Tierra (Duffie y Beckman, 1991).

Para calcular la constante solar se utiliza la ley de Stefan-Boltzman, tomando la temperatura efectiva de cuerpo negro de la estrella 5 777 (K), la relación de áreas entre el sol y una esfera situada a una distancia, conocida como unidad astronómica como se muestra en la ecuación 1, (distancia entre el Sol y la Tierra), (Duffie y Beckman, 1991).

Ecuación 1..... $G_{cs} = \sigma T_{ef}^4 \left(\frac{R}{a_0}\right)^2$



### 6.1.2.2 Radiación solar

La radiación es la transferencia de energía por ondas electromagnéticas, producida directamente desde la fuente hacia fuera en todas las direcciones, estas ondas no necesitan un medio material para propagarse, pueden atravesar el espacio interplanetario y llegar a la tierra desde el sol (Quiñones y col., 2019).

La longitud de onda y frecuencia de las ondas electromagnéticas son importantes para determinar su energía, su visibilidad y su poder de penetración, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad de 299.792 Km/s, y pueden tener diferentes longitudes de onda, a el conjunto de las longitudes de onda se le denomina espectro electromagnético, particularmente las emitidas por el sol denomina espectro solar (Huamán, 2018).

La radiación global se define como la radiación solar recibida de un ángulo sólido de  $2\pi$  estereorradianes sobre una superficie horizontal, esta incluye la recibida directamente del disco solar y también la radiación celeste difusa dispersada al atravesar la atmósfera, se mide la radiación solar a través de un instrumento llamado pirómetro. Este se utiliza para medir la radiación incidente sobre superficies inclinadas y se dispone en posición invertida para medir la radiación global reflejada (albedo) (Huamán, 2018).

Leyes de la radiación.

1. Todos los objetos emiten energía radiante, cualquiera sea la temperatura del objeto.
2. Los objetos con mayor temperatura radian más energía total por unidad de área que los objetos más fríos.
3. Los cuerpos con mayor temperatura emiten un máximo de radiación en longitudes de ondas,  $\lambda$ , más cortas.



4. Los objetos que son buenos absorbedores de radiación son también buenos emisores. Este es un principio importante para comprender el calentamiento en la atmósfera, porque sus gases son absorbedores y emisores selectivos en longitud de onda. Así, la atmósfera es aproximadamente transparente (no absorbe) a ciertas longitudes de onda de radiación y aproximadamente opaca (buen absorbedor) en otras longitudes de onda.
5. Un absorbedor perfecto se llama “cuerpo negro”, que se define como un objeto ideal que absorbe toda la radiación que llega a su superficie. No se conoce ningún objeto así, aunque una superficie de negro de carbono puede llegar a absorber aproximadamente un 97% de la radiación incidente (Sarabia y col., 2018).

### 6.1.3 Radiación solar entrante

La radiación de onda corta es la radiación solar que llega a la atmósfera de la tierra se caracteriza por los valores de longitud de onda cortos en los que se concentra el máximo de emisión de energía solar (García-Badell, 1983). La radiación solar que llega a la superficie de la tierra es de un 25 % y un 26 % es dispersado por la atmósfera como radiación difusa hacia la superficie, esto hace que un 51 % de radiación llegue a la superficie terrestre. Un 19 % es absorbido por las nubes y gases atmosféricos. El otro 30 % se pierde hacia el espacio, de esto la atmósfera dispersa un 6 %, las nubes reflejan un 20 % y el suelo refleja el otro 4 %. Entonces la radiación solar que llega a la atmósfera puede ser dispersada, reflejada o absorbida por sus componentes. Esto depende de la longitud de onda de la energía transmitida y del tamaño y naturaleza de la sustancia que modifica la radiación (Salguero-Parra, 2018).

La radiación incidente en la superficie terrestre tiene tres características generales: la escasa intensidad, la intermitencia, que depende de la alternancia entre día y



noche; la poca uniformidad, porque se concentra sobre todo entre las latitudes  $\pm 30^\circ$ ; a la luz de lo mencionado (García-Badell, 1983). La energía del Sol que llega a nuestro planeta es inmensa y esta se puede manifestar de distintas maneras (Pareja, 2010), y diferentes formas en que se puede aprovechar la energía solar. Esta clasificación la podemos hacer por tecnologías y por su uso más general. Aquí se presentan las formas de energía solar más importantes para la generación de electricidad:

- Energía Solar Fotovoltaica
- Energía Solar Térmica

Diversos estudios han demostrado que los países ubicados dentro del llamado Cinturón Solar Global (CSG) representan alrededor del 75 % de la población mundial y el 40 % de la demanda mundial de electricidad como podemos observar en la figura 2 (Desertec Foundation, 2015). Sin embargo, con altos niveles de radiación solar, la capacidad instalada en estos países solo representa solo el 9 % a nivel mundial (Amelio, 2011; Atarama, 2019). Una investigación realizada presenta que los países ubicados en este cinturón (la latitud del ecuador  $\pm 35^\circ$ ) tienen un potencial solar que aún no ha sido explotado de manera efectiva (Solar Power Europe, 2015).

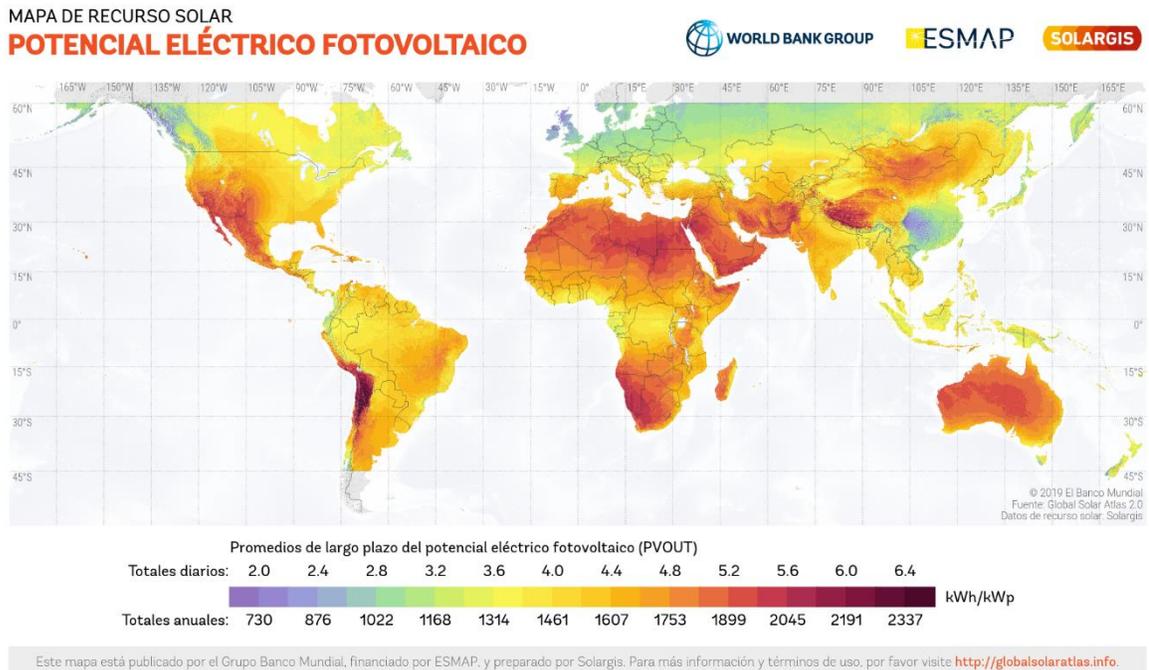


Figura 2. Mapa de radiación global (fuente, SOLARGIS).

### 6.1.3.1 Energía solar térmica

La energía térmica de un cuerpo está asociada al movimiento estructural atómico o molecular. El incremento de la temperatura en un sólido implica mayor desplazamiento y vibraciones de los átomos, iones o moléculas que forman el retículo cristalino. Calor es el nombre que recibe la energía térmica asociada con el movimiento al azar de partículas componentes de un cuerpo. La energía solar térmica aprovecha la radiación del sol para calentar un fluido que, por lo general, suele ser agua o aire, convierte la energía radiactiva en calor, su principal componente es un captador solar, por el cual circula un fluido que absorbe la energía radiada del sol. De acuerdo con la temperatura de aprovechamiento se puede



clasificar el aprovechamiento en de alta, media y baja, siendo sus límites (SOLAIRE, 2018).

Hasta 100 °C: de baja temperatura.

Desde 100 °C y hasta 300 °C: de mediana temperatura.

Mayores a 300 °C: de alta temperatura.

Además del transporte de energía debido al movimiento molecular aleatorio (difusión), la energía también se transfiere por medio del movimiento global o macroscópico del fluido. El movimiento del fluido se asocia con que, en cualquier instante, grandes cantidades de moléculas se mueven de forma colectiva como agregados (Martínez y col., 2016). Tal movimiento, en presencia de un gradiente de temperatura, promueve la transferencia de calor. Se acostumbra a llamar convección al transporte debido al movimiento del fluido y las moléculas, mientras que se define a la advección como el fenómeno de transporte relacionado al movimiento volumétrico del fluido (Martínez, 2009).

## **6.1.4 Aprovechamiento de la energía solar**

### **6.1.4.1 Consumo energético en la industria**

Las ramas de actividad con mayor consumo de energía el son la industria de la alimentación, la metalurgia y la industria química, la energía utilizada principalmente para abastecer esta industria es la electricidad, con un 56.40 % del consumo total del sector, generado un consumo energético que alcanzó los 10 957 millones de euros en el año 2015 (ECE, 2015).

Los principales productos energéticos utilizados por las empresas industriales fueron la electricidad (56.40 % del total), el gas (31.40 %) y los productos petrolíferos

(6.90 %), en los 10 últimos años la electricidad siempre ha sido el principal producto energético en cuanto a consumo, con porcentajes que han oscilado entre el 47.90 % del total en el año 2005 y el 56.40 % en 2015. Por su parte, el consumo de productos petrolíferos ha ido descendiendo en este mismo periodo hasta situarse en el 6.90 % del total en 2015, cuando 10 años antes representaba el 20.70 % (SENER, 2016).

Las ramas de actividad con mayor consumo energético en 2015 fueron industria de la alimentación (15.70 % del total), metalurgia; fabricación de productos de hierro, acero y ferroaleaciones (15.60 %) e industria química (15.10 %). En el lado opuesto, las actividades con menor consumo fueron Industria del tabaco (0.10%), confección de prendas de vestir (0.20 %) y fabricación de productos informáticos, electrónicos y ópticos (0.20 %), de acuerdo con la SENER el mayor tipo de energía utilizada son productos petrolíferos como lo podemos observar en la figura 3, y resaltando que en la industria alimenticia solo se utiliza productos petrolíferos. El principal uso energético en la industria alimentaria es en los procesos de deshidratación de alimentos, haciendo que sus productos tengan un precio elevado.

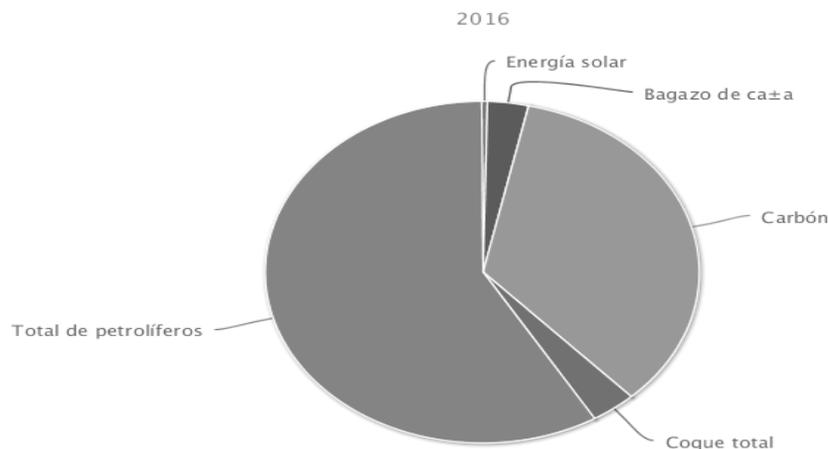


Figura 3. Tipos de consumo de energía utilizadas en la industria (SENER 2016).



Actualmente la industria desempeña un papel prioritario en el crecimiento económico de un país, de acuerdo con la agencia internacional de energía (2016) el consumo mundial de energía en el sector industrial es de 29.2 %; por ello, existe la necesidad de cumplir la demanda energética, para esto sería deseable utilizar energías renovables debido a los beneficios antes mencionados.

### 6.1.5 Energía solar térmica en México

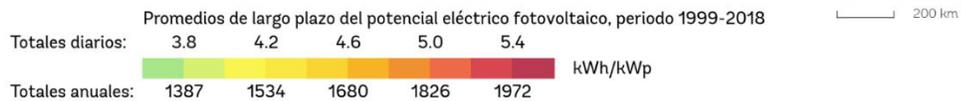
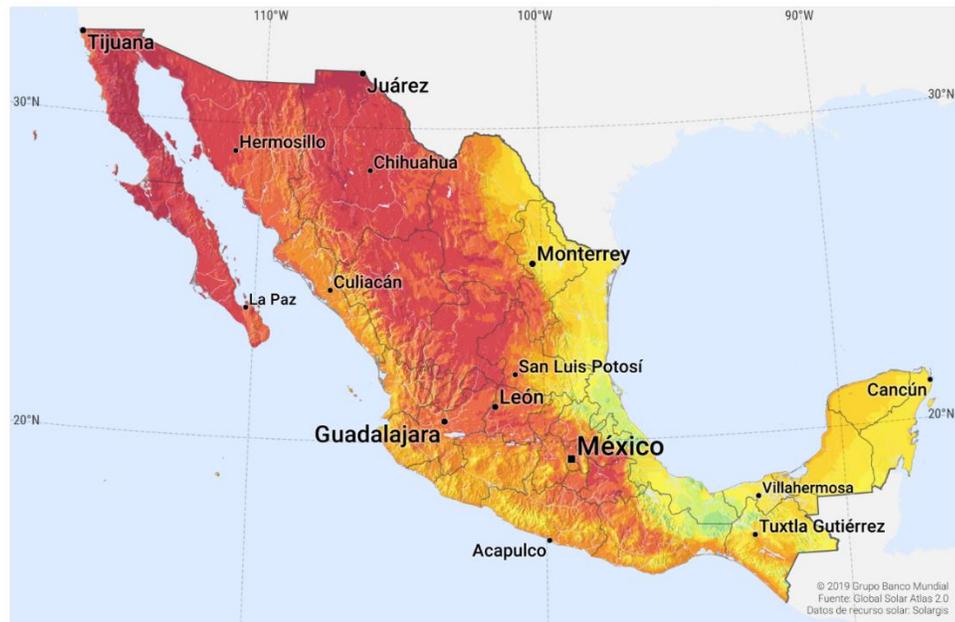
México se encuentra dentro del cinturón solar de la tierra, por lo cual, el país tiene una alta incidencia de radiación en la mayor parte de su territorio; la zona norte es de las más soleadas del mundo, con una irradiación media anual de aproximadamente  $5 \text{ kWh m}^{-2}$  por día, México es uno de los países a nivel mundial que presenta condiciones ideales para el aprovechamiento masivo de este tipo de energía (Valdés-Barrón y col., 2020). Actualmente en México se genera energía eléctrica a través de paneles fotovoltaicos o sistemas de concentración solar utilizando la radiación directa, y existen mecanismos concretos para lograr que la inversión sea rentable; sin embargo, este potencial no se ha desarrollado de manera adecuada (Villicaña, 2012). México se ubica geográficamente dentro del cinturón solar; lo cual, lo hace una superficie potencialmente adecuada para el uso de energía solar. A través de la elaboración de documentos como el Atlas de Potencial Solar y Eólica de la República Mexicana, para incentivar el uso de energías renovables (SENER, 2015). Estos instrumentos son de uso público y brindan información relacionada con la radiación solar recibida y el potencial eólico en el territorio, hacen propicia la captación de esta fuente natural de energía. Su clima tropical con alrededor de 30 % y el clima cálido con 20 %, completan el 100 % del análisis del territorio mexicano (Thoma y col., 2013). México se ubica dentro de los tres primeros lugares en potencial a nivel



mundial; sin embargo, las condiciones para la explotación de la energía solar son adecuadas con una media nacional superior a  $5 \text{ kWh m}^{-2}$  (Ernest and Young Organization, 2012). En este sentido, un estudio de Díaz (2015), sobre la radiación solar directa normal en el estado de Baja California, México, durante el año 2012 muestra que esta zona del norte del país tiene un gran potencial de captación de energía, siendo los meses de marzo a septiembre los más significativos con valores superiores a  $5 \text{ kWh m}^{-2}$  por día como se observa en la figura 4. Además, los territorios con mayor promedio de radiación solar anual con índices que van de los  $4.4 \text{ kWh m}^{-2}$  por día en la zona centro, a los  $6.3 \text{ kWh m}^{-2}$  por día en el norte del país, resulta fundamental la adopción de políticas públicas que fomenten el aprovechamiento sustentable de la energía solar en nuestro país (Ulloa, 2017).

MAPA DE RECURSO SOLAR

## POTENCIAL ELÉCTRICO FOTOVOLTAICO MÉXICO



Este mapa está publicado por el Grupo Banco Mundial, financiado por ESMAP, y preparado por Solargis. Para más información y términos de uso, por favor visite <http://globalsolaratlas.info>.

Figura 4. Mapa de Irradiación Solar, México, kWh/m<sup>2</sup>al día. Fuente: SOLARGIS.

Estos parámetros nos colocan de manera favorable para el uso de la energía solar, particularmente en la ciudad de Guadalajara, Jalisco, la Insolación Normal Directa (IND) es de  $4.9 \text{ kWh m}^{-2}$  por día (Fig. 5), promedio anual reportado por centros científicos europeos (PER, 2005). Otro estudio realizado por la UNAM otorga un parámetro mayor para Guadalajara, de  $5.6 \text{ kWh m}^{-2}$  por día (Ulloa y col., 2011; Ulloa y col., 2017).

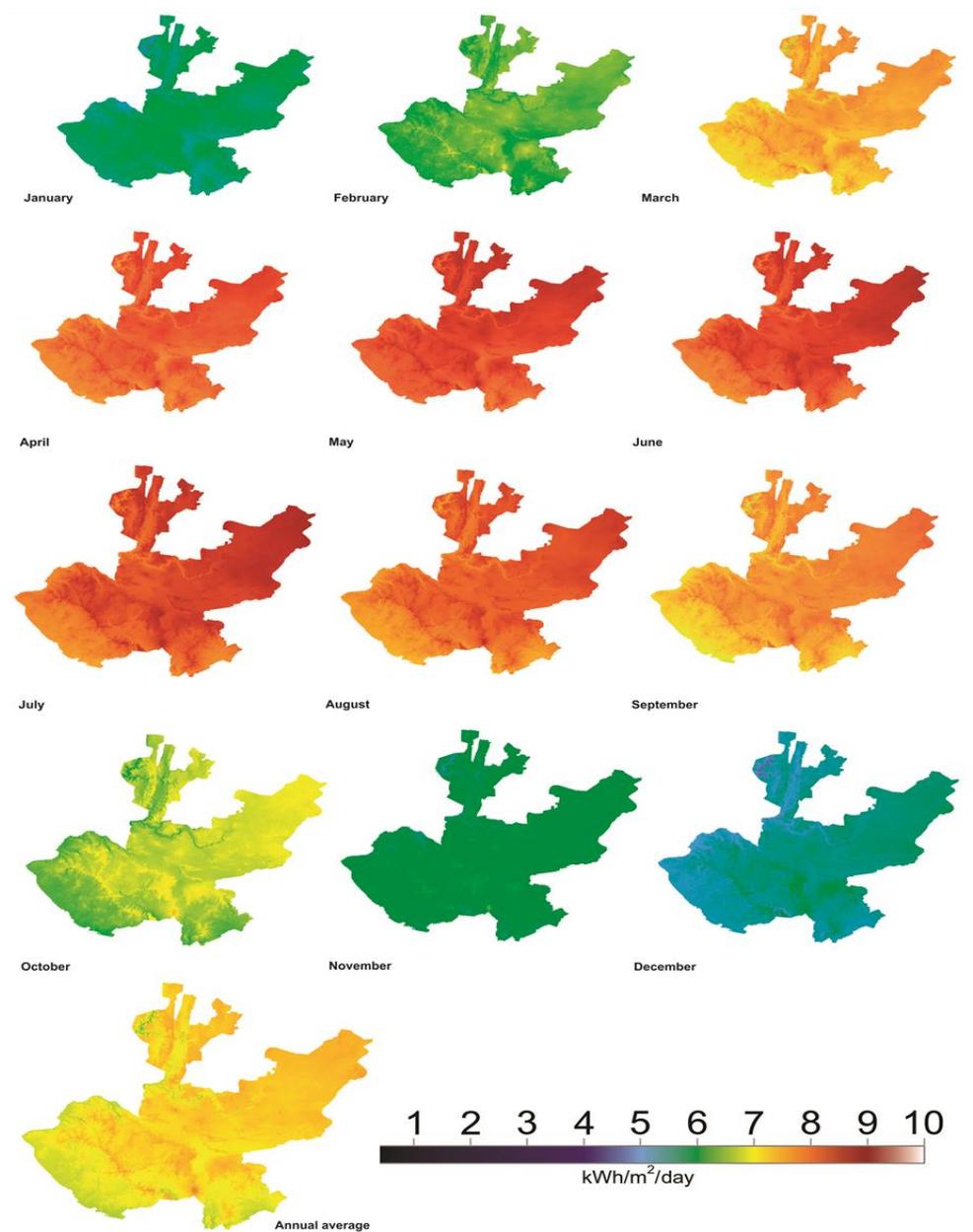


Figura 5. Radiación mensual del estado de Jalisco (Ulloa y col., 2017).

La IND es 50% más alta en otras regiones de México, por ejemplo, en Sonora se alcanza de  $7 - 8 \text{ kWh m}^{-2}$  por día en promedio anual, similar a lo reportado en algunas regiones del país (Almanza y col., 1997; Ulloa y col., 2017).



Concretamente el municipio de Tlajomulco de Zúñiga se encuentra ubicado en la región centro del estado de Jalisco, forma parte de la zona metropolitana de Guadalajara (ZMG), con latitud norte: 20° 28', longitud oeste: 103° 27', altitud: 1 575 metros sobre el nivel del mar, cuenta con una población de 220 630 habitantes y una superficie de 636.93 km<sup>2</sup>. Respecto a su geología, los terrenos del municipio están compuestos consta de rocas ígneas, brecha volcánica, tobas y basalto, de topografía encontramos las zonas accidentadas cubren el 14 % del municipio y tienen alturas de 1 700 a 2 700 metros; las zonas semiplanas cubren el 24 % del territorio y tienen alturas de 1 600 a 1 700 metros; las zonas planas ocupan el 62 % del municipio y tienen alturas de 1 500 a 1 600 metros sobre el nivel del mar (Gobierno del estado de Jalisco, 2018).

## 6.2.1 Industria

La industria es el sector secundario que comprende las actividades económicas que transforman las materias primas y los recursos naturales en productos semielaborados o elaborados utilizando máquinas movidas por una fuente de energía (Berkowitz y col 2012). El término industria se caracteriza por una gran ambigüedad y amplitud lexicológica. La definición del Diccionario de la Real Academia Española tiene cuatro acepciones: maña y destreza o artificio para hacer una cosa; conjunto de operaciones materiales ejecutadas para la obtención, transformación o transporte de uno o varios productos naturales; instalación destinada a estas operaciones; suma o conjunto de las industrias de un mismo o de varios géneros, de todo un país o de parte de él (Galiana, 2019).



### **6.2.1.1 Industria Alimentaria**

La industria alimentaria es la encargada de transformar los productos procedentes del sector agropecuario. Aunque exista una gran diversidad en la industria, los procesos de fabricación pueden clasificarse en seis tipos diferentes: manipulación, almacenamiento y de las materias primas, la extracción de sus propiedades, la elaboración hasta un producto final, el envasado y la conservación de los alimentos, siendo uno de ellos el proceso de deshidratación (Gómez y col., 2010).

### **6.2.2 Secado de alimentos**

Los países en desarrollo históricamente presentan problemas en el procesamiento y preservación de sus productos hortofrutícolas. Algunos de los principales factores de rechazo son los siguientes: daño por frío, maduración irregular, pudrición, cicatrices, antracnosis, rasgado de piel, coloraciones diferentes derivados de hongos, quemaduras etc. Esta situación ha generado inmensas pérdidas de alimentos afectando la economía de los países; por lo que, la industrialización es una alternativa para las situaciones antes mencionadas y convertirlos en un producto con valor agregado (Gómez y col., 2010).

El secado de alimentos es el proceso donde el contenido de humedad del alimento es reducido a un nivel donde no se presenta actividad microbiológica y tanto el deterioro químico como las reacciones bioquímicas se reducen al mínimo (Gómez y col., 2010); las ventajas del secado de alimentos es aumentar su vida útil, minimizar pérdidas y generar nuevas alternativas de comercialización de los productos, (Bandara y col., 2018). Se tiene una gran variedad de procedimientos de secado para alimentos sólidos a través de secadores de tipo convectivo (Barbosa y Vega, 1996), la elección depende de las características del producto y el costo del proceso



(Gómez y col., 2010; Berkowis y col., 2012). Una de las tecnologías más utilizadas el secado por bandejas (charolas), es considerada la más común y económica a mediana escala (Dorouzi y col., 2018).

Las ventajas que representa el secado de un producto respecto al manejo del material original son:

- Se aumenta el tiempo de vida útil del producto.
- Se facilita el manejo del producto.
- Se reduce el espacio de almacenamiento del producto.
- Se reducen los costos de almacenamiento y embarque.

#### **6.2.2.1 Secadores por convección**

Se caracteriza por utilizar gases calientes (aire, productos de combustión, gases inertes, vapor) que entran en contacto directo con el sólido húmedo al que transmiten calor por convección fundamentalmente y que arrastran fuera del secado los vapores producidos. Este tipo de secadores pueden ser continuos o intermitentes, siendo el costo de funcionamiento menor en los primeros (Fito-Maupoe, 2001).

La energía térmica se requiere como entrada en los secadores para los cuales se usan a menudo los calentadores eléctricos o los productos derivados del petróleo. El cuadro 1 muestra algunas aplicaciones donde el secado es esencial junto con las fuentes de calor utilizadas habitualmente.

**Cuadro 1. Aplicación de secadores.**

<b>Fuentes de calor aplicados a varios secadores.</b>			
<b>No.</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Productos básicos</b>	<b>Fuente de calor para secado</b>
<b>1</b>	Secado de cultivo agrícola	Grano de café, Té, Hojas, Cacao, arroz, cereal, etc.	Quema de madera, propano o aceite
<b>2</b>	Industria Alimentaria	Deshidratación de frutas y verduras.	Energía eléctrica
<b>3</b>	Industria Láctea	Leche en polvo, caseína	Energía eléctrica
<b>4</b>	Industria Maderera	Secado de madera	Derivados petrolíferos
<b>5</b>	Industria Textil	Condiciones de fabricación	Energía eléctrica y derivados petrolíferos

Los secadores con transferencia de calor por convección (Fig. 6), el calor se suministra a través de aire caliente o gas, el cual fluye sobre la superficie del sólido (El-Khadraoui y col., 2017).

Algunos ejemplos de secadores convectivos o directos son:

1. Secadores en bandejas o charolas: funciona mediante un ventilador que recircula aire calentado con calor eléctrico o también puede usar vapor.
2. Secadores de túnel: son compartimientos de bandejas que operan en serie, en donde las bandejas se desplazan continuamente por un túnel con gases calientes

que pasan sobre la superficie de cada bandeja y un ventilador extrae cierta cantidad de aire hacia la atmósfera.

3. Secadores rotatorios: constan de un pequeño cilindro que gira sobre su eje con una ligera inclinación. El calentamiento se lleva por contacto directo de gases caliente mediante un flujo a contracorriente, también puede ser a través de la pared calentada del cilindro (El-Khadraoui y col., 2017).

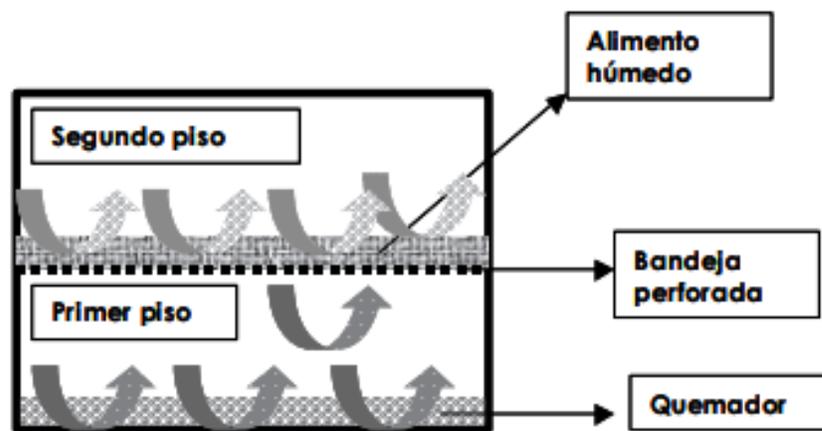


Figura 6. Esquema de un secador de horno o estufa (El-Khadraoui y col., 2017).

### 6.2.2.2 Secador de bandejas

La configuración básica de un secador consiste en un sistema que genere aire caliente; el cual puede estar compuesto de un ventilador y de una serie de hilo de resistencias eléctricas para generar calor, también debe de contar con un captador y un alimentador. Sin embargo, para propósitos educacionales son comunes los secadores sin alimentador ya que las cantidades a deshidratar son menores (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

El secador de bandejas se caracteriza por tener una serie de bandejas en donde es colocado el alimento, estas bandejas se colocan dentro de un compartimiento del secador donde se expone al aire caliente y es de los más utilizados en procesos de secado como se observa en la figura 7.



*Figura 7. Secador de bandejas de planta piloto de procesos agroindustriales (Fuente propia).*

La industria alimentaria debido a su necesidad continua de los procesos de secado, lo incentiva a buscar formas de reducir los costos eléctricos y buscar alternativas para mantener su competitividad, ya que es uno de los sectores productivos que mayor impacto tiene sobre el medio ambiente, bien sea por sus procesos productivos o por los diferentes productos que salen al mercado.



### **6.2.3 Secado solar**

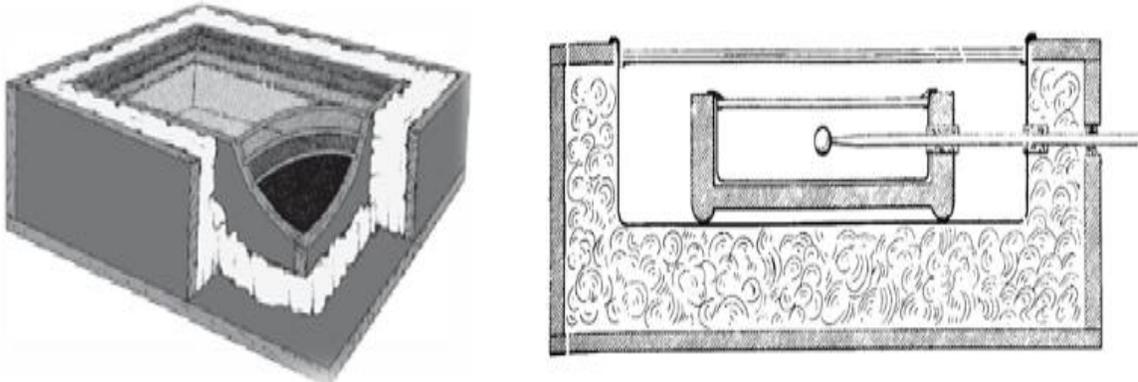
Una alternativa para lo mencionado es el secado solar que, dentro de los diferentes sistemas de secado de productos, el secado solar tradicional es, todavía hoy, el procedimiento más utilizado en todo el mundo, sobre todo cuando se trata del secado de granos, frutos y semillas. En un sistema de secado simple usando energía solar, el secador solar de radiación directa es un sistema de bajo costo, eficiente y bastante utilizado en el secado de alimentos. Por otro lado, este sistema tiene como inconveniente la dificultad del control de las condiciones operativas como, control de temperatura, velocidad y humedad relativa del aire, ya que tales parámetros dependen de las condiciones climatológicas, lo cual no lo hace viable para practicarlo en la industria.

El secado solar es una tecnología renovable y ecológica que se desarrolla de dos tipos directo e indirecto, el secado solar de tipo directo en el cual la radiación es absorbida por el propio producto, resultado más efectivo el aprovechamiento de la energía pero se tiene mayor afectación de la calidad de los productos, el secado indirecto capta la radiación solar en un captador, este calienta aire y este aire después circula por el producto a secar, este tipo de secado presenta mayores ventajas en la calidad de los productos, por lo que resulta de mucha importancia el diseño y construcción de captadores solares.

#### **6.2.3.1 Captadores solares**

Los captadores solares son mecanismos utilizados para reunir, impregnar y transferir energía solar a un fluido, que puede ser agua o aire, de los primeros captadores construidos se le asocia al Botánico y filósofo suizo, Horace de Saussure creó y mejoró lo que se dijo llamar “Hot Box” (caja caliente o trampa de calor). Este

invento surgió como un método para estudiar y comprobar el efecto invernadero que generaba una superficie vidriada, materia que recién comenzaba su comercialización masiva (Fig. 8) (Dewinter, 1990; Sola y col., 2018).



*Figura 8. Representación de los experimentos de Horace Saussure  
(<http://solarcooking.org/saussure.html>).*

El captador solar transforma la energía radiante del Sol en energía térmica, la cual es transmitida a una masa de fluido. Se describe básicamente como una cámara cerrada, aislada térmicamente que consta de dos elementos principales: una cubierta transparente y un absorbente. La cubierta transparente permite el paso de la radiación solar al interior del captador, evita la salida de las radiaciones reflejadas por las paredes y las emitidas por el absorbente.

El absorbedor, por lo general, es una placa negra colocada dentro del captador y su misión es recibir la radiación solar, transformarla en calor y transmitirla al fluido. La radiación emitida por el absorbedor depende de la temperatura que éste tenga, pero en condiciones normales de funcionamiento emite radiación con una longitud de onda más o menos comprendida entre  $4.5$  y  $7.2 \mu\text{m}$ , para el cual el vidrio de la

cubierta es opaco, incrementando así el efecto invernadero dentro del captador (Gómez, 2010).

En un captador teórico el efecto invernadero se comporta como el que se muestra en la figura 9. A medida que incrementa la temperatura en el captador, la cubierta transparente (generalmente está construida de vidrio) comienza también a emitir radiación. Aproximadamente la mitad de esta radiación se emite hacia el exterior, perdiéndose, pero la otra mitad vuelve hacia el interior y contribuye así a calentar aún más la superficie del absorbedor. Este último fenómeno es lo que se conoce como efecto invernadero.

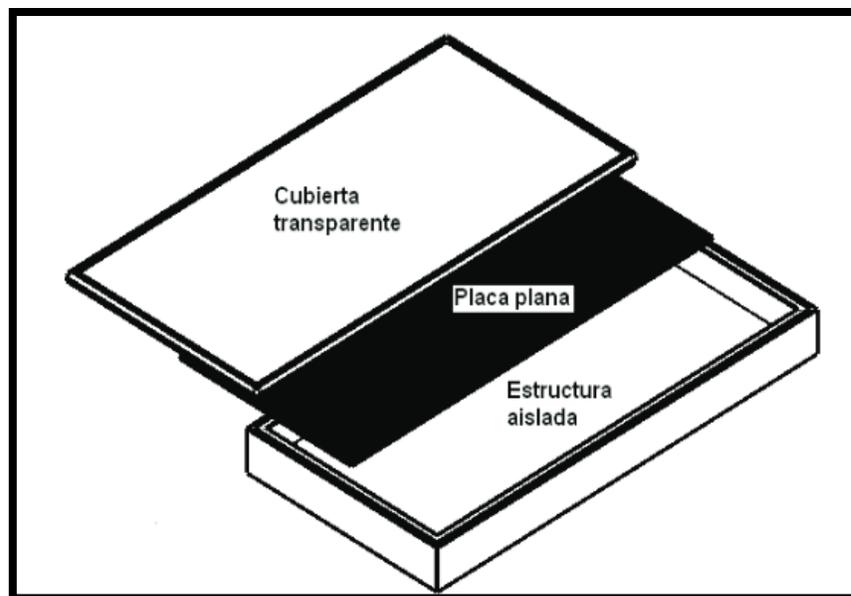


Figura 9. Captador solar de placa plana (Gómez, 2010).

### 6.2.3.1.2 Captador solar de placa plana

Un sistema de secado solar de TI consiste en un CS principalmente CPP y una cabina de secado donde se mantiene el producto a secar, la clasificación de los CPP diferenciando sus principales características térmicas se observa en la figura 10.

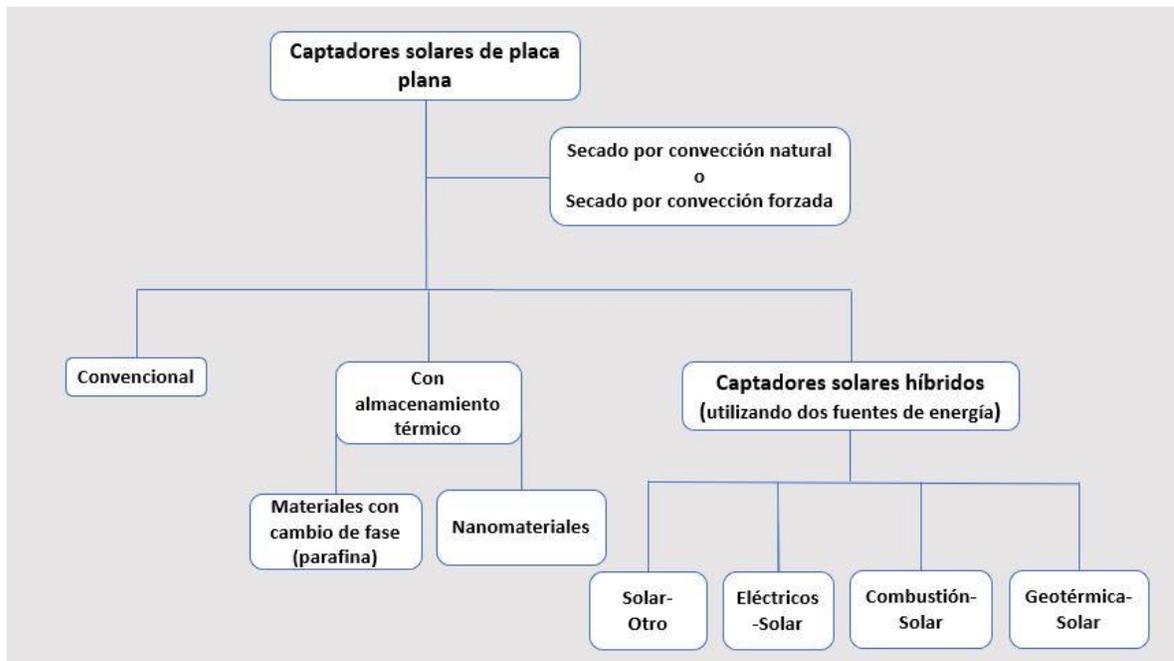


Figura 10. Clasificación de los captadores solares (Fuente propia).

El CPP convencional consiste en una caja de color oscuro con una capa transparente en la cual por un extremo entra aire a temperatura ambiente el cual calienta, mientras que expulsa un flujo de aire húmedo al entorno por otro extremo; en tanto que, la cabina de secado es donde se coloca el producto a deshidratar y se le hace pasar el flujo de aire caliente, con temperaturas que pueden variar de 30 °C a 80 °C como se observa en la figura 11 (Fudholi y Sopian, 2019).

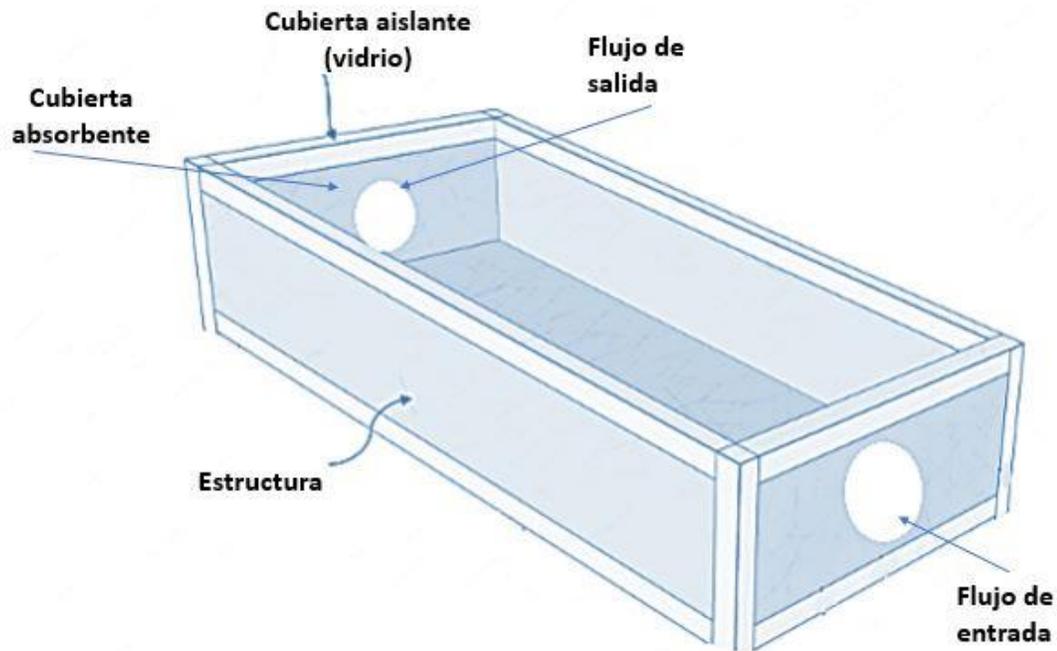


Figura 11. Captador solar de placa plana (Fuente propia).

Los CPP tienen gran aplicabilidad en sectores de la sociedad y se han utilizado ampliamente en todo el mundo debido a su estructura simple, operación confiable, bajo costo, rendimiento favorable, mejor calidad de los productos fotosensibles secos y mayor control de secado comparado con el TD (Lingayat y col., 2017), la principal desventaja es la dependencia de las condiciones meteorológicas, el tiempo de utilización disponible y la ubicación geográfica etc. (El-Hage y col., 2018). Los CPP se utilizan con convección natural y forzada. Los de convección natural, tienen circulación natural del aire debido al efecto de termosifón y los de convección forzada utilizan un ventilador eléctrico o soplador para forzar el aire, dentro o fuera del captador; por lo tanto, es posible controlar la velocidad de secado en este tipo de captador (Fudholi y col., 2015; Arunsandee y col., 2018).



Parikh y Agrawal (2012), realizaron experimentos en un secador de gabinete con convección natural conectado a un captador de placa plana en Jaipur, India, para secar rodajas de chile verde (*Capsicum annuum*) y papa (*Solanum tuberosum*), dónde compararon dos tipos de cubierta (vidrio y policarbonato) de aislamiento en el CPP, con el fin de incrementar la eficiencia del secador, encontraron que la eficiencia (9 % a 12 %) que se tenía, se incrementó hasta 23.7 % con cristal como lámina de cubierta y hasta 18.5 % con lámina de policarbonato; asimismo, encontraron que la cubierta de vidrio disminuyó el tiempo de secado y lo que se reflejó en el aumento de la eficiencia en el secador.

Goud y col. (2019), desarrollaron un CPP para comparar la convección forzada contra la natural para el secado de chile verde (*Capsicum annuum*) con humedad inicial de  $8.39 \text{ kg kg}^{-1}$  peso seco y okra (*Abelmoschus esculentus*) con  $10.12 \text{ kg kg}^{-1}$  peso seco de humedad inicial; donde, en el sistema con convección forzada el flujo de aire fue alimentado con ventiladores que funcionaron con paneles solares fotovoltaicos con una velocidad de aire constante ( $1.8 \text{ m min}^{-1}$ ), demostraron que el sistema con convección forzada redujo la humedad del chile a  $0.01 \text{ kg kg}^{-1} \text{ m.s}$  y de la okra a  $0.12 \text{ kg kg}^{-1} \text{ m.s}$ ; de tal manera que la eficiencia del captador fue de 74.13 % en chile y 78.30 % en okra, con lo que los investigadores concluyeron que en general la convección forzada presenta mejores resultados ya que se obtuvo menor contenido de humedad y mayor eficiencia, aunque la temperatura alcanzada fue mayor en convección natural, debido a un menor recambio de aire.

Lingayat y col. (2017), desarrollaron un CPP con un plato absorbedor corrugado de tipo indirecto para secado de banana (*Musa paradisiaca*) con un área de captación de  $2 \text{ m}^2$ , con inclinación del captador de  $23.5^\circ$  y un promedio de radiación de  $8.3 \text{ kWh m}^{-2}$  en NIT Warangal (India), la eficiencia térmica reportada fue de 31.50 % y 22.38 %, en la cámara de secado; asimismo, López-Vidaña y col. (2020),



realizaron un secado solar de tomate (*Solanum lycopersicum*) en el municipio de Emiliano Zapata, Morelos, México, para su investigación construyeron un CPP en el cual para la cubierta utilizaron una placa transparente de policarbonato en modo convección natural, reportan la eficiencia de secado 4.48 % y la eficiencia del captador solar para calentamiento de aire fue entre 55.45 % y 52.30 %.

Un CPP con doble paso (primario y secundario), implementado en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, México para el secado de alimentos de la dieta del suroeste de México, mostraron que el dispositivo solar alcanzó eficiencias de secado entre 22.8 % para tomate con una radiación de  $7.23 \text{ kWh m}^{-2}$  y 37.9 % para zanahoria con  $5.65 \text{ kW m}^{-2}$ , la incorporación de un segundo captador solar en el dispositivo evaluado demostró ser una estrategia adecuada para mejorar el proceso de secado, manteniendo el sistema simple y económico sin la necesidad de energías no renovables (Camas-Nafate y col., 2019), Tlatelapa-Becerro y col. (2020), desarrollaron secado de hojuelas de tejocote (*Crateagus Mexicana*) con un CPP de 2.14 m x 0.95 m x 0.13 m con un área de captación de  $2.033 \text{ m}^2$ , el tiempo de secado empleado fue de 5 horas, y redujeron la humedad a menos del 20 %.

Otro desarrollo en los CPP son los CPPMCF que cuentan con un almacenamiento de calor en sus materiales durante el día y liberando el calor cuando existe escasa o nula radiación, además se pueden utilizar por un periodo de tiempo mayor como se puede observar en la figura 12 (El-Khadraoui y col., 2017).

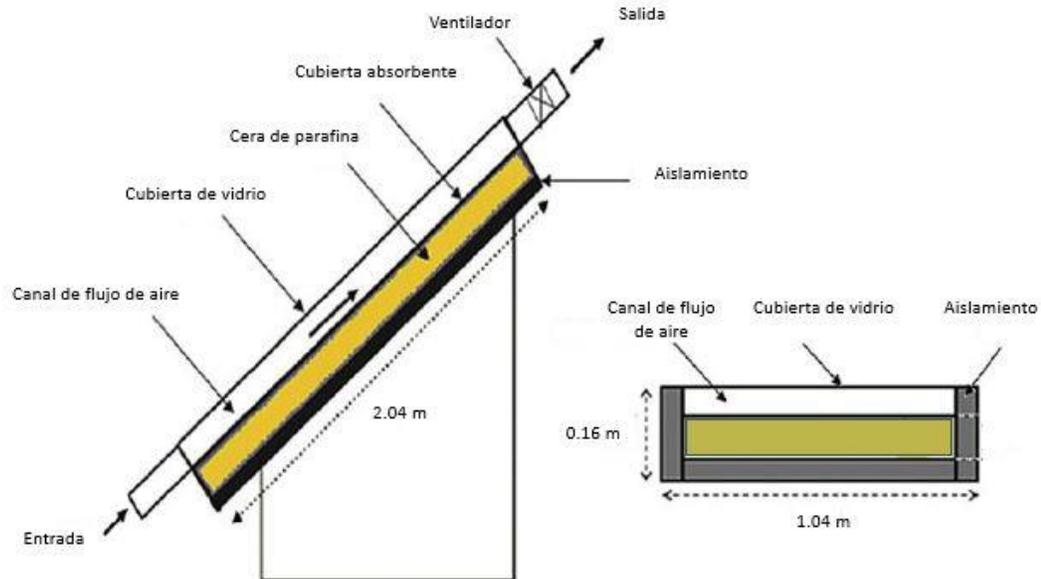


Figura 12. CPP con materiales con cambio de fase (parafina) (El-Khadraoui y col., 2017).

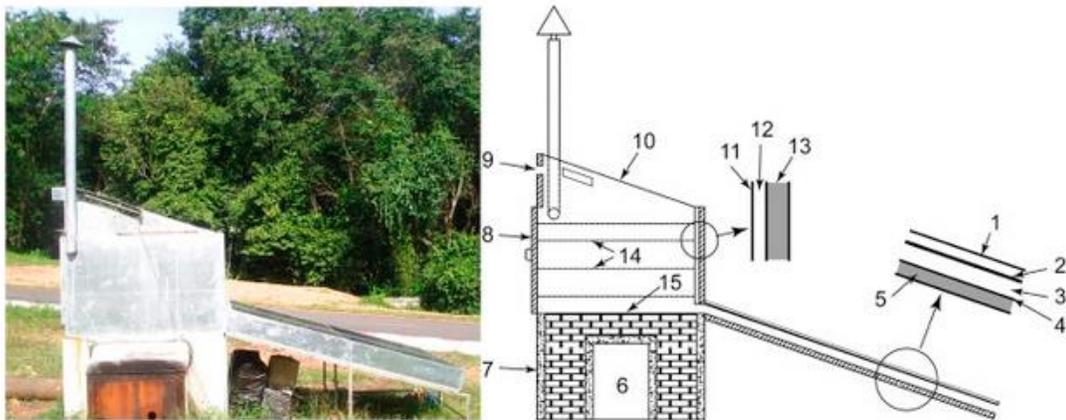
Este tipo de sistemas muestran eficiencias mayores de 45 % a 54 %, en comparación con el sistema convencional debido al almacenamiento. Para lograr el almacenamiento de calor se han utilizado diferentes materiales como cera, parafina entre otros, y se han probado en diferentes ángulos de inclinación.

Estos captadores presentan una reducción de tiempo de secado y calidad aceptable en los productos (El-Khadraoui y col., 2017; El-Sebaii y Shalaby, 2017; Essalhi y col., 2017; Natarajan y col., 2017). Otro tipo de CPP con almacenamiento son los CSN ya que utilizan un almacenamiento auxiliar de calor a través de nanofluidos, estos mejoran la tasa de transferencia de calor desde la placa absorbente al fluido, donde es almacenado el calor y de ahí se realiza la transferencia al punto final. El medio de este fluido puede ser agua o aceite y las

concentraciones de nanofluidos varían debido a la estabilidad que logren (El-Khadraoui y col., 2017; El-Sebaai y Shalaby, 2017; Abuşka y col., 2019; Borode y col., 2019; Charvát y col., 2019; Simonetti y col., 2020; Zhou y col., 2019).

### 6.2.3.1.3 Captador solar híbrido

Un CSH es un CS que utiliza energía solar a través de un CPP y otra fuente de energía eléctrica, combustión, geotérmica, etc. (Torres-Gallo y col., 2017) como se observa en la figura 13 (Tarigan, 2018).



*Figura 13. Captador solar híbrido (solar-biomasa) (Tarigan, 2018) Descripción numérica: 1. Cubierta de vidrio, 2. Cubierta absorbente, 3. Entrada de aire, 4. Cubierta inferior, 5. Aislamiento, 6. Quema de biomasa, 7. Almacenamiento térmico, 8. Puerta de carga, 9. Ventilación, 10. Cubierta de vidrio para cámara de secado, 11. Pared interna, 12. Hueco para calor paso de gas, 13. Pared exterior con aislamiento, 14. Bandejas perforadas, 15. Cubierta inferior para cámara de secado.*



#### 6.2.3.1.4 Captadores solares híbridos con sistema auxiliar de combustión

Los CSH por combustión están integrados por un CPP y una fuente de energía auxiliar calorífica por combustión, de los cuales se disponen de diferentes tipos de biomasa o gas para el proceso de combustión; sin embargo, la elección depende de la disponibilidad, recursos económicos y calidad deseada en los productos, estos tipos de captadores presentan temperaturas del aire en promedio de 42 °C y una eficiencia del 42.2 %, mayor que en el secado de TD, en parámetros meteorológicos similares (Abubakar y col., 2018). Un CSH (solar-biomasa) desarrollado en la región de Ashanti Ghana para desinfección y secado de semilla de maíz (*Zea mays*), consta de un CPP y un horno alimentado por biomasa, fue comparado con un sistema de secado TD y laboratorio; en un periodo de prueba de 7 h obtuvieron en promedio temperaturas para cada sistema de secado de 52.3 °C, 41.4 °C y 30.3 °C, respectivamente; mientras que, la reducción del contenido de humedad fue de 7.7  $kg\ kg^{-1}$  peso seco en el CSH, 5.2  $kg\ kg^{-1}$  peso seco en el sistema TD y en el laboratorio de 2.9  $kg\ kg^{-1}$  peso seco, respectivamente. Demostraron que el CSH es efectivo tanto para el secado y la desinfección de semillas (Bosomtwe y col., 2019).

Rizal y Muhammad (2018), realizaron una intercalación de tiempos de secado con un CSH, donde secaron pescado de la siguiente manera: primero se inició el secado únicamente con el CPP con un horario de 09:00 a 16:00 horas, y se continuó secando con aire caliente, producido por un horno de biomasa de 16:00 a 06:00 horas del día siguiente; la cámara de secado se mantuvo de 40 °C a 50 °C, obteniendo un producto seco en 15 hrs.; además, en condiciones meteorológicas desfavorables este sistema funciona solo con la fuente de energía por combustión (biomasa). Igualmente, Murali y col. (2020), reportaron un CSH energéticamente eficiente adecuado para la operación de secado continuo, utilizando tanque de almacenamiento con agua y gas LP, redujo la humedad de 76.71  $kg\ kg^{-1}$  a 15.38  $kg\ kg^{-1}$  en 6 h, la temperatura del CSH fue de 73.5 °C; donde, el sistema solar



suministro el 73.93 % de la energía térmica y el resto lo aportó sistema de gas LP con el resto.

En general, la fuente de energía complementaria en los CSH, tienen una mayor contribución en la relación de energía calorífica del sistema total, logrando CSH energéticamente eficiente adecuado para la operación de secado continuo; mientras que, la participación de energía solar conduce a la reducción de costos de operación principalmente. Al respecto es importante resaltar que se tiene una ganancia en temperatura lo que genera CSH energéticamente eficiente adecuado para la operación de secado continuo, se pueden alargar los tiempos de uso del secador y se puede secar en condiciones climáticas desfavorables (Rizal y Muhammad, 2018; Murali y col., 2020).

#### **6.2.3.1.5 Captadores solares híbridos con sistema auxiliar de energía eléctrica**

Se ha reportado que los CPP en algunos casos, son asistidos por paneles fotovoltaicos, pero no se clasifican como híbridos debido a que la energía proveniente de estos paneles no se utiliza para generar energía térmica en CPP principalmente (Fudholi y col., 2019), este sistema lo utilizan para generar energía eléctrica, que se emplea en algún componente del secador, aumentando la eficiencia de 12.81 % a 14.41 % para estudios teóricos y experimentales, respectivamente (Fudholi y col., 2019). Sin embargo, este tipo de captadores tienen el objetivo principal de generar electricidad, aunque cumplen dos funciones, en algunos casos se utiliza la energía térmica en secadores tipo *green-house*, pero en CPP no se utiliza para generar aire caliente (Gholampour y col., 2016).

Otra línea de desarrollo de los CPP con uso de paneles fotovoltaicos (PFV) (sistemas combinados) para ayudar a operar los sistemas de secado, ya que la energía obtenida de los paneles fotovoltaicos se utiliza para alimentar los



ventiladores de la cámara de secado con convención forzada o como auxiliar en el abastecimiento de energía para otros componentes. Por ejemplo, un rastreador de sol para aprovechar la radiación solar, el cual logra una rotación del CPP para lograr la mayor captación, se ha reportado un incremento de la temperatura de salida de hasta  $69.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , debido a que el rastreador busca la mejor orientación del CPP para aprovechar la radiación solar, con lo que se logró la reducción del tiempo de secado de un  $16.6\%$  a  $36.6\%$  (Samimi-Akhijahani y Arabhosseini, 2018). García-Valladares y col. (2020), desarrollaron una planta híbrida de monitoreo termo-solar para deshidratación  $288\text{ kg}$  de nopal (*Opuntia ficus*) instalado en Zacatecas, México, establecieron una red de 48 captadores y un sistema solar de calentamiento de agua con 40 captadores de agua, obtuvieron una eficiencia térmica del secador de  $60.7\%$ ; establecieron pruebas por lotes con un sistema de calentamiento solar de aire directo, en el que se deshidrataron  $288\text{ kg}$  de Nopal (*Opuntia ficus*) con un contenido de humedad inicial y final de  $93.03\% \text{ kg kg}^{-1} \text{ m.s}$  y  $5.76\% \text{ kg kg}^{-1} \text{ m.s}$ , respectivamente, el proceso de secado se realizó en  $17.62\text{ hrs}$ . Lo anterior demuestra que la combinación de dos fuentes de energía incrementa la temperatura de secado y disminuyen el tiempo de secado.

## 6.2.4 Sistema de calentamiento auxiliar con energía eléctrica

### 6.2.4.1 Calentamiento por inducción magnética

Los métodos de calentamiento utilizados actualmente, uno de los métodos de calentamiento más eficientes es el calentamiento por Inducción (CPI), el cual tiene características de calentamiento directo al objeto de interés y alcanza de temperaturas superiores a las de la fuente, entre otras (Park y Jung, 2018). El calentamiento por inducción consta de electrodos de corriente de entrada, un sistema alimentador de energía eléctrica, una cámara aislada, dispositivos de manejo de



carga y un sistema de control y regulación (Xue y col., 2018), la principal característica que presenta este método es su alta eficiencia, comparada con otros métodos; por ejemplo, el método de calentamiento tradicional con energía eléctrica presenta un 65 %, el de gas un 55 % y con el de CPI se llega a obtener un 90-95 % de eficiencia; además, la aparición de los modernos dispositivos electrónicos está permitiendo aumentar la frecuencia de funcionamiento, la reducción de costos de los sistemas de CPI.

El desarrollo de patentes en Estados Unidos, Japón y Europa (Zhang y Crisafulli, 2017), llegaron en los años posteriores el uso de CPI a hornos industriales y posteriormente a la introducción de este tipo de sistemas para la cocción de alimentos, dadas sus características de seguridad, limpieza, rapidez de calentamiento y alta eficiencia (Raeber y col., 2020).

#### **6.2.4.1.1 Principios básicos del calentamiento por inducción (CPI)**

El CPI parte de la circulación de corriente de alta frecuencia por una inductancia encargada de generar un campo magnético; con lo que, si la corriente es variable en el tiempo, el campo magnético generado será variable e inducirá un voltaje sobre un material conductor en el cual se inducirán unas corrientes llamadas corrientes de Foucault, que se disiparán como calor por efecto Joule (Fig. 14). La potencia disipada por efecto Joule depende de la frecuencia y del material utilizado (Varsano y col., 2019), este efecto representa su principio de funcionamiento, ya que son las corrientes parásitas las encargadas de generar en el recipiente o la pieza de trabajo, el calor necesario para su calentamiento.

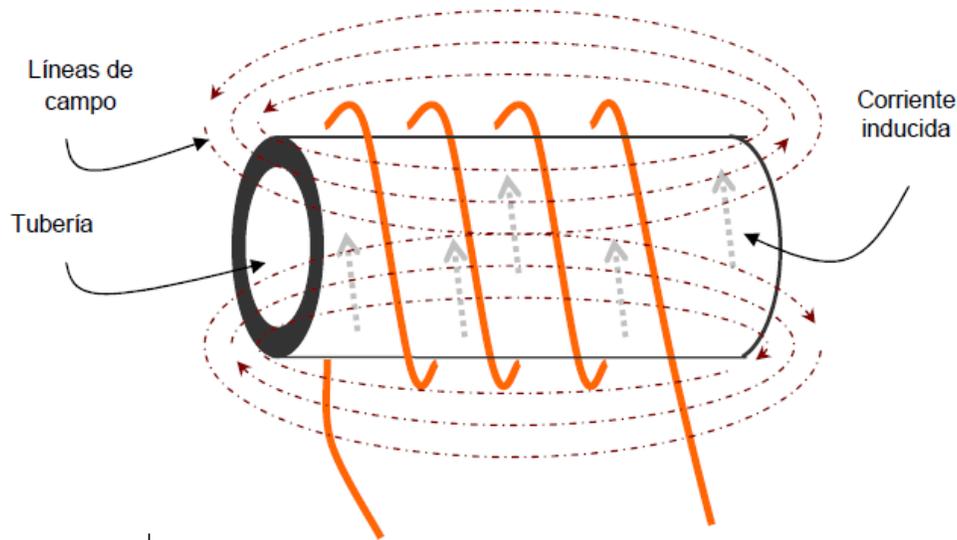


Figura 14. Inducción de corriente en un conductor de electricidad (Varsano y col., 2019).

Los procesos de secado con CPI son utilizados en la fabricación de diversos productos sobre los cuales podemos aplicar la inducción son aquellos que requieren un calentamiento directo o indirecto a través de un elemento metálico. Existen distintos métodos para realizar el proceso de secado como microondas, infrarrojos o resistencias. Sin embargo, la inducción presenta diversas ventajas frente a estos métodos.

Ventajas del calentamiento por inducción:

- Ahorro de energía
- Reducción del tiempo del proceso
- Control de temperatura
- Calor localizado
- Posibilidad de integración en líneas de producción
- Ausencia de contacto



- Mejora del ambiente de trabajo

Las aplicaciones de calentamiento por inducción son muy variadas y se pueden aplicar a procesos como soldadura, fabricación de electrodos de grafito, fundición de vidrio, fundición de esmaltes, almacenamiento de vapor con acumuladores eléctricos de vapor y calentamiento del concreto para acelerar el secado de la colada (Xue y col., 2018; Voigt y col., 2020).

En el caso de secado de alimentos, Ortiz-Hernández y col. (2020), desarrollaron un estudio en semillas de girasol altas en oleico, para comparar las afectaciones que causa el método de secado termo-solar y el secado con inducción electromagnética a bajas presiones. Concluyeron que el método por inducción acorto 2.5 veces el tiempo de secado y se incrementó el coeficiente de expansión volumétrica, reflejado en una reducción de la resistencia al corte, lo que presenta ventajas significativas en la calidad de los productos; por lo que puede ser una opción viable para la industria de secado de alimentos. No obstante, el secado de alimentos por inducción ha sido poco explorado.

#### **6.2.4.2 Calentamiento con resistencias eléctricas (RE)**

Este tipo de calentamiento también es conocido como calentamiento óhmico o de Joule, porque se basa fundamentalmente en la ley de Joule, que describe a una corriente que atraviesa por un conductor y por efectos de la resistencia natural que posee el material conductor se produce calor y actualmente el calentamiento por resistencia tiene un amplio campo de aplicación tanto dentro de la industria alimentaria (Pillajo y Romero, 2015).

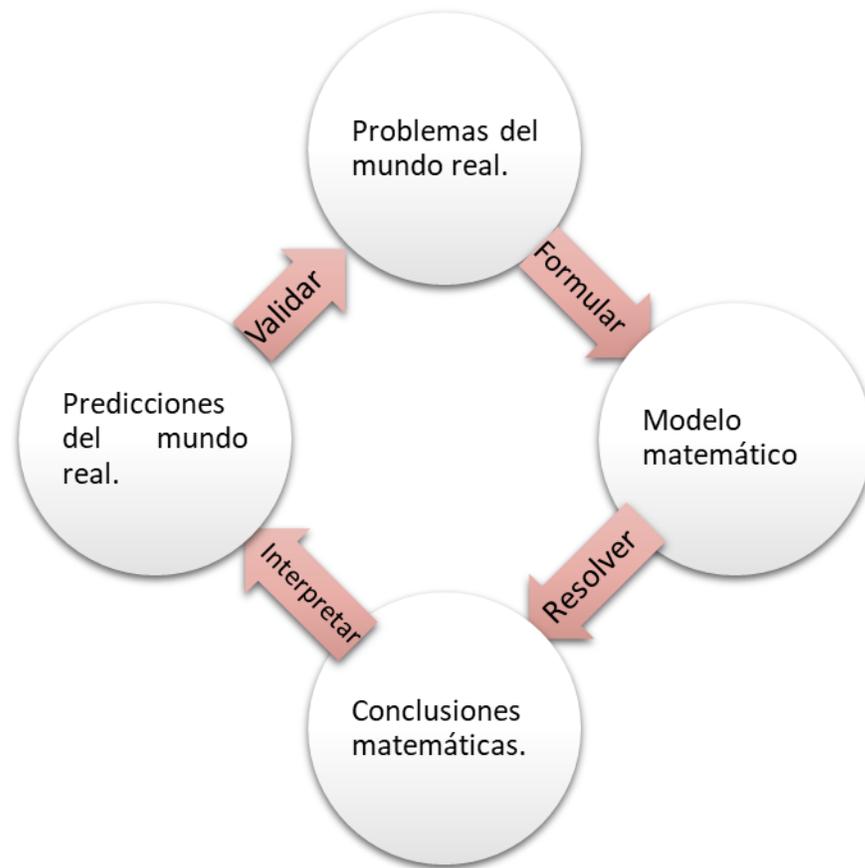
Los fundamentos de la ley de calentamiento de Joule indican que la cantidad de calor producido por una corriente que pasa por un conductor, es proporcional al



cuadrado de la cantidad de corriente que fluye en el circuito, cuando la resistencia eléctrica del cable y el tiempo que fluye la corriente es constante; además que la cantidad de calor producido es proporcional a la resistencia eléctrica del cable cuando la corriente en el circuito y el tiempo que fluye la corriente es constante, este tipo de calentamiento puede ser directo o indirecto. Particularmente el calentamiento de interés es el indirecto debido a que en este sistema no se tiene contacto directo de las resistencias con el objeto a calentar y el calor se transmite por convección, radiación o ambos. Las resistencias que se utilizan pueden ser metálicas, no metálicas, tubulares o blindadas, particularmente las metálicas fabricadas con aleaciones de Ni-Cr, que son ideales para temperaturas bajas de calentamiento (Gonzales, 2009).

### 6.3.1 Modelación

La modelación conforma una representación o abstracción de la realidad, esta modelación se representa a través de un modelo que puede presentar diferentes características o tipos como lo son modelos físicos, gráficos, matemáticos, etc., principalmente los modelos matemáticos son aquellos que intentan describir la realidad en términos matemáticos, puede concebirse como un constructor mental para estudiar y entender un fenómeno en el que subyace una relación causa efecto del tipo  $X \rightarrow Y$  (Brito-Vallina y col., 2011), de igual manera un modelo matemático es como una analogía que estandariza y representa, predice y elabora fenómenos en el mundo (Lehrer y English 2018); también, se puede definir como una ecuación o conjunto de ecuaciones que simulan de manera aproximada la relación estímulo-respuesta de un sistema de reglas semánticas que permiten interpretar el cálculo matemático formal y abstracto como observamos en la figura 15 (Hartmann, 2008).



*Figura 15. Proceso de modelado (Fuente propia).*

Es habitual que los modelos matemáticos sean modelos de analogía incompleta, es decir, que reflejan solamente algunas propiedades del objeto modelado. A la vez, los modelos matemáticos se caracterizan por una suficiente generalidad, describiendo una clase completa de objetos o fenómenos, modelos matemáticos han sido desarrollados en múltiples campos de la ciencia derivados de elementos que utilizan cálculo, el álgebra, la geometría, estadística y otros campos afines. De igual manera, la creación de modelos matemáticos no requiere significativos gastos materiales y la realización del propio proceso de modelación con ayuda de los



modernos medios de cómputo permite efectuarla en un tiempo relativamente pequeño (Plaza, 2016).

La estrategia general de la modelación matemática que aquí se muestra consta de los siguientes pasos:

1. Definición del problema y sus objetivos
2. Definición de la teoría que gobierna el problema
3. Descripción de la situación física en términos matemáticos
4. Solución matemática del modelo.
5. Comparación del modelo con la situación real.
6. Estudio de las limitaciones del modelo.
7. Aplicación del modelo e interpretación de los resultados que ofrece.

### 6.3.1.1 Modelación estadística

La modelación estadística consiste esencialmente en definir herramientas adecuadas para modelar datos observados, teniendo en cuenta su carácter aleatorio; por lo que, es una forma simplificada, de aproximarse a la realidad y hacer predicciones a partir de dicha aproximación, son ampliamente utilizados en las aplicaciones prácticas, para resolver problemas concretos en diferentes áreas y se constituyen en la base de los métodos estadísticos, también es considerada un área de estudio y especialización en la que convergen los aspectos teóricos, metodológicos y computacionales principalmente basados en inferencia estadística, en donde se plantea considerando la medición en una variable explicativa, sobre una unidad de estudio  $u_i$ , que produce una observación  $y_i = Y(u_i)$  (Walpole y Myers, 1999). Esta observación se concibe en dos componentes (señal, ruido, patrón, dispersión), que se denominan genéricamente la parte sistemática ( $f(x)$ ) y la parte



aleatoria ( $e$ ); así entonces, el modelo estadístico se formaliza como se observa en la ecuación 2:

*Ecuación 2*..... $Y_i = f(x_i) + e$

donde  $i$  puede tomar valores de  $1, 2, 3 \dots n.$ , que representa las observaciones sobre un colectivo de estudio ( $U_1, U_2, \dots, U_n$ ), donde la parte sistemática explica la respuesta a partir de las condiciones  $x_i$ , que son a las que sometió a las que se asocia  $U_i$  en el momento de la medición. La parte aleatoria ( $e$ ) se supone que es una variable no observable con distribución probabilística, generalmente asumida como la distribución normal (Hernández, 2021).

Por otra parte, la predicción del comportamiento térmico de los sistemas de secado, mediante modelos matemáticos, generalmente se utilizan modelos de caja negra, que describen correlaciones empíricas (basadas en experiencias o mediciones) (Salat y col., 2017), como son modelos a través arboles de decisiones, redes neuronales artificiales principalmente back-propagation, regresión logística y regresión lineal múltiple entre otros, siendo este ultimo el caso de la utilización de modelos de regresión lineal múltiple que simplifican y eficientizan la predicción y el comportamiento de alguna variable de interés (Ostle, 1973; Kicsiny, 2014; López, 2017).

### 6.3.1.2 Modelos de regresión lineal

Los métodos de regresión lineal estudian la construcción de modelos para explicar o representar la dependencia entre una variable respuesta o dependiente ( $Y$ ) y la(s) variable(s) explicativa(s) o dependiente(s),  $X$  y su estructura (ecuación 3):

Ecuación 3.....
$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$$

En esta expresión estamos admitiendo que todos los factores o causas que influyen en la variable respuesta  $Y$  pueden dividirse en dos grupos: el primero contiene a una variable explicativa  $X$  y el segundo incluye un conjunto amplio de factores no controlados que englobaremos bajo el nombre de perturbación o error aleatorio,  $\varepsilon$ , que provoca que la dependencia entre las variables dependiente e independiente no sea perfecta, sino que esté sujeta a incertidumbre (Cortés y col., 2015).

Una forma de determinar si puede existir o no dependencia entre variables, y en caso de haberla deducir de qué tipo puede ser, es gráficamente representando los pares de valores observados a dicho gráfico se le llama diagrama de dispersión (Fig. 16).

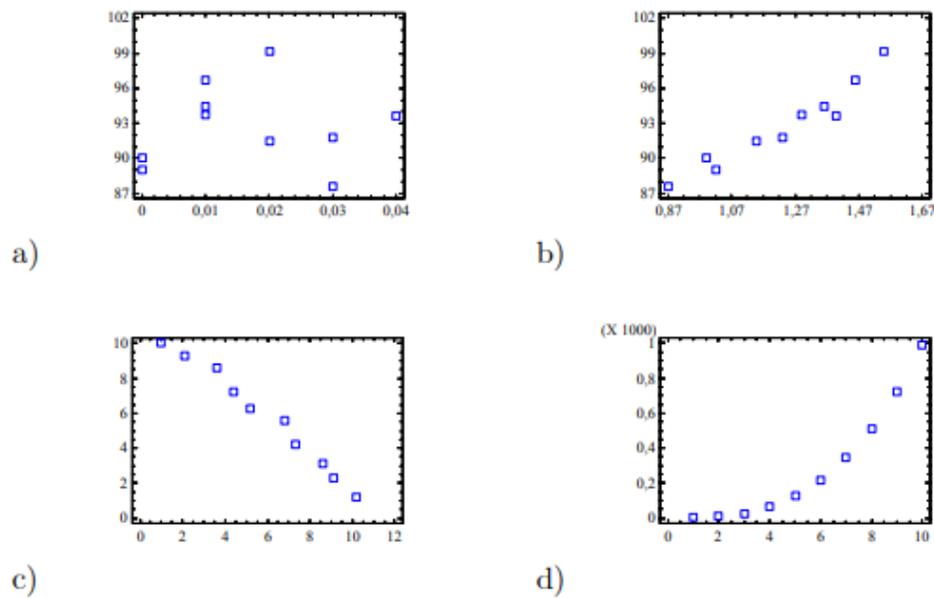


Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.** 16. Diagramas de dispersión en a) hay ausencia de relación (independencia), en b) existe asociación lineal positiva (varían en general en el mismo sentido), en c) existe asociación lineal negativa



(varían en sentido contrario), en d) existe fuerte asociación, pero no lineal (Restrepo y González, 2007).

Para establecer la relación o estimación de los parámetros del modelo se parte de una muestra de valores de **X** e **Y** medidos sobre n individuos (X<sub>1</sub>, Y<sub>1</sub>), (X<sub>2</sub>, Y<sub>2</sub>) ... (X<sub>n</sub>, Y<sub>n</sub>) y se pretende estimar los valores en **Y** según el modelo propuesto en la ecuación 4. Para un valor **X<sub>i</sub>**, el modelo estima un valor en **Y** igual a  $\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 x_i$  y el valor observado en **Y** es igual a **y<sub>i</sub>**, con lo cual el error de estimación en ese caso vendría dado por la ecuación 5:

Ecuación 4..... $\epsilon_i = y_i - \hat{y}_i = y_i - \beta_0 + \beta_1 x_i$

Entonces tomaremos como estimaciones de  $\beta_0$  y  $\beta_1$ , que notamos por  $\hat{\beta}_0$  y  $\hat{\beta}_1$ , aquellos valores que hagan mínima la suma de los errores al cuadrado, que viene dada por la ecuación 6:

Ecuación 5..... $SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_i))^2$

De ahí que al método de estimación se le llame método de mínimos cuadrados. La solución se obtiene por el mecanismo habitual, derivando SSE con respecto a  $\beta_0$  y  $\beta_1$  e igualando a 0.

Los estimadores resultan con las ecuaciones 6 - 8:

Ecuación 6..... $\hat{\beta}_1 = \frac{SS_{xy}}{SS_{xx}}$

Ecuación 7..... $\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x}$

siendo:

Ecuación 8..... $SS_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y} \dots$



*Ecuación 9*..... $SSxy = \sum_{i=1}^n [x_i - \bar{x}]^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - m(\bar{x})^2 = m\sigma_x^2 \dots ($

A la recta resultante  $Y = \beta_0 + \beta_1 X$  se le llama recta de regresión lineal de Y sobre X. Un último parámetro para estimar en el modelo es la varianza de los errores ( $\sigma^2$ ). A su estimador se le denomina varianza residual y viene dada por la ecuación 10:

*Ecuación 10*..... $\tilde{\sigma}_R^2 = \frac{SSE}{n-2} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n-2} = \frac{SSy - \beta_1(SSxy)}{n-2}$

Para este punto los estimadores  $\beta_0 + \beta_1$  depende de la muestra realizada debido a que son variables aleatorias debe presentar una distribución de probabilidad, con lo que se construyen los parámetros de regresión del modelo (Berenson y Krehbiel, 2001).

**6.3.1.3 Regresión lineal múltiple**

El análisis de regresión lineal múltiple nos permite establecer la relación que se produce entre una variable dependiente (**Y**) y un conjunto de variables independientes ( $X_1, X_2, \dots X_n$ ), a diferencia del simple, se aproxima más a situaciones de análisis real puesto que los fenómenos, hechos y procesos sociales, por definición, son complejos y, en consecuencia, deben ser explicados en la medida de lo posible por la serie de variables que, directa e indirectamente, participan en su concreción (Jaume, 2001). La anotación matemática del modelo de regresión lineal múltiple es la ecuación 11:

*Ecuación 11*..... $Y = A + b_1x_1 + b_2x_2 + b_nx_n + e.,$



en donde  $Y$  es la variable para predecir;  $a, b_1x_1, \dots, b_2x_2, \dots, b_nx_n$  son parámetros desconocidos a estimar; y  $e$  es el error que se comete en la predicción de los parámetros.

En el análisis de regresión lineal múltiple la construcción de su correspondiente ecuación se desarrolla eligiendo las variables con la finalidad de buscar de entre todas las posibles variables explicativas aquellas que expliquen mejor la variable dependiente sin que allá combinación lineal de las restantes. Este procedimiento valora la bondad de ajuste de los datos al modelo de regresión lineal y se calculan los parámetros del modelo verificado en dicho paso dejando de preferencia aquellas variables que sean estadísticamente significantes ( $p > 0.05$ ) (Jaume, 2001).

Una vez determinados los parámetros se busca medir la bondad de ajuste de la recta de regresión y el grado de asociación lineal existente de las variables, esto se puede determinar mediante el coeficiente de correlación lineal ya que es una medida adimensional dada por las ecuaciones 12 y 13:

$$\text{Ecuación 12} \dots \dots \dots r = \frac{E[(X-E(X))(Y-E(Y))]}{\sqrt{VAR(X)VAR(Y)}} = \frac{\sqrt{VAR(X)}}{\sqrt{VAR(Y)}} \beta_1$$

y su estimación a partir de datos de una muestra resulta:

$$\text{Ecuación 13} \dots \dots \dots r = \frac{SS_{xy}}{\sqrt{SS_{xy}SS_{yy}}} = \frac{\sqrt{SS_{xx}}}{\sqrt{SS_{yy}}} \beta_1$$

donde  $r$  toma valores entre -1 y 1, entre más se aproxime a 0 indica que no hay relación entre las variables, cuando se acerca en valor absoluto a 1 indica que hay un grado de asociación lineal entre las variables; por último, el signo me indicara si la relación es positiva o negativa, es decir si es positiva las variables tienden a variar en el mismo sentido.



Otro coeficiente de evaluación es el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el cual es la proporción de variabilidad de la variable  $Y$  que queda explicada por el modelo y se expresa en las ecuaciones 14 y 15:

Ecuación 14.....
$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{SSE}{SS_{yy}}$$

Ecuación 15.....
$$R^2 = r^2$$

Este coeficiente toma valores de 0 – 1, y entre más se acerca a 1 mayor será la fiabilidad de las predicciones del modelo.

Sin embargo, estos modelos presentan problemas de multicolinealidad entre las variables predictoras, lo cual podría conducir a una identificación errónea de los predictores más importantes, en la parte sistemática del modelo de regresión tiene varias consecuencias, como la disminución en la magnitud de los coeficientes correspondientes a covariables fuertemente asociadas, razón por lo que esos coeficientes sólo reflejan un efecto parcial o marginal sobre la respuesta, no reflejan los efectos reales de sus correspondientes covariables, otra consecuencia tiene que ver con el hecho de que no hay una única suma de cuadrados que pueda ser adscrita a cualquiera de las covariables altamente asociadas, por lo que no es posible determinar el efecto neto de esas covariables, además del incremento en los errores estándar de los coeficientes estimados, lo que conduce a inferencias menos precisas y por último, con relación a las pruebas de hipótesis, la presencia de alta multicolinealidad lleva a decisiones contradictorias entre las pruebas t y F. (Jadhav y col., 2019; Coa, 2019). El análisis de componentes principales (PCA) es un método que se utiliza de forma intensiva para encontrar la relación entre varios parámetros, evita problemas de multicolinealidad y ayuda a desarrollar modelos de predicción más robustos (Del Valle y Guerra, 2012; Wuttichaikitcharoen y Babel, 2014).



### 6.3.1.4 Análisis de componentes principales.

Análisis de componentes principales es un método estadístico que permite simplificar la complejidad de espacios muestrales con muchas dimensiones a la vez que conserva su información. Supóngase que existe una muestra con  $n$  individuos cada uno con  $p$  variables  $(X_1, X_2, \dots, X_p)$ , es decir, el espacio muestral tiene  $p$  dimensiones. PCA permite encontrar un número de factores subyacentes ( $z < p$ ) que explican aproximadamente lo mismo que las  $p$  variables originales. Donde antes se necesitaban  $p$  valores para caracterizar a cada individuo, ahora bastan  $z$  valores. Cada una de estas  $z$  nuevas variables recibe el nombre de componente principal, las nuevas variables son combinaciones lineales de las anteriores y se van construyendo según el orden de importancia en cuanto a la variabilidad total que recogen de la muestra. De modo ideal, se buscan  $m > p$  variables sean combinaciones lineales de las  $p$  originales y que estén no correlacionadas, recogiendo la mayor parte de la información o variabilidad de los datos (Carmona, 2018).

Se considera una serie de variables  $(x_1, x_2, \dots, x_p)$  sobre un grupo de objetos o individuos y se trata de calcular, a partir de ellas, un nuevo conjunto de variables  $y_1, y_2, \dots, y_p$ , no correlacionadas entre sí, cuyas varianzas vayan decreciendo progresivamente.

Cada  $y_j$  (donde  $j = 1, \dots, p$ ) es una combinación lineal de las  $x_1, x_2, \dots, x_p$  originales, mediante la ecuación 16 y 17:

Ecuación 16..... $y_j = a'_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + a_{jp}x_p = a'_jx...$ (

siendo  $a'_j = (a'_{j1} + a_{j2} + a_{jp})$  un vector de constantes, y

Ecuación 17..... $x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_p \end{bmatrix}$



obviamente, si lo que queremos es maximizar la varianza, una forma simple podría ser aumentar los coeficientes  $a_{ij}$ . Por ello, para mantener la ortogonalidad de la transformación se impone que el módulo del vector  $a'_j$  ( $a'_{j1} + a_{j2} + a_{jp}$ ) sea la ecuación 18:

Ecuación 18.....
$$a'_j a_j = \sum_{k=1}^p a_{kj}^2 = 1_{j1}$$

El primer componente se calcula eligiendo  $a_1$  de modo que  $y_1$  tenga la mayor varianza posible, sujeta a la restricción de que  $a'_1 a_1 = 1$ . El segundo componente principal se calcula obteniendo  $a_2$  de modo que la variable obtenida,  $y_2$  esté no correlacionada con  $y_1$ . Del mismo modo se eligen  $y_1, y_2, \dots, y_p$ , no correlacionada entre sí, de manera que las variables aleatorias obtenidas vayan teniendo cada vez menor varianza.

El razonamiento anterior se puede extender, de modo que al  $j$ -ésimo componente le correspondería el  $j$ -ésimo autovalor. Entonces todos los componentes  $y$  (en total  $p$ ) se pueden expresar como el producto de una matriz formada por los autovectores, multiplicada por el vector  $x$  que contiene las variables originales ( $x_1, \dots, x_p$ ) como las ecuaciones 19 - 21:

Ecuación 19.....
$$y = Ax$$

donde:

Ecuación 20.....
$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_p \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1p} \\ a_{21} & \vdots & \dots & a_{2p} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{p1} & \dots & \dots & a_{pp} \end{pmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_p \end{bmatrix}$$

la matriz de covarianzas de  $y$  será:

Ecuación 21.....
$$\Sigma = A \Lambda A'$$



ya que  $A$  es una matriz ortogonal (*porque*  $a_j a_j = 1$  para todas sus columnas) por lo que  $AA' = I$ .

Los métodos de la regresión sobre componentes principales (PCR) se han utilizado con éxito para analizar datos y mejorar la precisión de los modelos generados con características multivariantes (Chen y col., 2018). La PCR es un método robusto de aprendizaje automático que se ha aplicado ampliamente para obtener modelos de predicción (Luan y col., 2018; Ayinde y col., 2020).

### 6.3.1.5 Regresión sobre componentes principales

En el modelo de regresión lineal múltiple, una de las hipótesis que deben cumplir las variables predictoras es la ausencia de relación lineal entre ellas, como se menciona anteriormente. Sin embargo, es muy frecuente que se presenten ciertas relaciones aproximadamente lineales entre las variables predictoras del modelo, provocando la obtención de estimadores poco precisos e inestables. Por lo tanto, la aplicación de la regresión sobre componentes principales puede evitar estos problemas, a la vez que lleva implícito un procedimiento de selección de variables, reduciendo la dimensión del espacio predictor, este método fue introducido por Kendall en 1975 y en este método, las variables originales se transforman en un nuevo conjunto de variables no correlacionada llamadas componentes principales. Esta transformación clasifica las nuevas variables ortogonales por orden de importancia, es decir, según la contribución que ofrezcan en el modelo, y el procedimiento implica eliminar algunas de dichas componentes para lograr una reducción de la varianza (Deduy, 2019).

Si la matriz  $X$  es centrada y escalada se denota  $X^*$  y la ecuación 22 se establece como:



*Ecuación 22*..... $Y = \beta_0 \mathbf{1} + X^* \beta^* + \epsilon.$

Un conjunto de variables denominadas componentes principales de la matriz de correlación  $X^* X$  se eliminan obteniéndose un efecto sustancial en la reducción de la varianza. El método es superior en estimación y predicción a MCO. Los componentes principales son ortogonales mutuamente lo que permite restarle una cantidad de varianza a cada uno de ellos. Se consideran los autovectores asociados con los autovalores  $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k)$  de  $X^* X$ . Sea  $V = [v_1, v_2, \dots, v_k]$  una matriz ortogonal  $k \times k$  donde la  $j$ -ésima columna el vector  $v_j$  de  $V$  este asociado al  $j$ -ésimo autovalor que verifica  $VV^+ = V^+V = I$  como en la ecuación 23:

*Ecuación 23*..... $Y = \beta_0 \mathbf{1} + W y + \epsilon.$

Donde  $W = X^* V$  es una matriz  $n \times k$  y  $y$  es un vector  $k \times 1$  de coeficientes  $y_1, y_2, \dots, y_k$ ,  $W$  representa a los  $k$  componentes principales.

### 6.3.5.1 Multicolinealidad

La presencia de dependencia lineal entre las variables predictoras es llamada multicolinealidad. Matemáticamente, la dependencia lineal se entiende como el procedimiento para encontrar constantes  $c_j$  no todas cero tales como se muestra en la ecuación 24:

*Ecuación 24*..... $\sum_{j=1}^k c_j x_j = 0.$

Donde los  $x_j$  son las columnas de  $X$ . Este problema usualmente es causado por las restricciones artificiales a que es sometida la muestra, o por el hecho de tener pocas observaciones y muchas variables predictoras (Navarro, 2009).



### Detectando la multicolinealidad

Existen muchas formas de para detectar la multicolinealidad, los métodos más utilizados por los investigadores son:

- Gráfico de dispersión matricial: permite tener una idea acerca de la posible relación lineal entre las variables.
- Matriz de correlación de las variables predictoras: la existencia de algún valor alto próximo a  $\pm 1$  indica que existe una fuerte relación lineal entre las predictoras.
- Análisis de los elementos de la diagonal de la matriz inversa de correlación  $R^{-1}$ , ya que verifica que el  $i$ ésimo elemento de esta matriz es la ecuación 25:

Ecuación 25..... $FIV(i) = \frac{1}{1-r_1^2}$ .

por lo tanto, si  $FIV(i)$  es un valor muy alto si existe multicolinealidad causada por la variable  $x_i$ .

- Calcular los autovalores de la matriz de correlación y verificar el valor de  $\kappa$  o índice de la matriz.

### Eliminación de componentes principales

Los componentes principales de la matriz  $W$  contienen exactamente la misma información que la matriz centrada y escalada  $X^*$  excepto que los datos en esta nueva variable están completamente no correlacionados, propiedad que permite ordenarlos en un rango de acuerdo con la magnitud de sus autovalores (Draper y Smith, 1981). Esta situación ha conducido a proponer métodos para determinar cuántos componentes deben ser removidos del modelo, para lograr una sustancial



reducción en la varianza de los parámetros del modelo. Entre estos métodos los más usados son:

- Descartar componentes asociados a autovalores muy pequeños. Usualmente los componentes son eliminados hasta que el resto de ellos explican algún porcentaje preseleccionado del total de la varianza (generalmente 85%), es decir se seleccionan los  $s$  componentes más grandes que verifican la siguiente ecuación 26:

Ecuación 26..... 
$$\frac{\sum_{j=1}^x \lambda_j}{k} \geq 0.85.$$

- La regla de Kaiser-Gutman: se escogen componentes asociados con autovalores de valor mayores que 1.0 (Navarro, 2009).

### 6.4.1 Generalidades del arándano

El arándano (*Vaccinium spp.*) es una de las frutillas más importantes a nivel mundial, los cuales son nativos de América del Norte y regiones de Europa (Reque y col., 2014; Wei y col., 2020); actualmente, el continente americano es el principal productor de arándanos, acumulando tres cuartas partes de la producción mundial (Hidalgo y Almajo, 2017). La producción de arándanos de arbusto alto ha aumentado enormemente desde finales de la década de 1990, en el año 2014, la producción mundial de esta frutilla fue de 1 177 881 toneladas (FAO, 2017). En ese mismo año los 10 principales productores de arándanos fueron: Estados Unidos (643 557 toneladas), Canadá (358 311 toneladas), Chile (82 000 toneladas), México (18 031 toneladas), Polonia (12 469 toneladas), Alemania (12 077), Francia (9 200), Bielorrusia (8 000), Países Bajos (6 400) y España (5 100), (FAO, 2017), lo que ha llevado a que la producción supere la demanda del mercado en algunas regiones (Strik, 2012); debido a que el consumo se arándanos en el mercado mundial se da



principalmente en consumo fresco, marcado por el 65 % de los volúmenes totales (Moyano y col., 2019).

El arándano es preferido por los consumidores porque es delicioso y nutritivo, ya que cuenta con compuestos bioactivos como ácidos fenólicos, flavonoides y procianidinas (Ben-Lagha y col., 2015); sin embargo, el arándano es especialmente susceptible de sufrir daños mecánicos durante la clasificación, el embalaje, el transporte, el almacenamiento y el procesamiento (Xu y col., 2015), lo que provoca que no siempre sean consumidos en fresco.

#### **6.4.1.1 Antioxidantes**

Los antioxidantes son sustancias que neutralizan los radicales libres dañinos en nuestro organismo. Los antioxidantes actúan como "carroñeros de los radicales libres" y, por lo tanto, previenen o ralentizan el daño causado por estos radicales libres. Su función es la de agente reductor, que en última instancia elimina los radicales libres intermedios y evita que se sigan oxidando al ser ellos mismos oxidados. Varios estudios demuestran que el arándano (*V. corymbosum*), posee, en general, un alto nivel de actividad antioxidante y que está vinculado a los niveles de compuestos polifenólicos como los flavonoides, las catequinas (Fig. 17) y las antocianinas de las frutas; los cuales, han demostrado inhibir la oxidación de las lipoproteínas de baja densidad y de los liposomas en el ser humano (Hangun-Balkir y McKenney 2012).

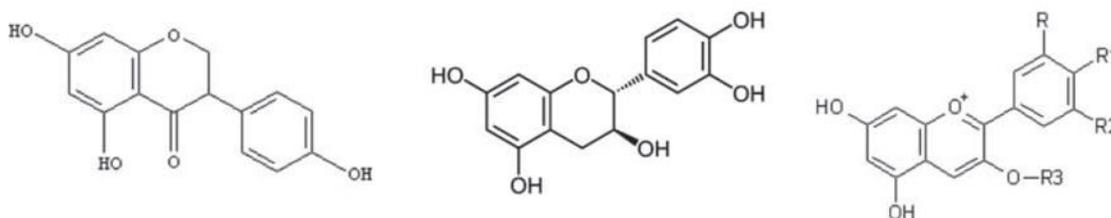
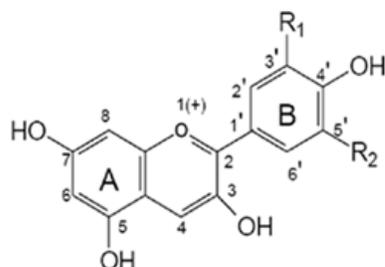


Figura 17. Estructura de compuestos polifenólicos comunes en las frutas (Hangun-Balkir y col., 2012).

## 6.4.2 Antocianinas

Las antocianinas son las formas catiónicas de flavilo. Todas las antocianinas están hidroxiladas en las posiciones 3, 5 y 7, pero difieren en la sustitución del anillo B. Por el fenómeno de deslocalización de electrones, a medida que el número de sustituyentes de la fracción antocianidina aumenta, el color del catión flavilo absorbe a mayores longitudes de onda, desde 520 en la pelargonidina hasta 546 nm en la delphinidina. Por otro lado, la metilación de los grupos hidroxilo promueve un efecto batocrómico, es decir, desplazamiento de la absorción máxima, por tanto, la petunidina y malvinidina absorben a 543 y 542 nm, en lugar de 546 nm en la delphinidina (Dergal y col., 2006).

Son glucósidos de antocianidinas conformadas por dos anillos aromáticos, A y B, unidos por una cadena de tres átomos de carbono como se muestra en la figura 18, variaciones estructurales del anillo B producen las seis antocianidinas conocidas (Garzón, 2008).



Aglicona	Sustituyentes		λ <sub>máx</sub> (nm) Espectro visible
	R1	R2	
Pelargonidina	H	H	494 (naranja)
Cianidina	OH	H	506 (naranja-rojo)
Delfinidina	OH	OH	508 (azul-rojo)
Peonidina	OCH3	H	506 (naranja-rojo)
Petunidina	OCH3	OH	508 (azul-rojo)
Malvinidina	OCH3	OCH3	510 (azul-rojo)

Figura 18. Estructura básica y sustituyentes de las antocianinas (Garzón, 2008).

Además, actualmente se conocen 23 antocianidinas, aunque sólo 6 se encuentran con frecuencia en los alimentos: pelargonidina, cianidina, delfinidina, peonidina, petunidina y malvidina (Castañeda-Ovando y col., 2009). Estos compuestos son inestables y se degradan fácilmente lo que restringe su uso como colorantes naturales. Hay varios factores que intervienen en la estabilidad de las antocianinas: glicosilación/metoxilación, pH, temperatura, luz, oxígeno, ácido ascórbico, dióxido de azufre, enzimas, iones metálicos, proteínas y otros flavonoides (Castañeda-Ovando y col., 2009), como también el procesamiento y almacenamiento de los alimentos (Schwartz y col., 2008). Una de las principales formas de obtener y preservar estos compuestos de interés es a través del secado.



### **6.4.3 Secado de alimentos**

El secado de frutas y verduras es un proceso en el que la eliminación del agua detiene el crecimiento de microorganismos en descomposición, así como la aparición de una reacción de pardeamiento enzimático o no enzimático en la matriz del material (Zhang y col., 2017); preservando así la estructura, las características sensoriales y el valor nutricional del material de partida (Aguilera, 2003), porque las frutas y verduras frescas son productos altamente perecederos (debido a su alto contenido de humedad alrededor del 80 %) que se deterioran en un corto período de tiempo si se manejan incorrectamente (Jayaraman y Gupta, 2006).

Las ventajas que representa el secar un producto respecto al manejo del material original son:

- Se aumenta el tiempo de vida útil del producto.
- Se facilita el manejo del producto.
- Se reduce el espacio de almacenamiento del producto.
- Se reducen los costos de almacenamiento y embarque (Barbosa y Vega, 2000).

#### **6.4.3.1 Secado convectivo**

El secado por convección es la técnica más económica y ampliamente adoptada en la industria alimentaria, aunque requiere largos tiempos de secado y altas temperaturas del aire, en este proceso se calienta el aire y después entra en contacto con la superficie del material húmedo que transfiere calor al sólido principalmente por conducción. El líquido migra luego a la superficie del material y es transportado por convección al aire. El transporte de humedad dentro del alimento



sólido se produce por difusión líquida o de vapor, difusión superficial, diferencias de presión hidrostática y combinaciones de estos (Ahmed y col., 2011).

La mayoría de los materiales húmedos se secan por convección como pueden ser: dispersando soluciones, suspensiones o materiales pastosos finos en una corriente de aire caliente como en el secado por pulverización, secado por combustión pulsada y secado con ondas de choque; soplando aire caliente a través de un material granular húmedo, como en los secadores rotativos, de lecho fluidizado o contactando el material húmedo sólido o particulado con un aire caliente (Kudra, 2012); sin embargo, este tipo de secados requiere un alto aporte de energía debido a la ineficiente transferencia de calor del aire al material y una cantidad significativa de energía perdida con el aire de escape, incluso si su temperatura se acerca a la temperatura de bulbo húmedo. Por lo tanto, la eficiencia energética de los secadores convectivos es de gran importancia, ya que representan aproximadamente el 85% de todos los secadores industriales (Mujundar y Devahastin, 2000).

Uno de los criterios de clasificación de tipos de secadores se basa en la manera de transmitir el calor, fundamentalmente, por convección, conducción y radiación. En el secado convectivo el calor se transfiere al sólido que se está secando mediante una corriente de aire caliente que además de transmitir el calor necesario para la evaporación de agua también el agente transportador del vapor de agua que se elimina al sólido.

#### **6.4.3.2 Secador de bandejas**

La configuración básica de un secador consiste en un sistema que genere aire caliente; el cual puede estar compuesto de un ventilador y de una serie de hilo de resistencias eléctricas para generar calor, también debe de contar con un captador y



un alimentador. Sin embargo, para propósitos educacionales son comunes los secadores sin alimentador ya que las cantidades a deshidratar son menores (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996).

El secador de bandejas se caracteriza por tener una serie de bandejas en donde es colocado el alimento, estas se sitúan dentro de un compartimiento del secador donde se expone al aire caliente y es de los más utilizados.

La industria alimentaria debido a su necesidad continua de los procesos de secado, lo incentiva a buscar formas de reducir los costos eléctricos y buscar alternativas para mantener su competitividad, ya que es uno de los sectores productivos que mayor impacto tiene sobre el medio ambiente, bien sea por sus procesos productivos o por los diferentes productos que salen al mercado.

#### **6.4.3.3 Secado de arándano**

El arándano (*Vaccinium spp.*) es una fruta de temporada que contiene aproximadamente un 85 % de fracción de masa de agua, este elevado contenido de humedad lo hace susceptible al deterioro por crecimiento microbiano, disminuyendo su calidad postcosecha; además, los arándanos son propensos a diversas enfermedades y están expuestos a numerosos contaminantes durante y después de la cosecha, así como en el almacenamiento. La vida útil aproximada de los arándanos cosechados varía entre 7 y 40 días, lo que depende principalmente del genotipo, el método de recolección y las condiciones de almacenamiento (Pobiega y col., 2021), principalmente la temperatura es el factor ambiental más importante que afecta a la calidad del arándano durante el almacenamiento postcosecha (Paniagua y col., 2014; Zhou y col., 2014); por lo cual, el procesamiento de las frutas por secado es una forma de prolongar su vida útil, además de desarrollar nuevos productos disponibles para su consumo en cualquier época del año en forma de frutas



deshidratadas (Reque y col., 2016); además, no afecta el aporte calórico proveniente de la constitución original de frutas y hortalizas, tampoco hay reducción del contenido de minerales, y la pérdida de vitaminas no es mayor a la producida por otros métodos de conservación (Moyle, 1981). Reduce costos de transporte, almacenaje, y manipulación del producto por reducción de peso y/o volumen. También, en algunos casos, esta operación se aplica para conseguir productos más fáciles de utilizar o con un aspecto más atractivo (Telis y Sobral, 2001). Zia y Alibas (2021), realizaron el secado de arándano utilizando diferentes métodos de secado en capa fina, como el secado natural, secado por microondas, secado por convección y secado combinado por microondas y convección. El contenido de humedad de los arándanos inicialmente en  $84.76 \pm 0.20 \% w. B.$  se redujo a  $10.03 \pm 0.9 \% p. B.$  Aunque el tiempo de secado varió de 340 a 3 540 min en el secado por convección, este período se completó entre 64 y 198 min en el secado por microondas, determinaron que el secado por convección, que se completó durante más tiempo, también causó el mayor consumo de energía en comparación con otros métodos de secado, aunque sus parámetros muestran una alta capacidad antioxidante y comprenden varias cantidades de compuestos polifenoles. Martín-Gómez y col. (2020), establecieron una comparación a 3 diferentes temperaturas a 30, 40 y 50 ° C, con el objetivo de obtener jugos con la mayor concentración de compuestos fenólicos y actividad antioxidante. Para predecir cambios en el contenido de humedad versus el tiempo de secado, los resultados se ajustaron a 5 modelos matemáticos para evaluar el mejor ajuste, que es el que tiene el valor más alto del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y los valores más bajos el chi cuadrado reducido ( $\chi^2$ ) y el error cuadrático medio ( $RMSE$ ). El modelo de Page fue el mejor modelo para los procesos de secado a 30 y 50 °C, mientras que, a 40 °C, el mejor modelo fue el modelo de aproximación de difusión. El aumento de temperatura incrementó las absorbancias a 420, 520 y 620 nm del jugo, los valores del contenido fenólico total y la concentración de antocianinas. La actividad antioxidante, aumentó con la temperatura de secado. Los



mejores valores de actividad antioxidante, concentración de antocianinas y parámetros de color se obtuvieron a partir de arándanos secados a 50 °C, siendo el proceso más eficaz en la eliminación de agua.



## VII. MATERIALES Y MÉTODOS

### 7.1 Ubicación

El proyecto se realizó en instalaciones del Instituto Tecnológico de Tlajomulco en las coordenadas 20 ° 26'32 "N 103 ° 25 '14 "W a 1566 m sobre el nivel del mar.

#### 7.1.2 Obtención de datos climatológicos

Se analizaron las variables radiación (R) Watts por metro cuadrado ( $W m^{-2}$ ), temperatura ambiente (TA) en grados Celsius ( $^{\circ}C$ ), estos datos se obtuvieron mensualmente del año 2019 - 2020 y la precipitación (%) y las horas luz se analizaron solo el año 2020, en Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México. Los datos fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua de la estación meteorológica automática (EMA) ubicada en las coordenadas 20 ° 26'32 "N 103 ° 25 '14 "W a 1566 m sobre el nivel del mar, para determinar la viabilidad de la energía solar térmica en la región.

#### 7.2.1 Selección de tipo de captador, materiales y diseño del captador solar híbrido

Se acordaron los siguientes criterios de evaluación, con el cual se definieron las necesidades para el desarrollo de un captador solar de aire basados en el captador solar de placa plana.

Criterios de evaluación:

- Facilidad de manufactura.



- Costo de construcción.
- Desempeño en el calentamiento (elevación de temperatura).
- Funcionamiento en condiciones de cielo nublado (radiación difusa).
- Funcionamiento en condiciones de cielo despejado (radiación directa).
- Eficiencia.
- Facilidad de operación.
- Mantenimiento.

Pesos de cada criterio ( $C_i$ ) se determinaron a través de una matriz de ponderación, donde se comparan los criterios entre sí, para determinar su importancia. La comparación se hizo renglón contra columna donde “1” significa mayor importancia y “0” menor importancia, eliminando la diagonal principal de la matriz puesto que significaría comparar un concepto consigo mismo. Después se suman los resultados de cada renglón y se dividen entre el resultado máximo posible para establecer la medida de importancia o peso ( $P_i$ ) que le corresponde a cada criterio. Los datos se escribirán en el cuadro 2:



**Cuadro 2. Matriz de ponderación.**

	Mantenimiento.	Facilidad de operación	Eficiencia	Funcionamiento en condiciones de cielo despejado (radiación directa).	Funcionamiento en condiciones de cielo nublado (radiación difusa).	Desempeño en el calentamiento (elevación de temperatura).	Costo de construcción.	Facilidad de manufactura.	Total
- Facilidad de manufactura.	1	0	1	1	1	1	0		5/7
- Costo de construcción.	0	1	1	1	1	1		0	5/7
- Desempeño en el calentamiento (elevación de temperatura).	0	0	1	1	1		1	0	4/7
- Funcionamiento en condiciones de cielo nublado (radiación difusa).	0	0	1	0		1	1	0	3/7
- Funcionamiento en condiciones de cielo despejado (radiación directa).	0	0	1		0	1	1	0	3/7
- Eficiencia	1	0		1	1	1	1	0	5/7
- Facilidad de operación.	0		0	0	0	0	1	0	1/7
- Mantenimiento.		0	1	1	1	1	0	0	4/7



Cálculo del factor de importancia se le llamará factor de importancia al número por el cual hay que multiplicar a la suma de los totales para obtener un resultado igual a uno, como se muestra en la ecuación 27

Ecuación 27.....  $fi = \frac{1}{\sum_{i=1}^n Pi}$

donde *fi* es el factor de importancia n es el número de criterios y *Pi* es el peso de cada criterio.

**7.2.2 Matriz de evaluación**

La matriz de evaluación se realizó obteniendo los datos correspondientes a los valores porcentuales de cada criterio, % valor, mediante la multiplicación del peso de cada criterio por el factor de importancia, mediante la ecuación 28:

Ecuación 28.....  $\%valor = Pi * fi * 100\%$ .

después se estableció una escala de calificación de 1 a 3, donde 1 es la menor y 3 la mayor. Las calificaciones se establecieron mediante el número de conceptos a evaluar.

Los resultados de la evaluación se registraron en el cuadro 3 y la selección del tipo de captador se hizo con base en dichos resultados, el captador seleccionado se a través de la matriz de ponderación se presenta en el cuadro 4, la matriz de ponderación con la evaluación correspondiente a cada criterio, el factor de importancia de acuerdo con lo propuesto en la metodología se calculó mediante la ecuación 29.

Ecuación 29.....  $fi = \frac{1}{\sum_{i=1}^n Pi} = \frac{1}{\frac{5}{7} + \frac{5}{7} + \frac{4}{7} + \frac{3}{7} + \frac{3}{7} + \frac{5}{7} + \frac{1}{7} + \frac{4}{7}}$



### Cuadro 3. Resultado de ponderación de factores

Criterio	Valor (%)
- Facilidad de manufactura (FM).	16.7
- Costo de construcción (CC).	16.7
- Desempeño en el calentamiento (elevación de temperatura) (DCT).	13.3
- Funcionamiento en condiciones de cielo nublado (radiación difusa) (FCN).	10
- Funcionamiento en condiciones de cielo despejado (radiación directa) (FCD).	10
- Eficiencia (E).	16.7
- Facilidad de operación (F).	3.3
- Mantenimiento (MN).	13.3

En base a las matrices anteriores se evaluaron 3 tipos de captadores los cuales se evaluaron bajo el criterio antes mencionado para elegir uno. Los captadores evaluados son los siguientes:

- Captador solar parabólico
- Captador solar de placa plana
- Captador solar de placa plana con doble paso.



**Cuadro 4. Comparación de captadores solares.**

<b>Criterio</b>	<b>MN</b>	<b>FO</b>	<b>E</b>	<b>FCD</b>	<b>FCN</b>	<b>DCT</b>	<b>CC</b>	<b>FM.</b>	<b>Total</b>
<b>Captadores</b>									
<b>- Captador solar parabólico.</b>	0	0	1	1	1	1	0	0	4/8
<b>- Captador solar de placa plana.</b>	1	1	1	1	0	1	1	1	7/8
<b>- Captador solar de placa plana de doble paso.</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	8/8



### **7.2.3 Diseño del captador en software CAD**

El diseño del captador se realizó mediante el software Solidworks (2016).

### **7.2.4 Selección del método auxiliar de calentamiento eléctrico**

#### **7.2.4.1 Selección de módulo de calentamiento por inducción**

El módulo adquirido se estableció por su potencia ( $W$ )  $> 1800 W$ , el cual se alimenta con  $53 volts$  ( $V$ ), corriente directa ( $DC$ ) a  $64 Amperes$  ( $A$ ) y el costo del mercado. A dicho inductor se le incorpora una doble bobina de tubo de cobre de  $0.8 mm$  con  $44$  y  $39$  espirales de  $2.5$  pulgadas aproximadamente las cuales son interceptadas por varilla corrugada grado  $42$  de  $1.25$  pulgadas diámetro.

#### **7.2.4.2 Selección de módulo de calentamiento con resistencias eléctricas**

Las resistencias elegidas se establecieron por su potencia máxima  $1800 W$  equivalente al módulo de inducción, las cuales fueron dos resistencias eléctricas de nicromo en tubo aletada con forma de  $U$  con las siguiente dimensiones  $34 cm$  de largo y  $1.9 cm$  de diámetro, con  $45 ohms \Omega$  de resistencia cada una alimentada con  $220 V$  y  $4.89 A$ .

### **7.2.5 Preparación experimental del CSH sin calentamiento auxiliar.**

El CSH se colocó en el Instituto Tecnológico de Tlajomulco, Jalisco, México, con un ángulo de inclinación de  $35^\circ$ . En primer lugar, se realizó una evaluación térmica del CSH sin utilizar fuente de energía auxiliara a la solar, con el fin de evaluar la



eficiencia y la temperatura de salida ( $TS$  ( $^{\circ}C$ )) en un periodo de ocho horas (8:30 – 16:30 horas) en tres flujos de aire ( $F$ ) constantes del CSH (0.3, 2 y 4  $m^3 \text{ min}^{-1}$ ), se registró como salidas  $TS$ ,  $R$ , temperatura ambiente ( $TA$  ( $^{\circ}C$ )), velocidad del viento ( $VV$  ( $km \text{ h}^{-1}$ )), humedad del ambiente ( $H$  (%)) y humedad en el CSH ( $HI$  (%)), así como el tiempo(M), la lectura de estas variables se tomó cada 10 minutos por 10 repeticiones de cada tratamiento, generando un total de 1440 tratamientos. Es importante destacar que, los datos  $R$ ,  $TA$ ,  $VV$  y  $H$  fueron registrados con la estación meteorológica automática (EMA); mientras que,  $TS$  y  $HI$  se obtuvieron con un sensor de temperatura (ASAIR, DHT22) que se colocó en el captador.

### 7.2.6 Análisis de eficiencia térmica

La eficiencia del captador solar de placa plana se estimó sin utilizar el calentamiento por inducción, esto para determinar la eficiencia del CSH utilizando la ecuación 30:

$$\text{Ecuación 30} \dots \dots \dots n = \frac{mc_p(T_o - T_i)}{A_a G_t}$$

donde:  $n$  es la eficiencia,  $G_t$  es irradiancia solar global en el captador solar de placa plana ( $W \text{ m}^{-2}$ ),  $m$  es el grado de flujo constante,  $c_p$  es el calor específico a una presión constante ( $J \text{ Kg}^{-1}^{\circ}C$ ),  $A_a$  es el área de absorción ( $m^2$ ),  $T_o$  temperatura ambiente y  $T_i$  temperatura del aire en la entrada del colector.

### 7.2.7 Diseño y construcción de la cabina de secado

Se definieron las necesidades para el desarrollo de una cabina de secado con condiciones para un volumen de 1  $m^3$  con los siguientes criterios de evaluación:



- Facilidad de manufactura.
- Costo de construcción.
- Desempeño en el calentamiento (aislamiento).
- Peso y movilidad.

### **7.2.8 Control de temperatura para el secador solar híbrido**

Se estableció un control de temperatura ON-OFF (Marca BJ, sensor NTC 10K/3435, modelo Mh1210wm, China) dentro de la cámara de secado para la desactivación del sistema auxiliar de calentamiento.

### **7.2.9 Evaluación térmica del secador solar híbrido con sistema auxiliar de calentamiento por inducción y cabina de secado**

El CSH se colocó en el Instituto Tecnológico de Tlajomulco, Jalisco, México, con un ángulo de inclinación de  $35^\circ$ , se realizó una evaluación térmica del CSH utilizando la segunda fuente de energía (CPI), con el fin de evaluar la temperatura de salida ( $TS$ ) en un periodo de 9:00 – 11:34 horas a un flujo constante de  $1.44 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ , se registró como salidas temperatura de cabina ( $TC$ ),  $R$ ,  $TA$ , temperatura dentro de CSH  $TI$ , así como el tiempo ( $M$ ), la lectura de estas variables se tomó cada minuto. Es importante destacar que, los datos  $R$ ,  $TA$ , fueron registrados con la EMA; mientras que,  $TI$ ,  $TC$  y  $TS$  se obtuvieron con un sensor de temperatura (ASAIR, DHT22) que se colocó en el captador.



### **7.2.10 Evaluación térmica del secador solar híbrido con sistema auxiliar de calentamiento con resistencias eléctricas y cabina de secado**

Se realizó una evaluación térmica del CSH utilizando la segunda fuente de energía (resistencias eléctricas), con el fin de evaluar la temperatura de salida (*TS*) en un periodo de (11:40 – 14:40 horas) a un flujo constante de  $1.44 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ , se registró como salidas temperatura de cabina (*TC*), *R*, *TA*, temperatura dentro de CSH (*TI*), así como el tiempo (*M*), la lectura de estas variables se tomó cada 10 minutos. Es importante destacar que, los datos *R*, *TA*, fueron registrados con la EMA; mientras que, *TI*, *TC* y *TS* se obtuvieron con un sensor de temperatura (ASAIR, DHT22) que se colocó en el captador.

### **7.3 Modelo de regresión sobre componentes principales (PCR)**

El modelo desarrollado para predecir la temperatura de salida del CSH sin la ayuda del sistema auxiliar de calentamiento y determinar la energía térmica que proporciona el sistema en el CSH se alimentó de un 80% de datos experimentales y el 20% se utilizó para validación. El proceso de realización del modelo de predicción de *TS* (MPCR) es el siguiente:

1. Limpieza de datos se realiza para eliminar los valores faltantes.
2. Análisis de correlación del conjunto de datos.
3. Análisis de componentes principales para determinar los componentes que se tomaran para alimentar el modelo por la ecuación 31:

Ecuación 31..... $Z = X A$

donde



Z: matriz cuyo  $(i, k)$ -ésimo elemento representa el valor de la  $k$ -ésima componente principal en la  $i$ -ésima observación.

X: matriz  $(n \times p)$  cuyo  $(i, j)$ -ésimo elemento representa el valor de la  $j$ -ésima variable predictora en la  $i$ -ésima observación.

A: matriz cuya  $k$ -ésima columna es el autovector unitario asociado al  $k$ -ésimo mayor autovalor de  $\frac{1}{n} X' X$ .

4. Se establece el modelo de regresión sobre componentes principales (PCR), se utiliza las variables antes mencionadas como predictoras y la TS como respuesta (Y) mediante ecuación 32 (Sulaiman y col., 2019).

Ecuación 32.....
$$Y = \beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_n Z_n + \varepsilon$$

donde Y es la variable dependiente,  $\beta_0$  es el intercepto,  $\beta_n$  es el coeficiente del componente y  $Z_n$  el PC.

#### 7.4 Secado convectivo de arándano en secador de bandejas eléctrico

Se utilizó arándano variedad (*V. corymbosum*), procedente del municipio de Amatitán Jalisco. La frutilla de arándano se limpió manualmente, con el fin de remover toda materia extraña y suciedad posible, se seleccionaron frutillas maduras, frescas y con características de textura homogéneas con diámetro entre 1.5 cm para su posterior utilización. Inicialmente se determinó la cinética de secado para tres diferentes temperaturas de secado 60, 70 y 80 °C. Se utilizó un secador de bandejas eléctrico por convección de aire caliente escala piloto (Marca POLINOX.S.A.) para el proceso de secado. Las condiciones operativas del secador fueron: temperaturas de cabina 60 °C, 70 °C y 80 °C respectivamente hasta alcanzar un contenido de humedad de  $2.03(\pm 0.04) \text{ kg H}_2\text{O kg MS}$  (Zielinska y Michalska, 2016). La cantidad de



la muestra utilizada en cada experimento se determinó en  $0.5 \text{ kg}$ . Los experimentos se realizaron por triplicado obteniendo un total de 15 corridas experimentales. El secador tiene circulación forzada de aire asistida por ventilador con un flujo de aire de  $0.35 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ . Antes del secado, las muestras se extendieron uniformemente sobre una bandeja de malla metálica como se muestra en la figura 19. La cinética de secado llegó a su fin, cuando la variación de masa fue nula (Sharma y Prasad 2004).



*Figura 19. Bandeja de malla metálica con arándano fresco (Fuente propia).*

## 7.4.1 Análisis fisicoquímicos

### 7.4.1.1 Determinación de humedad

La humedad, se determinó utilizando la metodología de la AOAC 920.151. 2002. Se secó 3 muestras de arándano seco (aprox.  $4 \pm 1$  gramos) a  $105^\circ\text{C}$ , durante 18 horas, controlando el peso antes y después del secado, por triplicado.



### 7.4.1.2 Actividad de agua

La medición de la actividad de agua se llevó a cabo con un medidor de actividad de agua (AQUALAB®, modelo LEER, EE. UU.).

### 7.4.1.3 Índice de higroscopicidad.

El índice de higroscopicidad se realizó de acuerdo con el método modificado propuesto por Fritzen-Freire y col., 2012, 1 g de muestra seca se colocaron en un desecador a 25 °C el cual contenía 100 ml de una solución de HNO<sub>3</sub> (75 % de humedad relativa). Después de 7 días, las muestras se pesaron y el índice de higroscopicidad se calculó utilizando la ecuación 33. El índice de higroscopicidad se expresó como gramos de agua absorbida por cada 100 g de materia seca. Se analizaron las muestras por triplicado y el valor medio se registró.

$$\text{Ecuación 33.....Índice de higroscopicidad} = \frac{(PV+PMF-(PV+PMI))}{24}$$

donde *PV* es el peso del vidrio, *PMF* es el peso final de la muestra y *PMI* es el peso inicial de la muestra.

### 7.4.1.4 pH

El pH se determinó por el método descrito por la AOAC 981.12. Se colocaron 3 g de arándano en tres vasos de precipitados que con 30 ml de agua destilada y se dejaron reposar durante 2 horas, después, se sometieron al proceso de molienda con una batidora (Hamilton Beach modelo 59765) de inmersión durante dos minutos a una velocidad alta posteriormente se utilizó un potenciómetro (HANNA Instruments,



modelo HI2211) para determinar el pH de las muestras, todas las muestras se realizan lecturas por triplicado.

#### 7.4.1.5 Sólidos solubles totales

La medición de los sólidos solubles totales se obtuvo con un refractómetro digital (ATAGO, modelo PAL-3), se colocaron 3 gramos de muestra seca en 30 ml de agua destilada (p/v), esta mezcla permaneció en reposo durante 2 horas, posteriormente se molió con una batidora de inmersión (Hamilton Beach, modelo 59765) durante dos minutos a alta velocidad (12 000 rpm) se filtraron cada uno de los extractos con papel filtro, los valores ajustados se expresan en °Brix (Romano y col., 2011).

#### 7.4.1.6 Contenido de azúcares reductores por método DNS

Se realizó una muestra con 3 g de arándano seco en 30 ml de agua destilada y se dejaron hidratar durante 2 horas a temperatura ambiente se molió con una batidora de inmersión (Hamilton Beach, modelo 59765) durante dos minutos a alta velocidad (12 000 rpm), se filtraron y recuperaron los extractos para posteriormente analizar con reactivo DNS. Para la aplicación del método DNS de Miller se preparó el reactivo DNS, disolviendo 0.8 g de NaOH en agua destilada, luego se adicionaron 15 g de tartrato de sodio y potasio tetra hidratado y 0.5 g de DNS (ácido 3,5-dinitrosalisílico). Esta mezcla se aforó a 50 ml con agua destilada y se almacena en un frasco ámbar a 4 °C. La concentración de azúcares reductores se determinó con la curva de calibración (Fig. 20). Para obtener la curva, se preparó una solución madre 10 g/L de glucosa, posteriormente se realizaron soluciones de 200-1000 mg/L, utilizando glucosa como estándar. A estas soluciones se les aplicó el método DNS y se leyó la

absorbancia de cada una de ellas en un espectrofotómetro (eppendorf, BioPhotometer plus, 22331, Hamburgg, Germany) a una longitud de onda 550 nm.

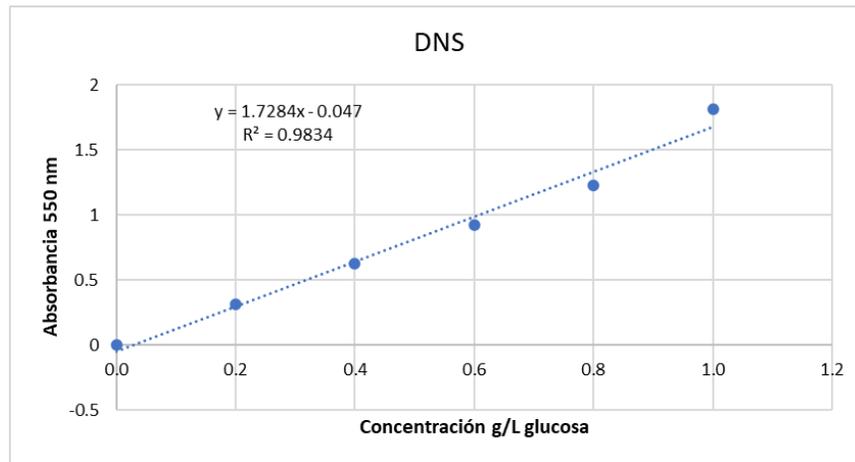


Figura 20. Curva de calibración de azúcares reductores por metodología de ácido dinitrosalicílico (DNS), se utilizó glucosa como estándar (Fuente propia).

Con la curva patrón se realizaron diluciones 1:40 en agua (v/v) de las muestras de los tratamientos, enseguida se aplicó el método DNS a cada una de las muestras, para lo cual se mezclaron 0.5 ml de cada una con 0.5 ml del reactivo DNS, se colocaron a ebullición por 5 min en baño de maría e inmediatamente se detuvo la reacción con baño de agua y hielo. Se reconstruyeron las muestras con 5 ml de agua destilada, se agitaron, se dejaron en reposo por 15 min, y se determinó absorbancia a 550 nm. El mismo tratamiento se realizó para el blanco con agua destilada, leyendo la absorbancia de cada una de las muestras, en la curva patrón se determinó la concentración de azúcares reductores por triplicado (Núñez y col., 2012).



### 7.4.1.7 Determinación de antocianinas por pH diferencial

El método de diferencial de pH descrito por Giusti y Wrolstad se utilizó para determinar el contenido de total de antocianinas monoméricas (TAM) en las preparaciones de arándanos secos, este método se basa en un cambio de color reversible de pigmentos de antocianina monoméricos con una alteración del pH; es decir, la forma de ión oxonio coloreada existe a pH 1.0, y la forma hemiacetal incolora predomina a pH 4.5. La diferencia de absorbancia de los pigmentos a  $\lambda = 520$  nm es proporcional a la concentración de antocianina; los resultados se expresan como equivalentes de cianidin-3-O-glucósido (C3G), ya que C3G es una antocianina común en las bayas. Se emplean dos sistemas de tampón en el ensayo: un tampón de cloruro de potasio, pH 1.0, y un tampón de acetato de sodio pH 4.5. Las muestras secas de arándanos se disolvieron en tampones pH 1.0 y pH 4.5 a partir de un factor de dilución de 1:10. Después de un período de incubación de 15 minutos a temperatura ambiente para permitir un desarrollo óptimo del color, se toman lecturas de absorbancia a  $\lambda = 520$  y 700 nm con un espectrofotómetro UV visible. La absorbancia diferencial de pH se determina de la siguiente manera:

$$Abs = [(Abs_{520nm} - Abs_{700nm})]_{pH1.0} - [(Abs_{520nm} - Abs_{700nm})]_{pH4.5}$$

El contenido de TMA se calculó mediante la siguiente ecuación 34:

$$Ecuación 34.....TMA (mg C3G equiv. L^{-1}) = \frac{Abs * MW * DF * 1000}{\epsilon * l}$$

donde *Abs* es la absorbancia, *MW* es el peso molecular (449.2 g mol<sup>-1</sup>), *DF* es el factor de dilución, *l* es la longitud de la trayectoria (1 cm) y  $\epsilon$  es el coeficiente de extinción molar cianidin-3-O-glucósido (C3G) (26900 L cm<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup>). El contenido de TMA se calcula como miligramos de C3G equivalentes por gramo de producto y por gramo de materia seca (MS). La conversión a gramos de MS se calcula multiplicando los miligramos de equivalentes de C3G por gramo de extracto seco por un factor de



extracción, único para cada conjunto de muestras, que se determina a partir de los gramos de extracto seco por gramo de arándano seco (Arteaga y Arteaga, 2016). Para la preparación del buffer pH 4.5; Se mezclan 32.812 g de acetato de sodio en 980 ml de agua bidestilada para obtener una solución 0.4 M, se agita hasta que se disuelva completamente, posteriormente se agrega HCl concentrado hasta llegar a un pH 4.5 se afora en un matraz volumétrico de 1.0 L; respectivamente para del Buffer pH 1.0 se prepara una solución 0.025 N, que consiste en disolver 1.86 g de KCl en 980 ml de agua bidestilada, se agita hasta disolver completamente, una vez disuelto se agrega HCl concentrado hasta llegar a un pH 1.0, se transfiere a un matraz volumétrico y se afora a 1.0 L. Se toma 1 ml de la muestra mediante una pipeta volumétrica y se agrega a un matraz volumétrico de 10 ml, se afora con el buffer correspondiente. En este caso, el factor de dilución (1/10) fue el adecuado para obtener una absorbancia menor de 1.0. Es importante señalar que la muestra no debe de exceder el 20 % del volumen del buffer. Una vez preparadas las soluciones se dejan reposar durante 15 min para que se estabilicen, posteriormente transcurrido el tiempo, se lee a absorbancias de 520 y 700 nm en un espectrómetro de luz ultravioleta-visible, las absorbancias fueron determinadas en un espectrofotómetro (Eppendorf, BioPhotometer plus, 22331, Hamburg, Germany) usando como blanco agua bidestilada, de preferencia las lecturas se deben de realizar 15 min después, (Skrede, 2000), la concentración de las antocianinas se expresó como mg cianidina-3-glucósido/100ml.

## 7.4.2 Análisis de colorimetría

Las mediciones de color se realizaron con un sistema de visualización de imágenes (Software: Digital color, Apple Inc.), se utilizaron tres muestras de arándano seco (fruto), una por cada tratamiento que se realizó para fotografiar tres puntos de cada arándano tomando en cuenta la parte superior, inferior y lateral de la superficie de



cada una de las muestras. Las fotografías fueron analizadas por triplicado y los resultados de los parámetros de luminosidad ( $L^*$ ), y color ( $a^*$ ,  $b^*$ ) se dividieron en categorías. La saturación  $C^*$  es obtenida por la ecuación 35 la cual depende de la concentración de los colorantes o pigmentos.

*Ecuación 35. saturación de color*..... $C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$

Las diferencias de color (E) correspondientes a cada una de las muestras son descritas en la ecuación 36 (Mezquitillo Bocanegra y col., 2014).

*Ecuación 36. Diferencias de color*..... $\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$

### 7.4.3 Análisis sensoriales

La escala utilizada es la prueba de preferencia con escala hedónica de 9 puntos (Drake, 2007), es una escala bipolar, donde a los panelistas se les pide evaluar muestras codificadas de varios productos, indicando cuanto les agrada cada muestra, marcando una de las categorías en la escala, que va desde "me gusta extremadamente" hasta "me disgusta extremadamente", cabe resaltar que la escala puede ser presentada gráfica, numérica o textualmente, horizontal o verticalmente y se utiliza para indicar las diferencias en gusto del consumidor de los productos (Clark y col., 2009). En esta escala es permitido asignar la misma categoría a más de una muestra (Watts y col., 1989), las muestras se presentan en recipientes idénticos, codificados con letras aleatorias del abecedario de un dígito y el orden de presentación de las muestras puede ser aleatorizado para cada panelista o de ser posible, balanceado.

Las variables para analizar son las siguientes:



- Sabor
- Color
- Textura

#### **7.4.4 Evaluación energética y comparación del secado de arándano entre un secador solar híbrido y un secador de bandejas**

##### **7.4.4.1 Secado de arándano en un secador solar híbrido y un secador de bandejas eléctrico**

Las condiciones operativas de ambos secadores fueron 70 °C de entrada ya que fue la temperatura determinada como óptima, con un tiempo de secado de 12 horas. La cantidad de la muestra utilizada en cada experimento se determinó en 0.5 kg. Los experimentos realizados por duplicado obteniendo un total de 4 corridas experimentales. El secador de bandejas eléctrico tiene circulación forzada de aire asistida por ventilador con un flujo de aire de  $0.35 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$  y  $5.1 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$  para el secador solar híbrido.

##### **7.4.4.2 Evaluación energética del secado de arándano en un secador solar híbrido y un secador de bandejas eléctrico**

Se determinó el tiempo de precalentamiento (70 °C) para ambos secadores en base a la ecuación 37:

*Ecuación 37.....TC = A – B*



donde  $TC$  es el tiempo de precalentamiento de la cabina de secado hasta llegar a  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $A$  es la hora de inicio del calentamiento.  $B$  es la hora a la que se llegó a la temperatura establecida ( $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Se determinó el tiempo de trabajo en porcentaje para ambos secadores a los cuales se monitoreo el uso de energía eléctrica durante un tiempo de secado de 12 hrs., y se determinó el porcentaje de trabajo mediante la ecuación 38:

*Ecuación 38*..... $TT = (TS - Tt) / Ts * 100$

donde  $TT$  es el porcentaje del trabajo de las resistencias eléctricas en un tiempo de trabajo de 12 hrs.,  $TS$  es el tiempo total de secado (12 hrs.) y  $Tt$  es el tiempo promedio del trabajo del sistema auxiliar de calentamiento (resistencias eléctricas).

Por último, se determinó el costo energético para ambos secadores mediante las siguientes ecuaciones 39 y 40:

*Ecuación 39*..... $W = 2 * V_{L-N} * I_{AC} * FP$

donde  $W$  son el consumo de Watts por hora,  $V_{L-N}$  es el voltaje suministrado,  $I_{AC}$  es la corriente bifásica y  $FP$  es el factor de potencia:

*Ecuación 40*..... $Ce = W * TT * TS * CKW$

donde  $Ce$  es el costo total de secado,  $W$  son los watts que consume el equipo por hora,  $TT$  es el porcentaje de trabajo del secador en un periodo de secado,  $TS$  es el tiempo total del secado (horas) y  $CKW$  es el precio por  $\text{kW h}^{-1}$  establecido para una línea de uso comercial por parte de la Comisión Federal de Electricidad.



## 7.5 Análisis estadístico

- Se realizó un análisis estadístico descriptivo para conocer los parámetros de comportamiento de las variables climatológicas de interés para el estudio de factibilidad.
- Un análisis de varianza ( $p < 0.05$ ) de los resultados experimentales de las variables de estudio, se realizó para establecer las diferencias entre tratamientos e interacciones entre variables que afectan la TS del CSH.
- Asimismo, se realizaron predicciones con el modelo obtenido para validación, donde el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), valor de Fc ( $p \leq 0.05$ ) de las variables independientes. Por otra parte, el desempeño de estos modelos se obtuvo mediante índices estadísticos con validación cruzada con un 20 % de los datos, como la raíz cuadrada del error medio del sesgo el *RSME* y el error absoluto medio (MAE), con las siguientes ecs. 41 y 42 (Douglas y col., 2009):

Ecuación 41.....
$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (Xe_i - Xp_i)^2}$$

donde *RMSE* es la raíz cuadrada de la media del error; *n* es el número de pruebas,  $Xe_i$  es el resultado experimental de la temperatura de salida del CSH y  $Xp_i$  es el resultado de temperatura de salida de MPCR.

Ecuación 42.....
$$MAE = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (|Xe_i - Xp_i|)$$

donde *MAE* es el error medio absoluto; el resto de los símbolos indica lo mismo que en la ecuación 41.

El *RMSE* es un indicador del desempeño de un modelo en un periodo de tiempo dado y su valor es siempre positivo; mientras que el *MAE* proporciona información del comportamiento a largo plazo de las correlaciones, lo que permite una comparación de la desviación real entre los valores pronosticados



y medidos, término a término en ambos casos, el cero es ideal (Wang y Lu, 2018).

- El procesamiento de datos se realizó en el software Minitab 18 (2018).



## VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 8.1 Análisis climatológico de la región Tlajomulco de Zúñiga para el uso de energía solar

La radiación solar que se presentó en la región durante el año 2019 fue relativamente menor ( $677 \pm 104.7 \text{ W m}^{-2}$ ) que los  $698.26 (\pm 85.84) \text{ W m}^{-2}$  del año 2020. Aunque, la distribución de la radiación no fue uniforme, ya que en 2019 el valor promedio mensual máximo fue  $826.24 \text{ W m}^{-2}$  en el mes de mayo y el menor se tuvo en diciembre ( $533.11 \text{ W m}^{-2}$ ); mientras que, en el 2020 el valor promedio mensual máximo se presentó en abril ( $838.96 \text{ W m}^{-2}$ ) y en enero hubo  $546 \text{ W m}^{-2}$  (Figs. 21 y 22). Este comportamiento se puede explicar por dos razones, la primera es la declinación solar, debida a la posición del planeta durante su movimiento de traslación, que en primavera tiene un ángulo cercano a cero, por lo que en el hemisferio norte podría existir un mayor tiempo de radiación; en el invierno el ángulo de declinación es aproximadamente de  $23^\circ$ , lo que se traduce en el hemisferio norte en días más cortos y noches más largas (Diez y col., 2019). La segunda, podría ser la nubosidad que se presenta durante el año, lo que provocaría cambios en la radiación en los diferentes meses (Parreño y col., 2020). La temperatura ambiente fue en promedio de  $25 (\pm 2.49) ^\circ\text{C}$  para el año 2019, siendo similar a la que se presentó en el 2020 ( $25.09 \pm 2.49 ^\circ\text{C}$ ). La máxima mensual normal en el año 2019 se tuvo en el mes de mayo ( $29.39 ^\circ\text{C}$ ) y la mínima normal en enero ( $21.11 ^\circ\text{C}$ ). En cambio, en el año 2020, la temperatura mensual máxima normal fue en abril ( $28.93 ^\circ\text{C}$ ) y la mínima normal en enero ( $20.81 ^\circ\text{C}$ ). Lo anterior refleja un comportamiento normal en la radiación y temperatura, lo que significa que la utilización de la energía solar es viable por los parámetros presentados en la literatura (Ulloa y col., 2011: IRENA, 2016).

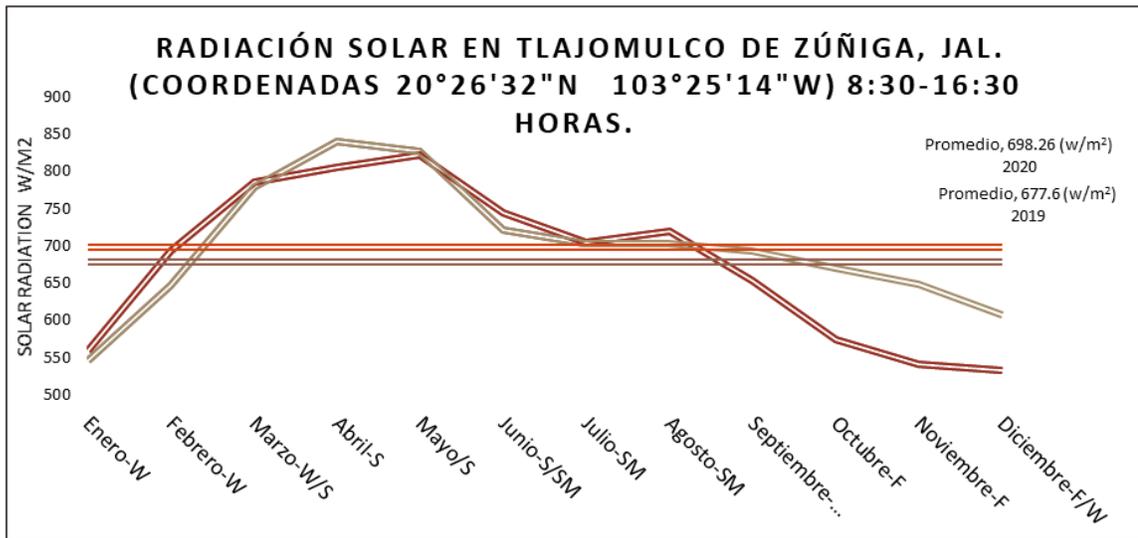


Figura 21. Radiación solar en Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México. (Invierno(W), Primavera (S), Verano (SM), Otoño (F)) (Fuente propia).

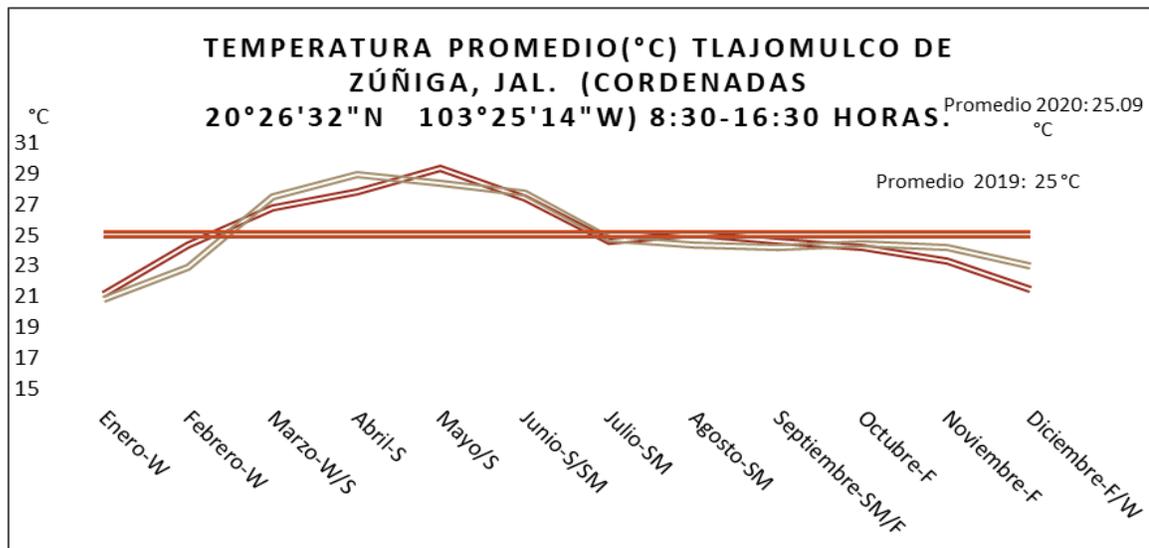


Figura 22. Temperatura ambiente en Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México. (línea azul, año 2020, línea naranja, año 2019, línea amarilla, promedio 2019, línea verde, promedio 2020), (Invierno (W), Primavera (S), Verano (SM), Otoño (F)) (Fuente propia).

Respecto a la precipitación la temporada con más lluvia duró *3.8 meses* (6 de junio a 30 de septiembre), con una probabilidad de más del *40 %* de que sea un día lluvioso en estos *3.8 meses*. La probabilidad máxima de lluvia fue del *80 %* el día 9 de julio y el comportamiento en el transcurso del año, como podemos observar en la figura 23.

Otro factor importante son los días luz, los cuales, establecen las horas que podemos utilizar la energía solar, obteniendo en promedio *12.04(±0.9) horas luz* y podemos observar su comportamiento a lo largo del año en la figura 24.

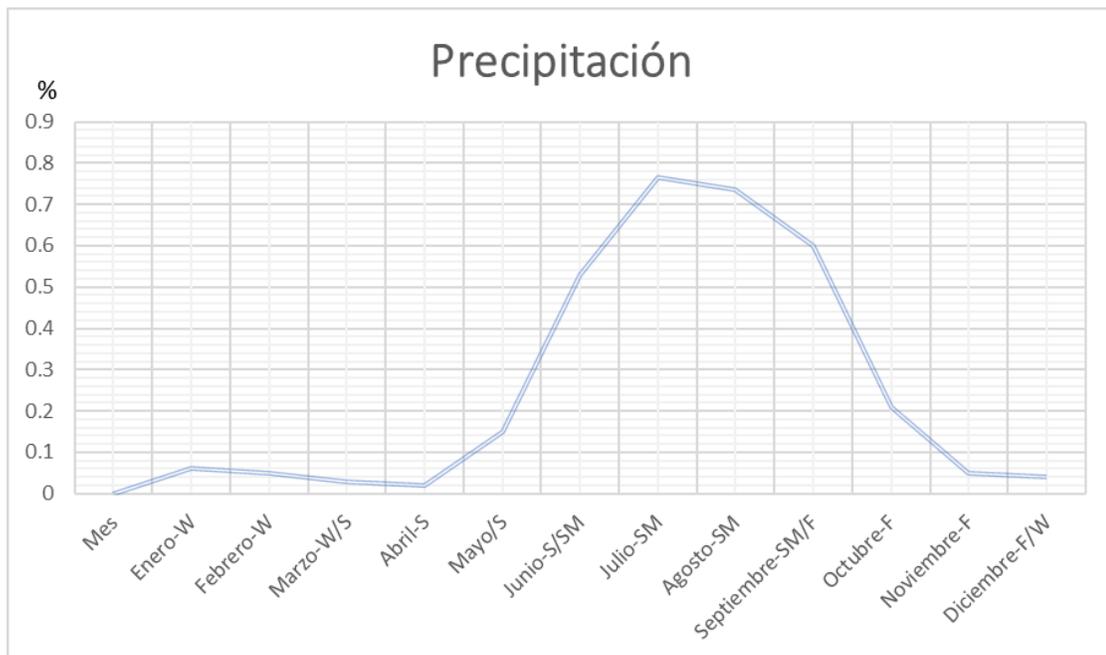


Figura 23. Precipitación en Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México, (Invierno (W), Primavera (S), Verano (SM), Otoño (F)) (Fuente propia).

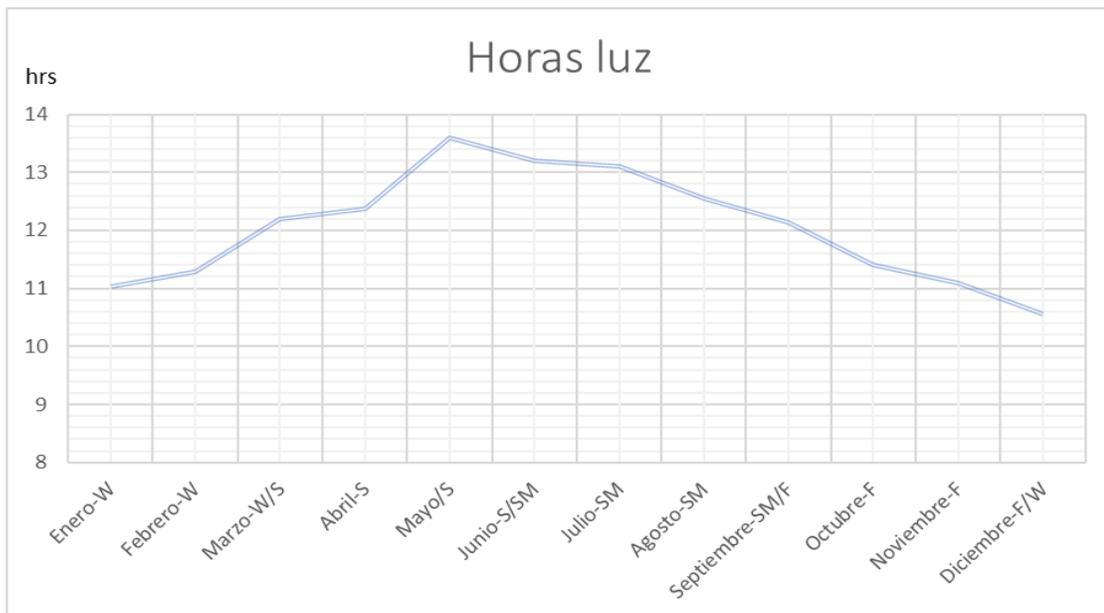


Figura 24. Horas luz in Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México, (Invierno (W), Primavera (S), Verano (SM), Otoño (F)) (Fuente propia).

El análisis descriptivo realizado en Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México, muestran que el uso de energía solar es viable debido a su ubicación geográfica y condiciones meteorológicas principalmente por la radiación solar disponible similar a lo reportado por estudios realizados en la ZMG y partes del país (Almanza y col., 1997; González y col., 2010; Ulloa y col., 2011; Ulloa, 2017). A diferencia de fuentes de energía como los combustibles fósiles, que dependen de recursos limitados y generan impactos ambientales desfavorables, la energía solar se recibe de manera natural, ilimitada, gratuita y su utilización tiene un enfoque sustentable, lejos de ser una opción ingenua y poco costeable, la energía solar es una de las pocas opciones realistas (Martínez, 2009; Solar, 2020); por lo que, el aprovechamiento de la energía solar desempeña una participación fundamental en el desarrollo de la industria alimentaria, destacando que es una producción más económica comparada con la energía eléctrica (Guzmán y col., 2016). esto a la vez suscita la búsqueda y



desarrollo de tecnologías de aprovechamiento de energía solar, logrando reducir los costos productivos por la industria, particularmente la industria alimentaria en procesos de alto consumo energético como los procesos de secado y a la vez aportando a la sustentabilidad del planeta tierra (Díaz y Guerrero, 2017).

## 8.2 Diseño y construcción del CSH

El captador solar híbrido solar-eléctrico se diseñó con un sistema auxiliar de calentamiento eléctrico (SAC), que se integró con un CPP de doble paso y un sistema de CPI o resistencias eléctricas para calentamiento que utiliza EE. De tal manera que, se suministra aire a temperatura ambiente al CSH, el cual se filtra en la entrada para evitar la acumulación de material bacteriano y particulado dentro del mismo. Dentro del CPP se colocó el intercambiador de calor generado por el SAC.

Asimismo, el CPP consta de dos pasos de aire, con lo que se buscó mayor permanencia del aire dentro del captador y crear una turbulencia, que después se dirige hacia la salida por un canal aislado a una profundidad del gradiente de temperatura requerido, para lo cual se utiliza un extractor radial para mantener el flujo másico necesario y liberarlo en la cámara de secado como podemos observar en la figura 25.

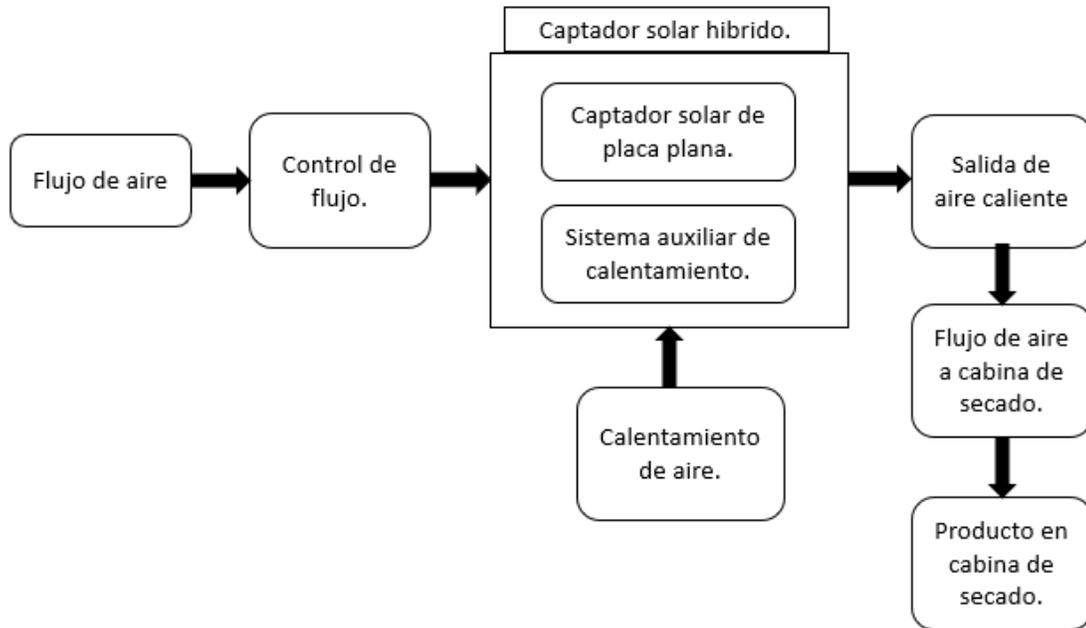


Figura 25. Diagrama de flujo del CSH (Fuente propia).

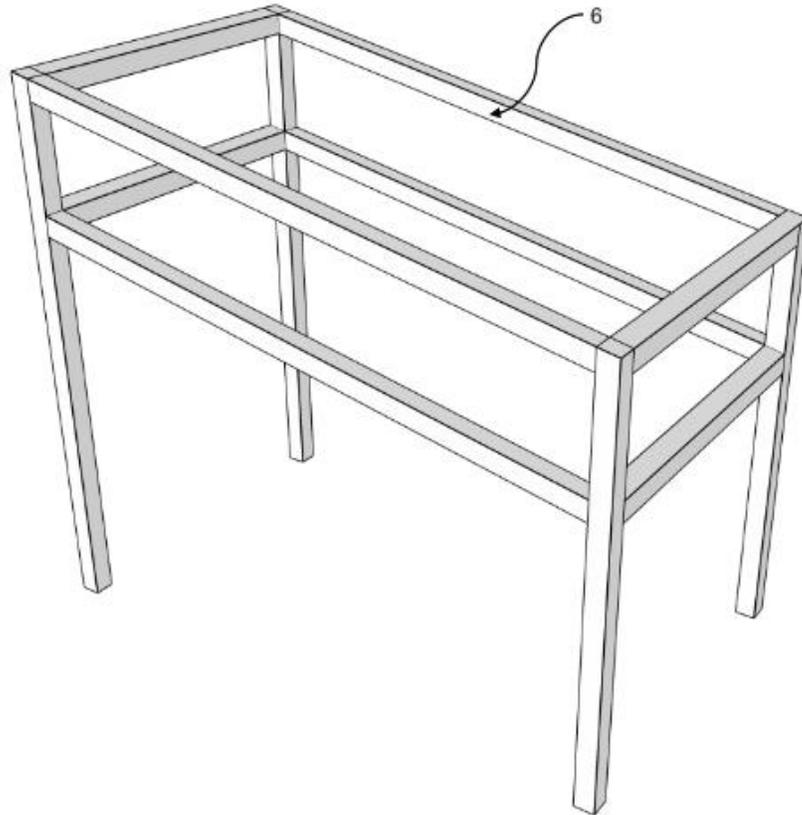
Como se puede observar el diseño en las figuras 26 - 31 y la construcción en las figuras 32 - 39, la descripción del diseño consta de CPP con las siguientes características: (1) abierto en su parte superior, configurado y elaborado de materiales resistentes a temperaturas de alrededor de  $1\ 370$  a  $1\ 400$  ° C; con una pared divisoria interna (7) divide parcialmente en dos al CPP (1); donde la pared divisoria interna (7) tiene la misma altura que tiene el contenedor (1), pero una menor longitud, y se fija verticalmente en la parte central del fondo del captador (1), pero haciendo contacto perpendicular solamente con una de las paredes verticales del captador solar de placa plana (1) para dejar un estrecho libre entre el extremo libre de la pared divisoria (7) y la pared opuesta a la pared que hace contacto de la pared divisoria (7); de tal manera que se conforman un canal en forma de una “U”, por donde circula el aire a calentar; el sistema auxiliar de calentamiento (12)



convencional, se colocó externamente al captador solar de placa plana (1); donde el SAC se introducen horizontalmente al interior del CPP (1) atravesando la pared opuesta a la pared donde hace contacto la pared divisoria (7), quedando cada barra o resistencia eléctrica (13) alojada en un canal de circulación del CPP.

Cuenta con un cristal transparente (11) que cierra herméticamente la parte superior abierta del CPP (1), un túnel en forma de una “U” dentro del CPP (1), conformado por el canal en forma de “U” tapado por el cristal transparente (11), por donde fluye el aire a calentar; la entrada del aire a calentar (8) conecta a uno de los extremos del CPP en forma de “U” con el exterior, donde la entrada (8) se provee hacia uno de los extremos de la pared que hace contacto con la pared divisoria para generar turbulencia y homogenización de la temperatura (7), el flujo es introducido por un extractor (SOLER PALAU, 5HXM-200) y una salida de aire caliente (10) se provee en el otro extremo del túnel “U”, la cual se ubica hacia el otro extremo de la misma pared donde hace contacto la pared divisoria (7); y de este punto se conecta una estructura metálica (6) configurada para sustentar al CSH (1) con todos sus componentes, la estructura del CSH está fabricado con una primera placa aislante térmica (3) elaborada de un material aislante de fibra de carbono, presenta una conductividad térmica de  $0.04 W K^{-1} m^{-1}$  a  $24\text{ }^{\circ}C$ , una segunda placa aislante térmica (4) adherida en cada cara plana de la primera placa aislante térmica (3), elaborada de MDF, con una conductividad térmica de  $0.04 W K^{-1} m^{-1}$  a  $24\text{ }^{\circ}C$ , una placa protectora (5) adherida en cada cara plana del emparedado formado con las placas aislantes térmicas (3 y 4); la placa protectora de acero inoxidable (5) resistente a la corrosión y tiene una temperatura de fusión de alrededor  $1\ 370$  a  $1\ 400\text{ }^{\circ}C$ .

El CSH está cubierto en su interior con un revestimiento de pintura negra para captar la radiación y mantener el calor dentro de dicho contenedor (1), este captador alimenta a través de una manguera térmica a la cámara de secado donde se coloca el producto a secar (15).



*Figura 26. Estructura del CSH (Fuente propia).*

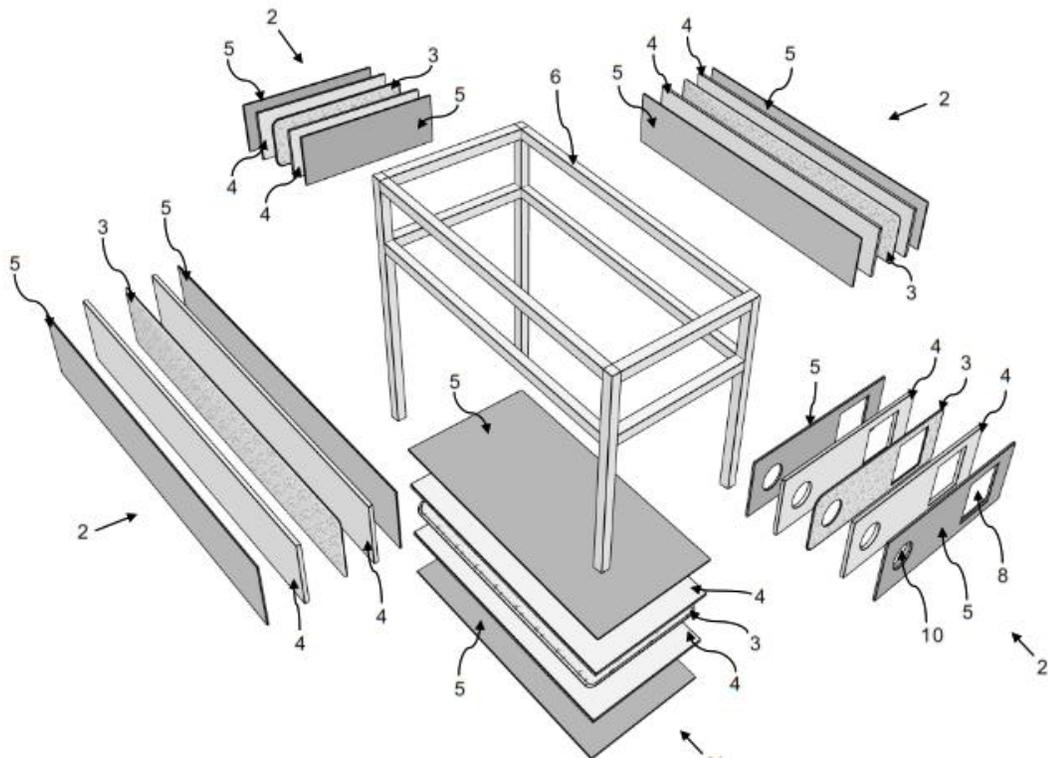
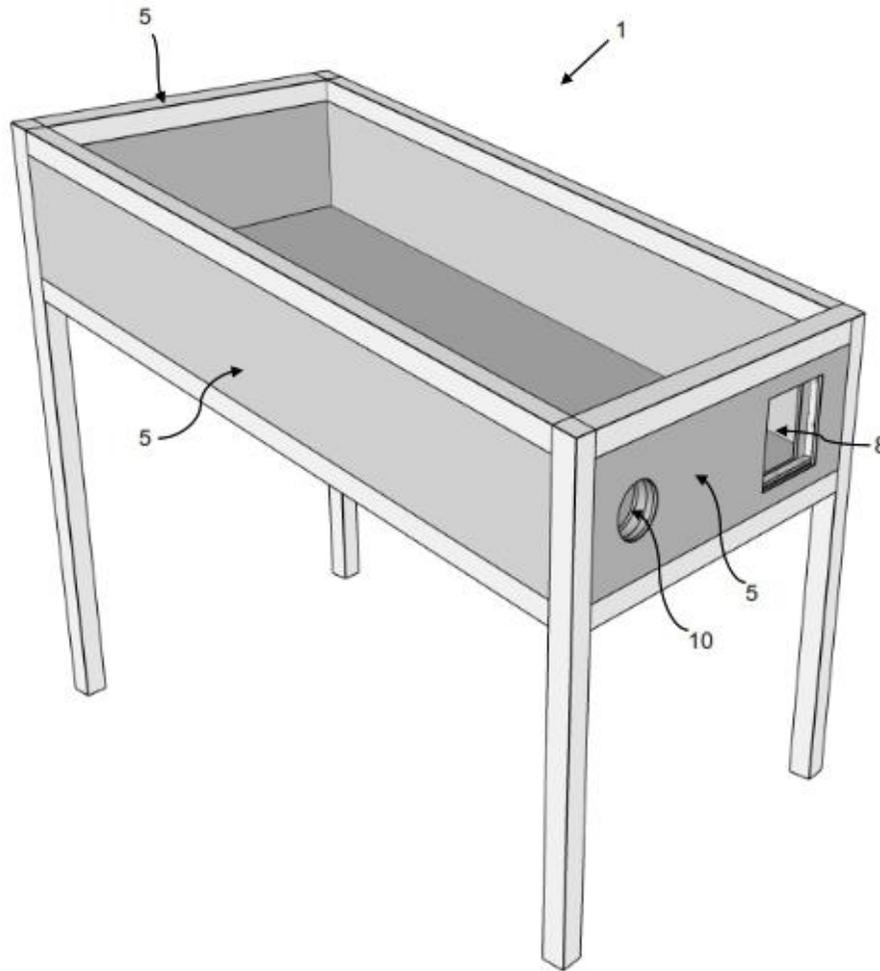


Figura 27. Placas internas y externas del CSH (Fuente propia).



*Figura 28. Placas de la estructura del CSH (Fuente propia).*

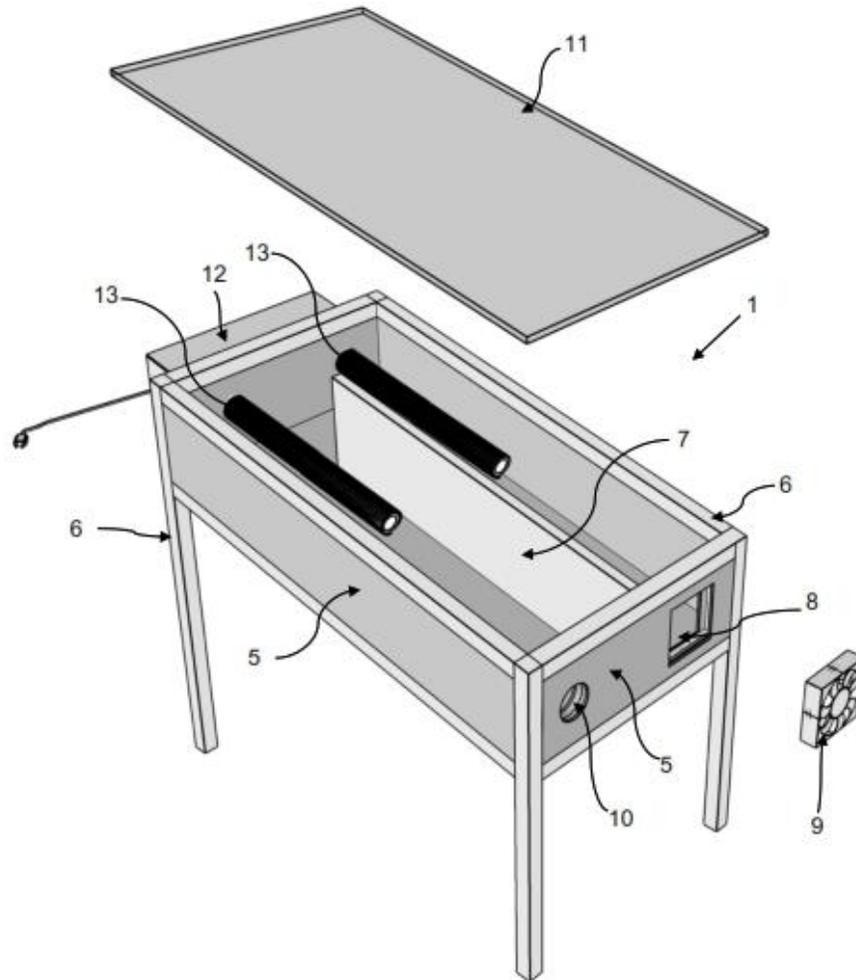
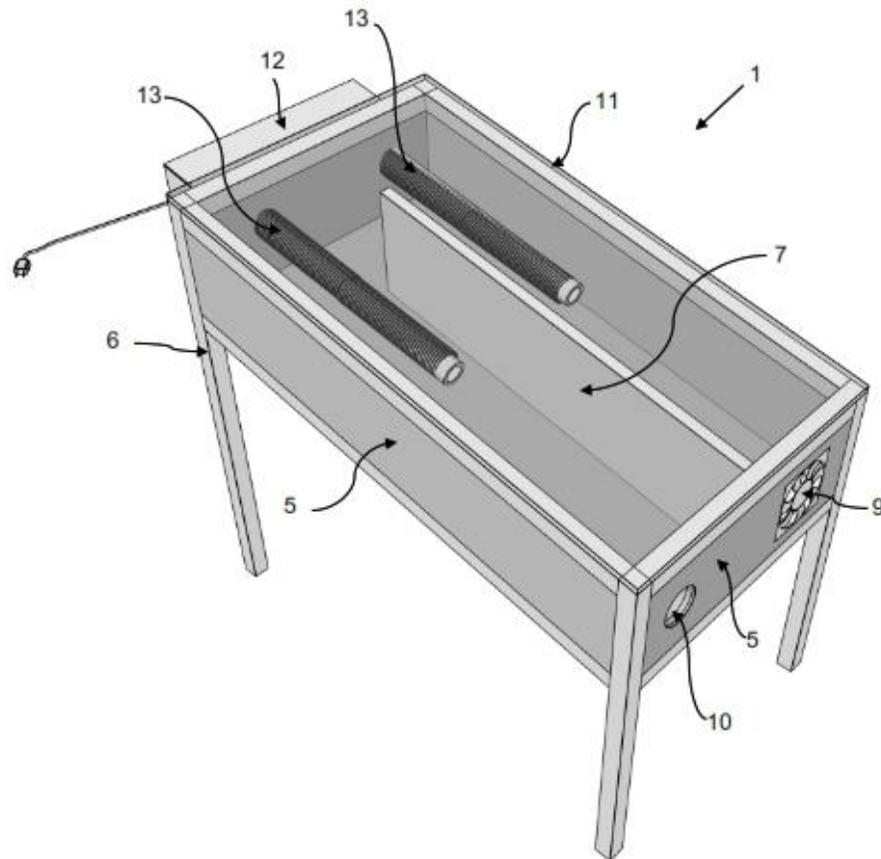


Figura 29. Placa aislante del CSH (Fuente propia).



*Figura 30. CSH con módulo de calentamiento por inducción, barras de calentamiento y bobinas helicoidales (Fuente propia).*

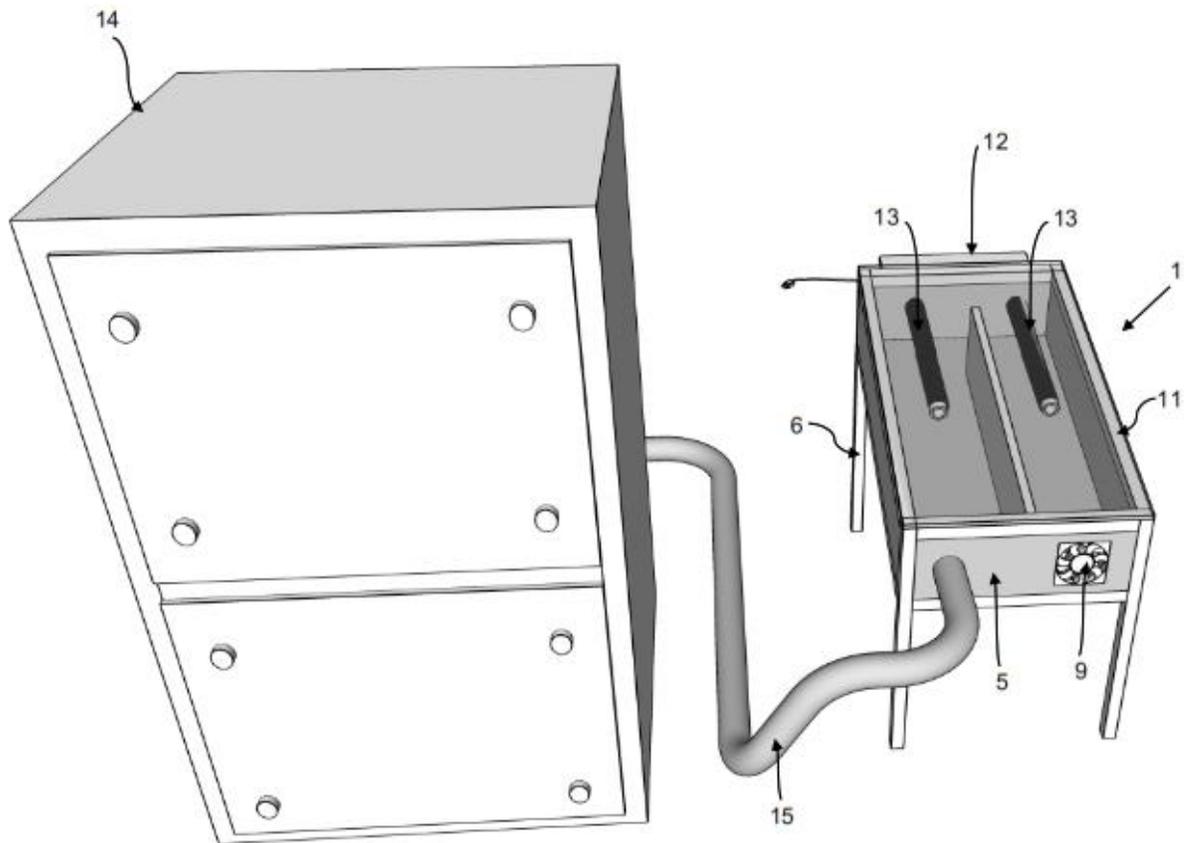


Figura 31. Sistema de secado con CSH y cabina de secado (Fuente propia).



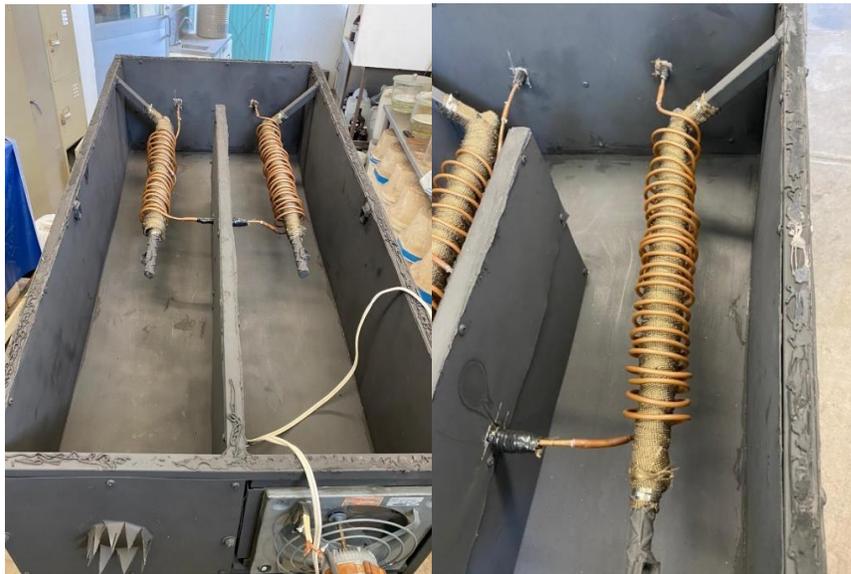
*Figura 32. Corte de materiales para estructura del CSH (Fuente propia).*



*Figura 33. Estructura del CSH (Fuente propia).*



*Figura 34. Vista superior de estructura del CSH (Fuente propia).*



*Figura 35. Estructura interna del CSH con bobinas helicoidales y barra de calefacción (Fuente propia).*



*Figura 36. Estructura del CSH- con sistema de ingreso y salida de flujo de aire (Fuente propia).*



*Figura 37. CSH-CPI con sistema de inducción (Fuente propia).*



Figura 38. a) módulo de CPI. b) CSH-CPI terminado (Fuente propia).



Figura 39. CSH con sistema auxiliar de calentamiento de resistencias eléctricas (Fuente propia).



Las dimensiones, características, y tipos de materiales utilizados en la fabricación del CSH se observan en los cuadros 5 - 8.

**Cuadro 5. Parámetros del CSH.**

Parámetros	Dimensión	Parámetro	Dimensión
Ancho del captador solar	0.72 m	Espesor de aislamiento	0.03 m
Largo del captador solar	1.42 m	Diámetro de salida del captador solar	Ø 0.10 m
Área del captador	1 m <sup>2</sup>	Diámetro de entrada del captador solar.	Ø 0.20 m
Canales	2	Pendiente del captador	35°
Longitud del espacio entre vidrio y placa absorbente.	0.3 m	Espesor de la placa absorbente.	0.006 m
Longitud del espacio entre canales.	0.32 m	Espesor de la placa aislante.	0.003 m



**Cuadro 6. Parámetros del sistema auxiliar de calentamiento CPI.**

Parámetros	Dimensión	Parámetros	Dimensión
Módulo de calentamiento por inducción	Voltaje de entrada: 220 V Entrada de placa: 12 V-54 V Potencia máxima: 2100 W. Largo: 155 mm Ancho: 70 mm Peso: 3kg	Número de barras de calentamiento por inducción.	2
Longitud de las barras de calentamiento por inducción.	0.75 m	Número de vueltas de bobina helicoidal.	38
Diámetro de las barras de calentamiento por inducción.	3 mm	Número de bobinas helicoidales.	2

**Cuadro 7. Parámetros del sistema auxiliar de calentamiento resistencias eléctricas.**

Parámetros	Dimensión	Parámetros	Dimensión
Resistencias eléctricas aletadas para calentamiento en forma de "U".	Voltaje de entrada: 220 V  Potencia máxima: 1800 W.	Número de resistencias.	2
Longitud total de las resistencias eléctricas.	0.70 m	Diámetro de las resistencias eléctricas.	3 cm



**Cuadro 8. Materiales del CSH.**

Parámetros	Material
Estructura del captador	PTR 3 mm
Placa absorbente	Lamina de acero inoxidable
Placa aislante	Vidrio templado
Cubierta de estructura interna	Lamina de acero inoxidable
Cubierta de estructura externa	Lámina galvanizada
Aislante 1	MDF
Aislante 2	Fibra de vidrio
Barra utilizada para calentamiento por inducción	Acero
Bobina helicoidal	Cobre 6 mm
Pintura	Pintura de aceite, color negro mate

### **8.2.1 Construcción de la cabina de secado e implementación del control de temperatura en la cabina de secado**

La cabina de secado para utilizar con el captador solar híbrido solar-eléctrico se construyó con los materiales que se muestran en el cuadro 9 y los parámetros se



muestran en el cuadro 10 y figura 40. Respecto al control de temperatura se utilizó el control de temperatura ON-OFF (Marca BJ, sensor NTC 10K/3435, modelo Mh1210wm, China) el cual se adhirió en el CSH y el sensor se colocó dentro de la cabina de secado como se muestra en la figura 41.

**Cuadro 9. Materiales de la cabina de secado.**

Parámetros	Material
Estructura de la cabina.	Lamina de acero galvanizada calibre 20 (122 x 244 cm).
Paredes de la cabina	Láminas de recubrimiento de sanitario PVC reforzado con fibra de vidrio (122 x 244 cm).
Aislamiento	Panel de poliestireno expandido con densidad de 10 kg (122 x 244 cm).
Unidores	Remaches galvanizados
Estantes	Aluminio estructural
Bisagras	Bisagra cuadrada de acero inoxidable
Cerraduras	Cerradura de acero inoxidable
Capuchón	Galvanizado 6 mm
Conexión a captador.	Tubo de aluminio 2 mm

**Cuadro 10. Parámetros del CSH.**

Parámetros	Dimensión	Parámetro	Dimensión
Ancho de la cabina.	0.6 m	Espesor de aislamiento.	0.06 m
Largo de la cabina.	1.24 m	Diámetro de entrada de la cabina.	Ø .09 m
Altura de la cabina	1.24 m	Diámetro de salida de la cabina.	Ø 0.06 m
Canaletas	3	Volumen de la cabina.	0.92 m <sup>3</sup>
Altura del espacio entre charolas	0.3 m	Espesor de la placa absorbente.	0.006 m



*Figura 40. Construcción de cámara de secado (Fuente propia).*



Figura 41. Control de temperatura del secador solar híbrido (Fuente propia).

### 8.2.2 Evaluación térmica del CSH sin sistema auxiliar de calentamiento

La evaluación térmica del CSH establecida con 3 flujos (Figs. 42 y 43), presentó diferencias en  $TS$  ( $p < 0.05$ ), obteniendo una  $TS$  mayor a menor flujo; de tal manera que, al incrementar el flujo la  $TS$  se reduce, como se puede observar en la figura 44. Sin embargo, el tener flujos de aire bajos pueden tener problemas con la salida de humedad del CSH y prolongar el tiempo de secado (Rani y Tripathy, 2021).



*Figura 42. CSH (Fuente propia).*

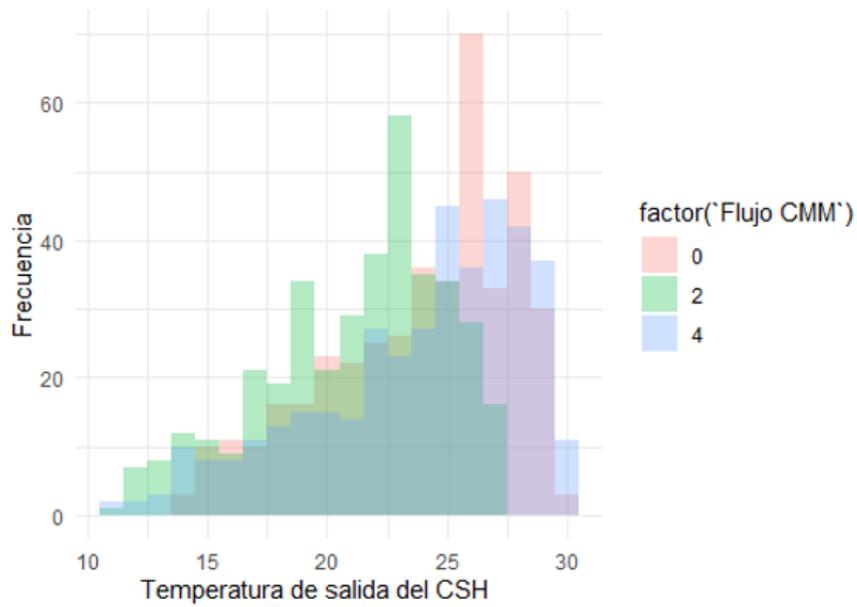


Figura 43. Histograma de diferentes flujos de aire de alimentación del CSH (Fuente propia).

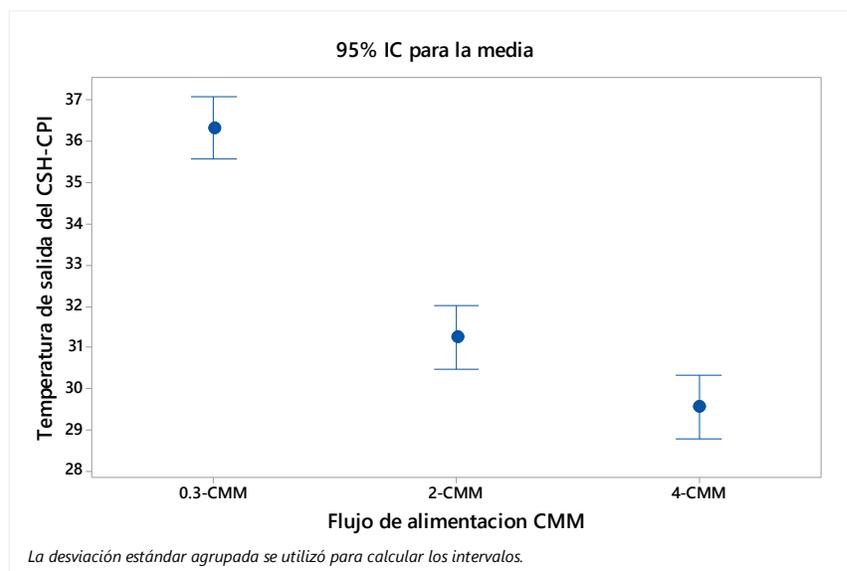


Figura 44. ANOVA de los diferentes flujos de alimentación del CSH (Fuente propia).

La eficiencia de CSH se determinó con el método antes mencionado y sin utilizar el sistema auxiliar de calentamiento, la eficiencia para los 3 flujos utilizados se puede observar en el cuadro 11, la menor eficiencia se encontró con el flujo menor esto por el nulo aprovechamiento del calor útil, similar a lo reportado (Gómez y col., 2010) donde se presenta mayor eficiencia al incrementar el flujo, pero este parámetro también está relacionado con la radiación presente en la evaluación realizada.

**Cuadro 11. Eficiencia del CSH-CPI.**

Flujo de aire ( $m^3 \text{ min}^{-1}$ )	Temperatura de entrada ( $^{\circ}\text{C}$ )	Temperatura de salida ( $^{\circ}\text{C}$ )	Eficiencia (%)
0.3	23.93 $^{\circ}\text{C}$	36.31 $^{\circ}\text{C}$	6
2	21.3 $^{\circ}\text{C}$	31.24 $^{\circ}\text{C}$	42
4	23.92 $^{\circ}\text{C}$	29.55 $^{\circ}\text{C}$	38

### 8.2.3 Evaluación térmica del secador solar híbrido con sistema auxiliar de calentamiento por inducción y cabina de secado

La evaluación térmica y energética del CSH-CPI establecida con un flujo de  $1.44 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$  como se muestra en la figura 45, se realizó como se muestra a continuación: primero se evaluó la temperatura que alcanzaron las barras de hierro con el calentamiento por inducción obteniendo una temperatura promedio de  $118(\pm 2) \text{ }^{\circ}\text{C}$  como se muestra en la figura 46, con lo que se probó el funcionamiento del inductor antes de aislarlo, después de aislarlo en el CSH, se realizó una corrida de secado de 9:00 horas a 11:34 horas, siendo esta interrumpida por un corto circuito en el módulo de inducción, la causa de esto fue la mala calidad de los componentes del módulo de inducción; sin embargo, los datos registrados en ese periodo se muestran en el anexo 3, hasta este punto se logró una temperatura máxima de  $44 \text{ }^{\circ}\text{C}$  en la cabina de



secado, con una radiación promedio de  $850.1(\pm 5.83) \text{ W m}^{-2}$  y una temperatura ambiente de  $18.46(\pm 1.93) \text{ }^\circ\text{C}$  y en promedio  $70.79(\pm 1.20) \text{ }^\circ\text{C}$  en la salida del captador y  $119.14(\pm 6) \text{ }^\circ\text{C}$  en el interior del CSH-CPI en la parte del módulo de calentamiento por inducción (Figs. 47 y Cuadro 12), presentando 2 pérdidas de energía térmica, una con la transferencia de calor al medio ambiente por medio del cristal templado el cual tiene una conductividad térmica de  $1.163 \text{ W mK}^{-1}$ , y principalmente en la conexión del captador a la cabina de secado a través del ducto de aluminio, con una pérdida de en promedio  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , además del no aprovechamiento del calor generado dentro del captador debido al poco flujo o arrastre de aire caliente así la cabina de secado como se muestra en la figura 48.

En este punto que no se logra la temperatura planteada no se descarta que el CPI sea una opción desfavorable para el uso de la hibridación, pero en este momento existe una brecha en México respecto a la disponibilidad y accesibilidad de equipos de inducción (Robustez de los materiales y costo) para este tipo de industria, además de que otros factores que no se tomaron en consideración afectaron la eficiencia del uso de CPI.



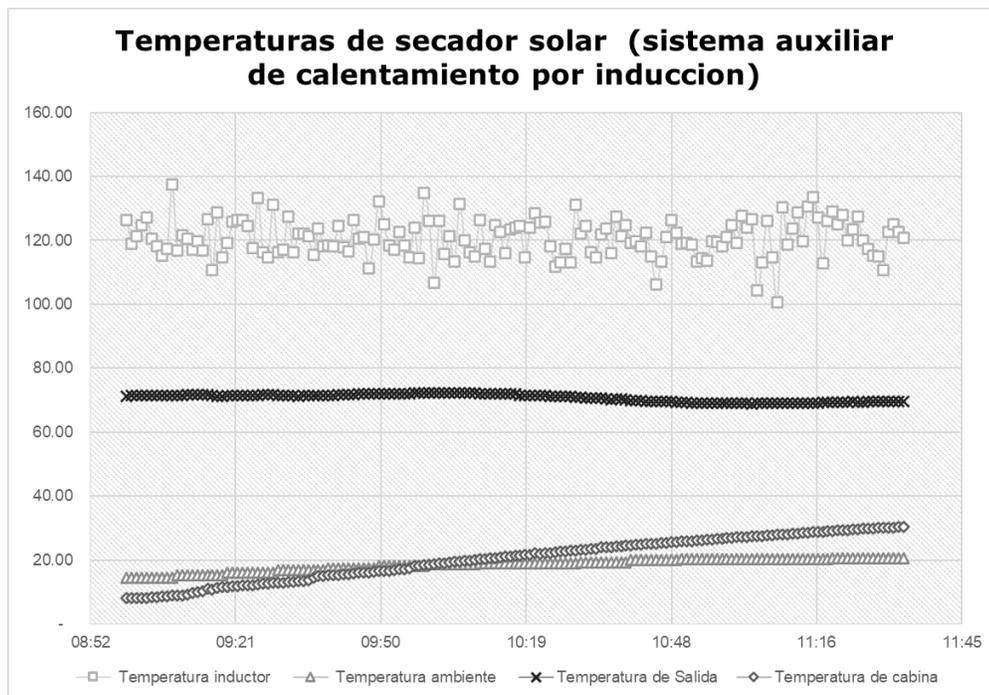
Figura 45. Secador solar híbrido (Fuente propia).



Figura 46. Calentamiento de barra del CSH-CPI (Fuente propia).

**Cuadro 12. Parámetros de temperatura del CSH- CPI.**

Comparaciones	Diferencia de temperatura (°C)
TCPI	120.62(±6.24)
TA	18.46(±1.93)
TS	70.79(±1.20)
TC	20.39(±6.83)
Nota: Flujo $1.44 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$	



*Figura 47. Evaluación térmica del CSH-CPI (Fuente propia).*

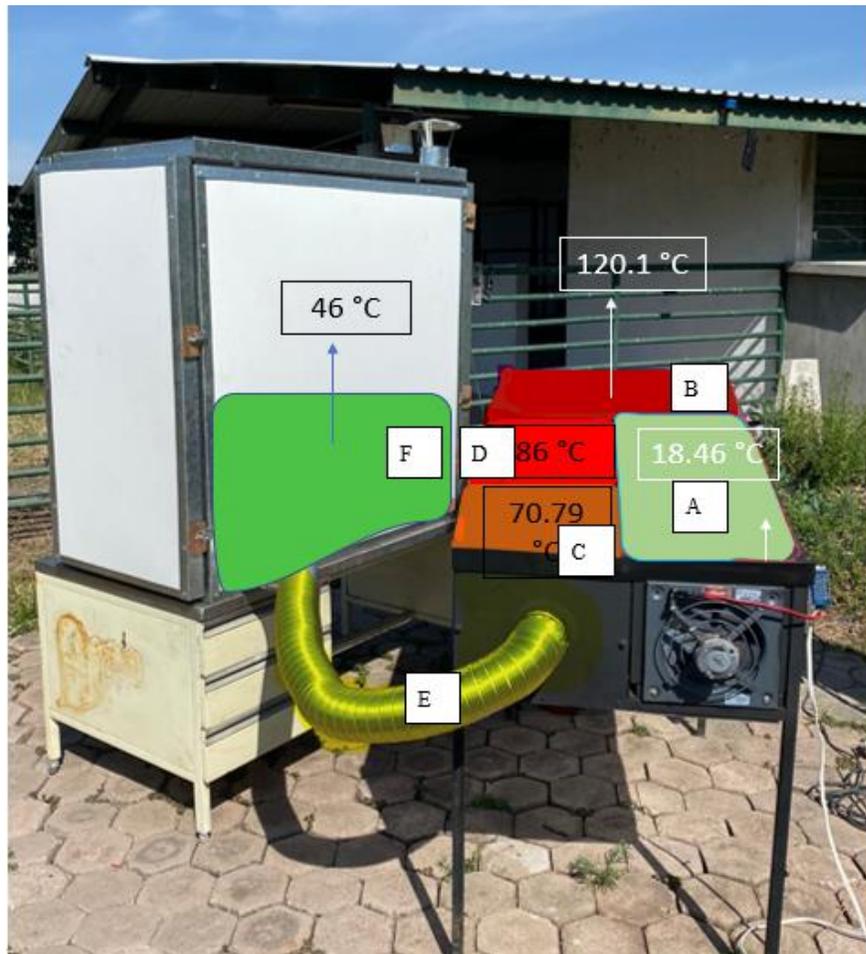


Figura 48. Secador solar híbrido, A) temperatura de entrada del CSH-CPI, B) temperatura dentro del CSH-CPI medio, C) temperatura de salida del CSH-CPI, D) temperatura dentro del CSH-CPI medio salida, E) conexión de CSH-CPI y cabina de secado y F) temperatura de cabina de secado (Fuente propia).

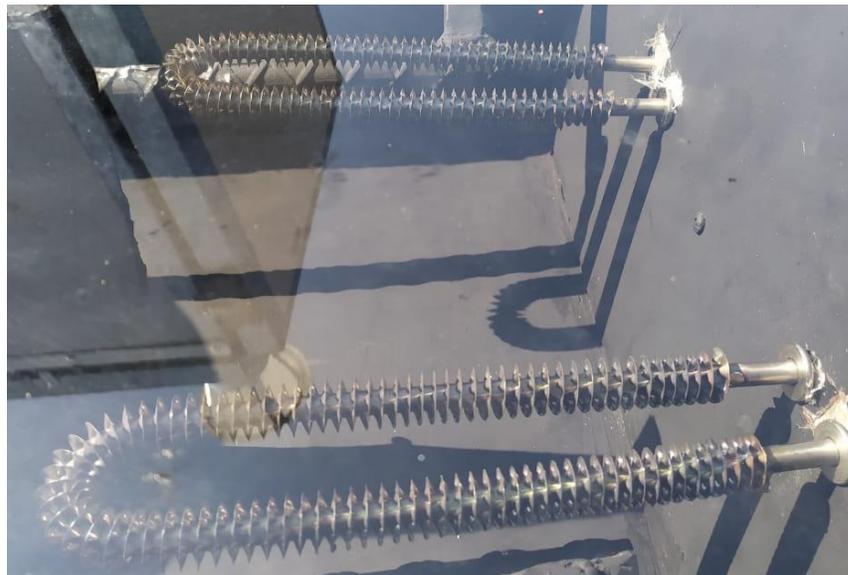


#### **8.2.4 Evaluación térmica del secador solar híbrido con sistema auxiliar de calentamiento con resistencias eléctricas y optimización del equipo**

La evaluación térmica y energética del CSH-RE (Fig. 49) preestablecida con un flujo de  $1.44 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ , en un periodo de 11:40 – 14:40 horas, se modificó a un flujo constante de  $5.10 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ , mediante la incorporación de otro extractor (SOLER PALAU, 5HXM-200) en la salida, debido a que el flujo establecido no fue suficiente para trasladar el calor generado dentro del captador solar híbrido hacia la cabina de secado como se mencionó anteriormente. Los datos obtenidos del análisis de temperatura de muestran en el cuadro 13, con lo cual en un periodo de prueba de 6 hrs. la máxima temperatura que logro alcanzar fue de  $56.1 \text{ }^\circ\text{C}$  en la cabina de secado, con una radiación promedio de  $764.10(\pm 45.22) \text{ W m}^{-2}$ , temperatura ambiente de  $25.02(\pm 1.36) \text{ }^\circ\text{C}$ , y  $72.54(\pm 6.74) \text{ }^\circ\text{C}$  en la salida del captador y  $109.7(\pm 14.9) \text{ }^\circ\text{C}$  en el interior del CSH-RE (Figs. 50 y 51), similar a lo obtenido con el sistema de calentamiento por inducción, con un ligero incremento de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  en la temperatura máxima alcanzada; sin embargo, se detectó falta de generación y perdida de calor en la conexión a la cabina por parte del tubo de aluminio.

Debido a que no se logró alcanzar la temperatura planteada de  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  se realizaron modificaciones para aumentar la temperatura en la cabina de secado; por lo cual, se agregaron 2 resistencias eléctricas de nicromo en tubo aletada en U de  $35 \text{ cm}$  de lago y  $3 \text{ cm}$  de diámetro, con  $45 \text{ } \Omega$  de resistencia cada una alimentada con  $220 \text{ V}$   $4.89 \text{ A}$  ( $1.5 \text{ kW}$ ), se colocaron de manera continua en el canal de salida del captador a una distancia de  $35 \text{ cm}$ , además se realizó un recubrimiento térmico con fibra de porcelana y cinta térmica para aumentar la capacidad térmica del tubo de salida; de modo que, se logró obtener  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ , en la cabina de secado, alcanzando la temperatura planteada con una radiación promedio de  $847.65(\pm 5.33) \text{ W m}^{-2}$  y una temperatura ambiente de  $20.24(\pm 6.16) \text{ }^\circ\text{C}$  y en promedio  $98.55(\pm 5.89) \text{ }^\circ\text{C}$  en la salida del captador y  $117.96(\pm 5.41) \text{ }^\circ\text{C}$  en el interior del CSH-RE, en la parte del CSH

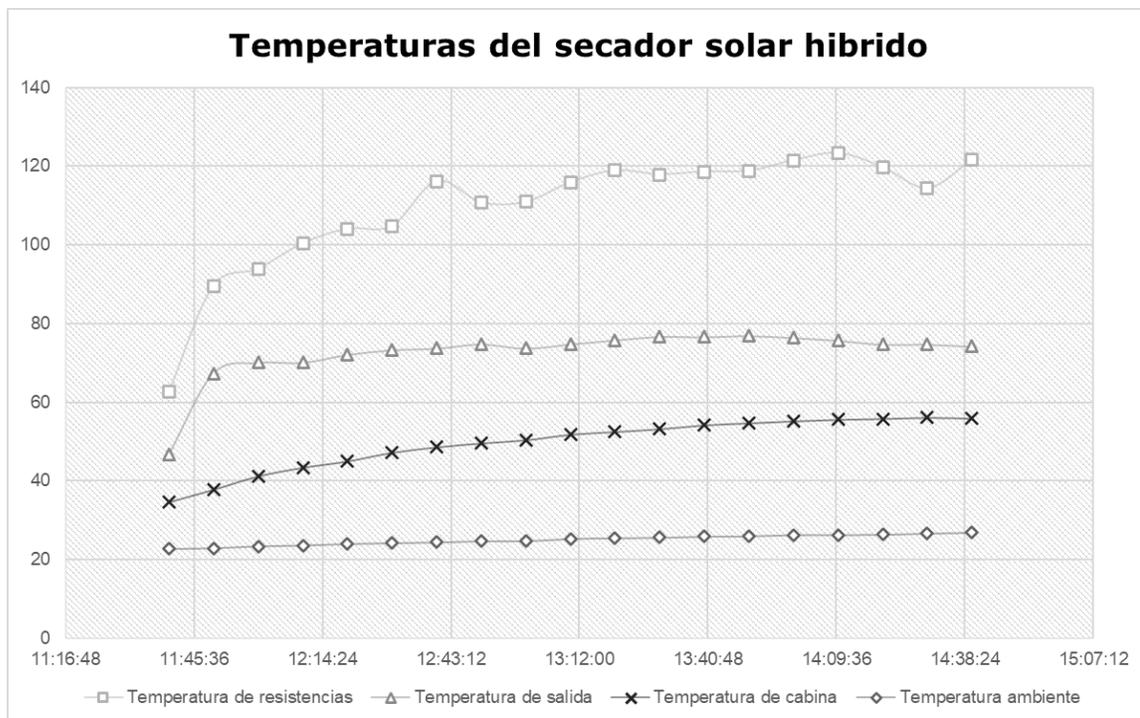
evaluado en un período de 7:00 a.m. a 9:00 p.m. (Cuadro 14), presentando solo una pérdida de energía térmica por medio del cristal templado como se observa en las figuras 52 y 53. El tiempo de precalentamiento para alcanzar la temperatura de secado del CSH iniciando con una temperatura ambiente de  $3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  en la cabina de secado y una temperatura ambiente de  $6.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  fue de un tiempo de 1 hora y 23 minutos con una constante de incremento calorífico de  $0.778\text{ }^{\circ}\text{C}$  por minuto (Fig. 54 y Cuadro 15.); por lo que, los parámetros finales de construcción del CSH con sistema auxiliar de calentamiento se muestran en los cuadros 16 – 18.



*Figura 49. Sistema auxiliar de calefacción mediante resistencias eléctricas (Fuente propia).*

**Cuadro 13. Parámetros de temperatura del CSH-RE**

Comparaciones	Diferencia de temperatura (°C)
TR	109.67(±14.9)
TA	25.02(±1.36)
TS	72.54(±6.74)
TC	49.62(±6.51)
Nota	Flujo 5.1 m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>



*Figura 50. Evaluación térmica del CSH-RE (Fuente propia).*



Figura 51. Secador solar híbrido, A) temperatura de entrada del CSH-RE, B) temperatura dentro del CSH-RE, medio, C) temperatura de salida del CSH-RE, D) temperatura de cabina de secado (Fuente propia).

**Cuadro 14. Parámetros de temperatura del CSH final (FLUJO 5.1)**

Comparaciones	Diferencia de temperatura (°C)
TR	123.8(±2.68)
TA	24.06(±2.83)
TS	81.1(±8.26)
TC	69.45(±0.76)
Nota	Flujo 5.1 $m^3 \text{ min}^{-1}$

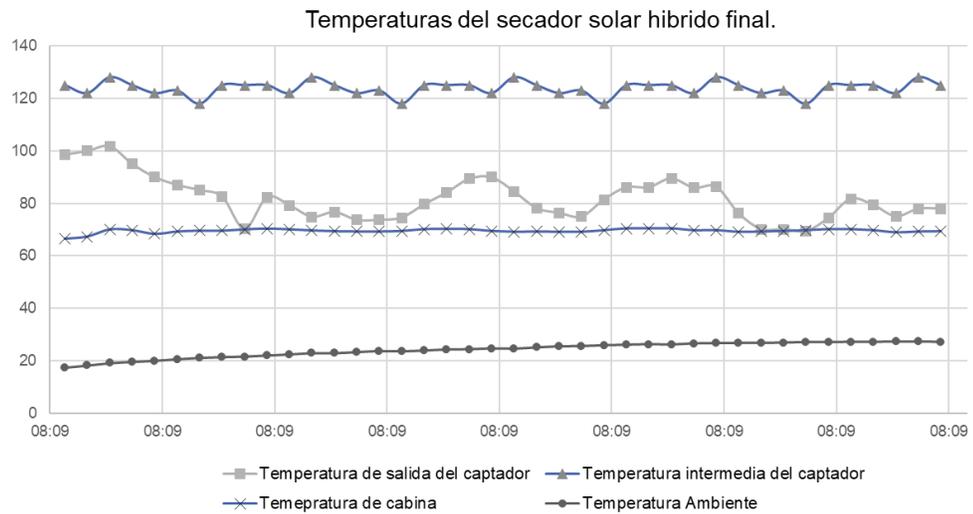


Figura 52. Evaluación térmica del CSH-RE final (4 resistencias eléctricas) (Fuente propia).

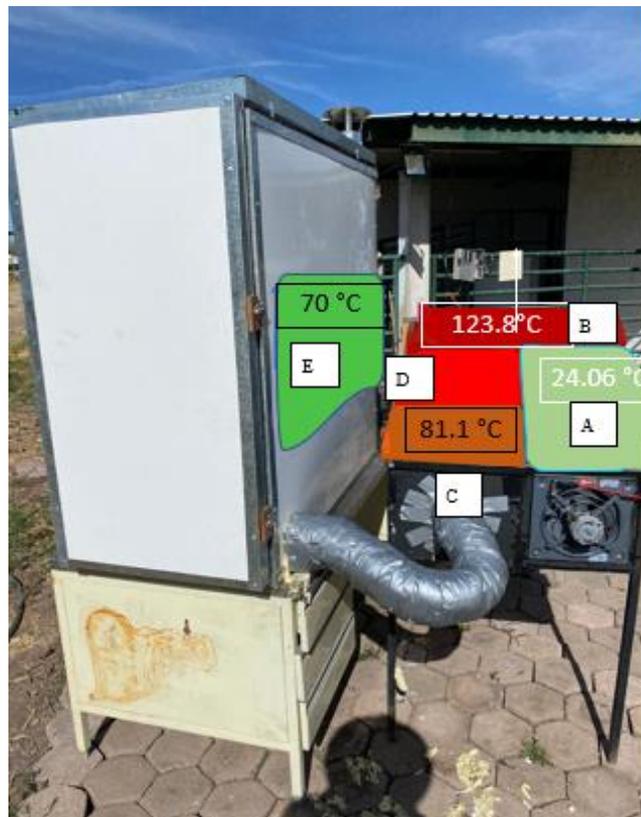


Figura 53. Secador solar híbrido optimizado, A) temperatura de entrada del CSH-RE, B) temperatura dentro del CSH-RE, medio, C) temperatura de salida del CSH-RE, D) temperatura dentro del CSH-RE medio salida, E) conexión de CSH-RE y cabina de secado y F) temperatura de cabina de secado (Fuente propia).

**Cuadro 15. Incrementos de temperatura del secador solar híbrido.**

Hora	Minutos	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura de cabina (°C)
08:05	485	6.8	3.7
08:15	495	7.7	16.2
08:25	505	8.9	28.3
08:35	515	10.2	38.1
08:45	525	11.9	47.2
08:55	535	13.1	54.1
09:05	545	14.2	60.1
09:15	555	15.1	65
09:25	565	16.3	69
09:28	568	17.3	70

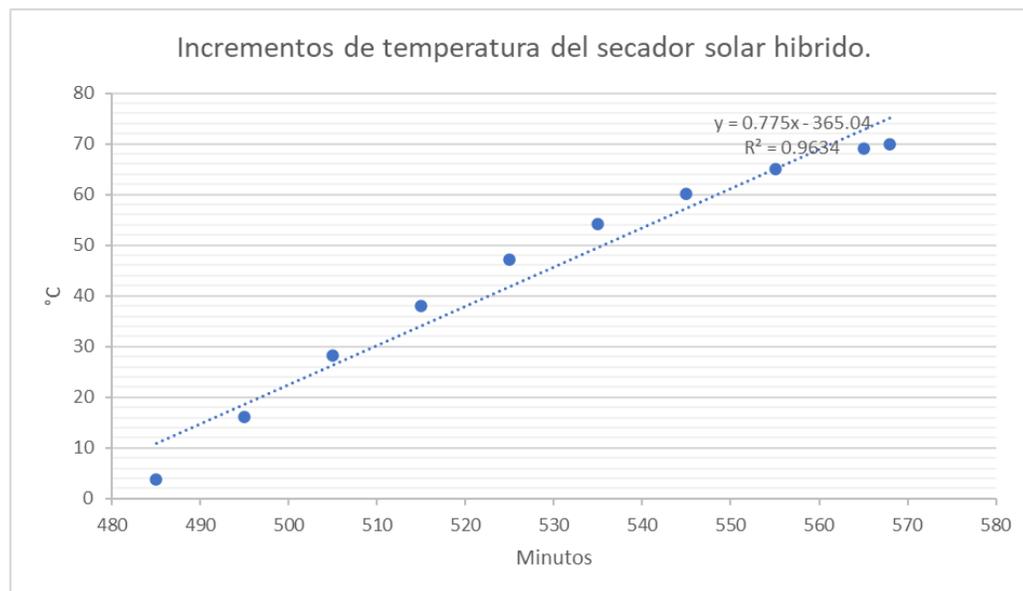


Figura 54. Incrementos de temperatura del secador solar híbrido (Fuente propia).



**Cuadro 16. Parámetros del CSH.**

Parámetros	Dimensión	Parámetro	Dimensión
Ancho del captador solar	0.72 m	Espesor de aislamiento	0.03 m
Largo del captador solar	1.42 m	Diámetro de salida del captador solar	Ø 0.10 m
Área del captador	1 m <sup>2</sup>	Diámetro de entrada del captador solar.	Ø 0.20 m
Canales	2	Pendiente del captador	35°
Longitud del espacio entre vidrio y placa absorbente.	0.3 m	Espesor de la placa absorbente.	0.006 m
Longitud del espacio entre canales.	0.32 m	Espesor de la placa aislante.	0.003 m
Flujo de aire	5.1 m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>	Cantidad de extractores	2

**Cuadro 17. Parámetros del sistema auxiliar de calentamiento resistencias eléctricas.**

Parámetros	Dimensión	Parámetros	Dimensión
Resistencias eléctricas aletadas para calentamiento en forma de "U".	Voltaje de entrada: 220 V Potencia máxima: 1500 W.	Número de resistencias.	4
Longitud total de las resistencias eléctricas.	0.70 m	Diámetro de las resistencias eléctricas.	3 cm



**Cuadro 18. Materiales de construcción del CSH.**

Parámetros	Material
Estructura del captador	PTR 3 mm
Placa absorbente	Lamina de acero inoxidable
Placa aislante	Vidrio templado
Cubierta de estructura interna	Lamina de acero inoxidable
Cubierta de estructura externa	Lámina galvanizada
Aislante 1	MDF
Aislante 2	Fibra de vidrio
Pintura	Pintura de aceite, color negro mate
Manguera de conexión	Aluminio, Ø 10 cm
Aislamiento de manguera de conexión	Fibra de porcelana
Sistema de suministro de flujo	Extractor (SOLER PALAU, 5HXM-200)

El CSH propuesto, sin sistema auxiliar de calentamiento logra un desempeño térmico satisfactorio respecto al uso de energía solar, con una eficiencia de 42 % en un flujo de  $2 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ . La TS del CSH es cambiante debido a las condiciones climáticas por lo que en el transcurso del día se pueden observar diferentes temperaturas y para este captador lo que se busca es que se establezca la



temperatura a 70 °C. En la hibridación del CPP con el CPI no se logró llegar a 70 °C debido a que el equipo utilizado no tiene la robustez para trabajar de manera continua y actualmente en México existe una brecha en la producción de esta tecnología, haciendo que los costos de estos equipos se eleven; pero, no se descarta que el CPI sea una opción desfavorable para el uso de la hibridación. Respecto a la hibridación del CPP con RE se logró la temperatura propuesta de 70 °C con un flujo de 5.1,  $m^3 \text{ min}^{-1}$  evaluado en el mes de diciembre (Invierno) sin embargo, el aprovechamiento de la energía solar es mejor en otras estaciones del año debido a que en la estación de pruebas no encontrábamos a las temperaturas más bajas de nuestra ubicación, por lo que esta diferencia disminuiría a lo largo del año, Abubakar y col. (2018), desarrollaron una hibridación con un CS y calentamiento por combustión presentando temperaturas promedio de 42 °C y una eficiencia del 42.2 %, mayor que en el secado de TD, en parámetros meteorológicos similares; de igual manera, Murali y col. (2020), reportaron un CSH energéticamente eficiente adecuado para la operación de secado continuo, utilizando tanque de almacenamiento con agua y gas LP, redujo la humedad de 76.71% *b.h* a 15.38% *MS* en 6 *hrs.*, la temperatura del CSH fue de 73.5 °C; donde, el sistema solar suministro el 73.93 % de la energía térmica y el resto lo aportó sistema de gas LP con el resto. Otro factor importante es el recambio de aire ya el secador solar híbrido, calentó 14.67 veces más aire que el secador de bandejas, por lo que la integración de un sistema de control para el flujo de aire con relación a la temperatura optimizaría el secado, ya que se necesita un flujo alto para remover el aire caliente del CSH en ciertos periodos.

### 8.3 Multicolinealidad

Por otra parte, cuando se comparó la *TS* con las demás variables de estudio (Fig. 55), se observó multicolinealidad; aunque, *TA* fue la que presentó una mayor relación con una *r* de 0.92; mientras que la variable que tuvo la menor relación fue dirección del viento con *r* de 0.24, lo que se puede explicar porque el CSH se sometió a un flujo constante y bloqueo a esta variable.

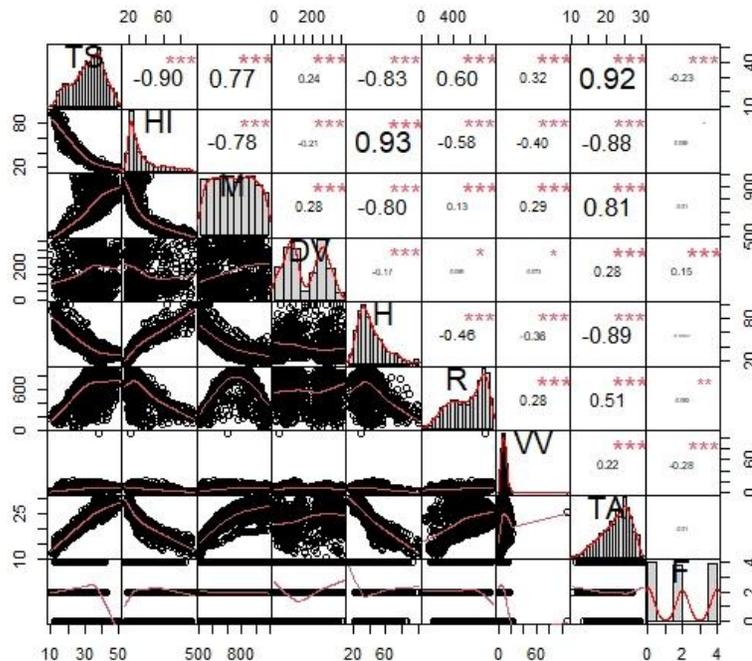


Figura 55. Correlograma de variables climáticas a modelar (Fuente propia).

#### 8.3.1 Modelo de regresión sobre componentes principales

Los resultados de extracción de los componentes principales y parámetros de evaluación del modelo MPCR se muestran en los cuadros 19 y 20, resultando 8 componentes principales y la importancia que aporta cada PC.



**Cuadro 19. Componentes principales de variables climáticas para el modelo de temperatura del CSH.**

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
H	-0.48215	0.024264	-0.073793	-0.044274	0.044225	-0.301181	-0.499552	-0.645995
M	0.41951	0.161870	-0.393196	0.267229	-0.041507	-0.600265	0.360633	-0.282297
DV	0.14079	0.505466	-0.302865	-0.752185	0.237004	0.099510	0.003634	-0.032928
HR	-0.47280	-0.031725	-0.017346	-0.193147	0.053974	-0.623994	0.108315	0.577777
RS	0.28357	-0.224368	0.707811	-0.430672	-0.062618	-0.302720	0.152784	-0.252717
RV	0.21932	-0.521023	-0.160711	-0.005480	0.789639	-0.055585	-0.162129	0.040811
TA	0.46755	0.118532	0.028816	0.035028	-0.231482	-0.227262	-0.747605	0.318024
F	-0.03223	0.617130	0.469326	0.369869	0.506163	-0.057632	-0.010099	0.037610



**Cuadro 20. Importancia de los componentes principales para el modelo de temperatura del CSH.**

	PC 1	PC 2	PC 3	PC4	PC5	PC6	PC 7	PC8
Desviación estándar	2.0 072	1.1 765	0.9 372	0.89 002	0.80 577	0.35 419	0.3 047	0.22 107
Proporción de la varianza	0.5 036	0.1 73	0.1 098	0.09 902	0.08 116	0.01 568	0.0 116	0.00 611
Proporción acumulada	0.5 036	0.6 766	0.7 864	0.88 545	0.96 661	0.98 229	0.9 939	1

Después del análisis de PC, se establece el modelo de regresión sobre PCR eliminando los PC no significativos, estos se redujeron de 8 PC (ecuación 43) a 6 PC linealmente no correlacionadas debido a que la tasa de contribución acumulada de los principales valores propios de los factores alcanzó el 98.22 %, lo que indicó que los componentes principales seleccionados cubrieron casi toda la información de los indicadores, lo que resolvió el problema de multicolinealidad. El MPCR generado transformado para predecir la *TS* del CSH se muestra en la ecuación 44:

$$\text{Ecuación 43} \dots Y = 32.402 + 4.288(PC1) - 0.570(PC2) + 0.009(PC3) + 1.031(PC4) - 2.48(PC5) - 3.436(PC6)$$

$$\text{Ecuación 44} \dots Y = 0.856(HI) - 1.97(M) + 2.342(DV) + 0.78(H) - 0.05(R) - 0.569(VV) - 1.302(TA) + 1.272(F)$$

El coeficiente de determinación ajustado del modelo tuvo un valor 0.9348; lo que significa que, la relación plateada puede explicar el 93.48 % del comportamiento de



la *TS*. Por otra parte, al verificar la precisión del modelo, presentó un buen desempeño, ya que el RMSE fue cercano a cero (2.37); mientras que, el MAE (5.63) al ser positivo indica que el modelo podría estimar la *TS* del CSH. No obstante, el modelo de PCR que comprende 6 PC con 8 variables independientes puede predecir la *TS* de salida que aporta el CSH con solo la EE, la temperatura restante la aporta el sistema de calentamiento auxiliar para alcanzar una temperatura supuesta de 70 °C (varía dependiendo el tipo de secado) por lo que podremos describir la temperatura total (*TT*) del CSH con la ecuación 45:

*Ecuación 43*..... $TT = TY + TI$

donde *TY* es la temperatura que aporta el CSH solo con ES (70 °C), *TI* es la temperatura que generará el sistema de calentamiento auxiliar para completar la *TT*, del cual se desprende la ecuación 46:

*Ecuación 44*..... $TI = 70 - TY$

con el cual podremos determinar la temperatura que aporta cada tipo de energía en el CSH.

La utilización del método estadístico de regresión de componentes principales resultó útil para el análisis de la *TS* bajo las condiciones experimentales; ya que, a través de este modelo se puede predecir la *TS* del CSH conociendo las condiciones ambientales, similar a nuestro modelo, González-Bayón y col. (2016), desarrollaron un modelo para determinar la eficiencia y temperatura de un CS con el cual permiten establecer parámetros deseados y determinar las condiciones térmicas del CSH. El modelo estadístico de regresión con componentes principales que permite predecir la temperatura que aporta el CSH solo con energía solar en el transcurso del año, bajo las condiciones meteorológicas utilizadas con un  $R^2$  de 0.9348 y elimina el monitoreo



constante de este parámetro, con los resultados obtenidos el modelo puede ser una opción para la utilización de procesos de secado.

## **8.4 Evaluación energética y fisicoquímica del secado de arándano con el secador solar híbrido y el secador de bandejas eléctrico**

### **8.4.1 Determinación de cinéticas de secado**

El contenido inicial de humedad de los arándanos, de  $85(\pm 0.20) \% b.h$ , se redujo a  $15.03(\pm 0.09) \% b.h$  y  $0.2(\pm 0.09) g H_2O g MS$ , el tiempo de secado más largo es el de  $60\text{ }^{\circ}C$  con  $17\text{ hrs.}$  seguido del  $70\text{ }^{\circ}C$  con  $12\text{ hrs.}$  mientras que el tiempo de secado más corto se observa en la temperatura de  $80\text{ }^{\circ}C$  en  $7\text{ hrs.}$  Respecto al tiempo de secado entre mayor es la temperatura menor es el tiempo de secado como se puede observar en las figura 56 y figura 57 con la velocidad de secado es mayor a una menor temperatura; además, las curvas de velocidad de secado carecen de periodo de velocidad constante; después de un breve periodo de atemperamiento de los frutos, se inicia un descenso de la velocidad, que puede subdividirse en dos etapas, ambas de velocidad de secado decreciente y ajustable al modelo de Page, similar a lo reportado anteriormente (Martin-Gómez y col., 2020; Zia y Alibas, 2021).

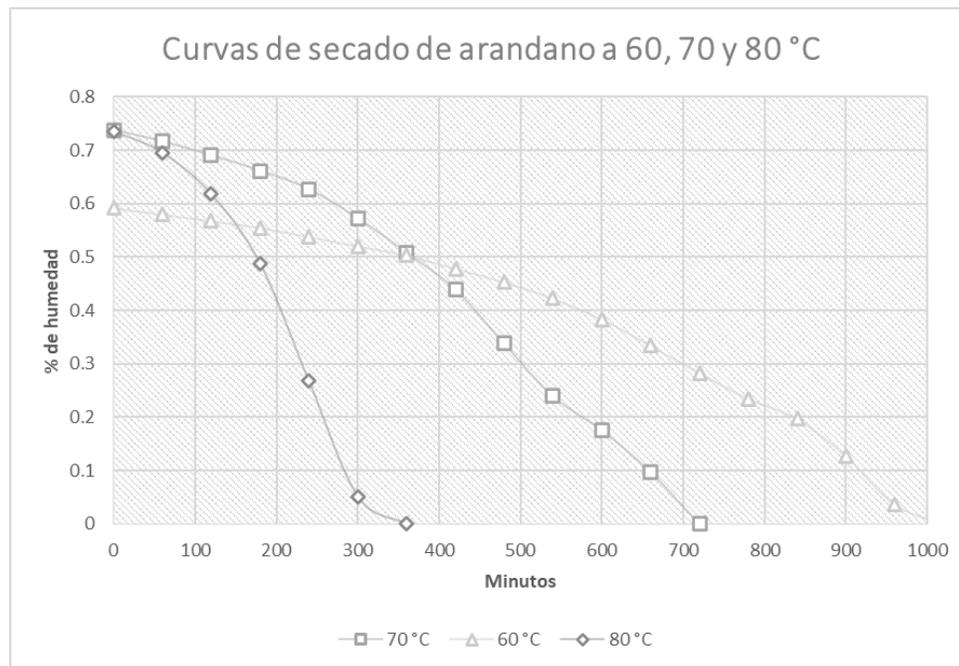


Figura 56. Curva de secado de arándano a 60, 70 y 80 °C (Fuente propia).

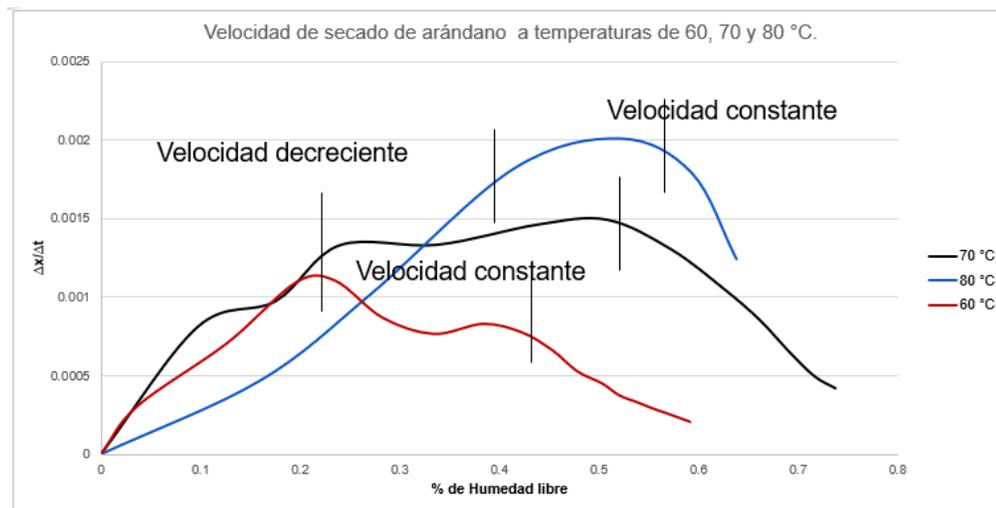


Figura 57. Velocidad de secado de arándano a diferentes temperaturas (Fuente propia).

### 8.4.2 Análisis fisicoquímicos

En general, para todos los experimentos de secado, el contenido de humedad de equilibrio fue inferior al 18 %, lo que da estabilidad al producto desde el punto de vista comercial e higiénico, el contenido de humedad final deseado para las frutas secas es del 15 % para las frutas secadas convencionalmente (Phuon y col., 2021). En este parámetro no observamos diferencias significativas ya que el secado se prolongó hasta peso constante obteniendo parámetros de humedad similares para los diferentes tratamientos (Fig. 58).

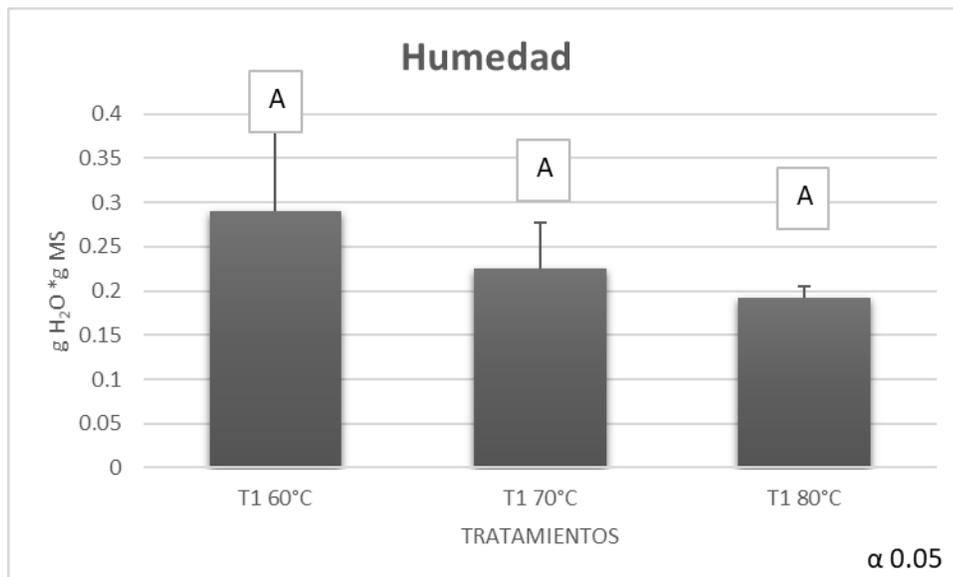


Figura 58. ANOVA de humedad del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

La actividad de agua del arándano fresco fue de alrededor de  $0,85 \pm 0,20$ , para las muestras de los tratamientos con las temperaturas de 60, 70, y 80 °C los valores de  $A_w$  fueron de  $0.248(\pm 0.045)$ ,  $0.2268(\pm 0.066)$ , de  $0.26(\pm 0.08)$  respectivamente. El valor  $A_w$  más alto aceptable para el almacenamiento seguro de productos

alimenticios es de 0.60 (M'hiri y col., 2015; Phuon y col., 2021); de igual manera, Maltini y col., (2003), reportan que la máxima actividad de agua requerida para las frutas secas osciló entre 0.60 y 0.65. Por lo cual, en este parámetro no se presentó diferencia significativa respecto a los tratamientos (Fig. 59) debido a que se buscó cumplir con estos parámetros.

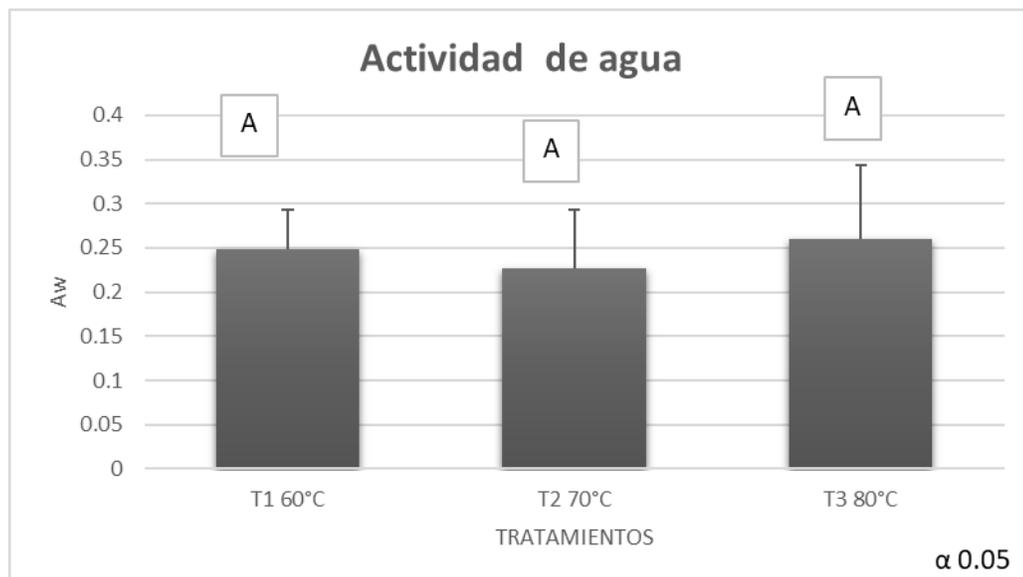


Figura 59. Actividad de agua del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

La higroscopicidad se define como la habilidad de un material de absorber la humedad en un ambiente de alta humedad relativa, esta condiciona el comportamiento de algunos materiales (Ortiz, 2005), los arándanos, tienden a tener la mayor capacidad higroscópica comparada con otras frutas, esto se debe principalmente a que la estructura interna de los arándanos era más leve o a que el contenido de sustancias solubles era mayor (Araya-Farias y col., 2011). El valor obtenido de índice de higroscopicidad está relacionado con el porcentaje de sólidos solubles totales por lo que a mayor contenido de sólidos solubles y mayor valor de

índice de higroscopicidad aumenta la retención de agua del producto seco. Para esta variable, se obtuvieron valores  $0.212(\pm 0.009)$  g H<sub>2</sub>O abs/100g MS para 60 °C, de  $0.2110(\pm 0.024)$  g H<sub>2</sub>O abs/100g MS para 70 °C fue de  $0.2232(\pm 0.0128)$  g H<sub>2</sub>O abs/100g MS para 80 °C, tampoco se observó diferencia significativa entre los tratamientos como se observa en la figura 60.

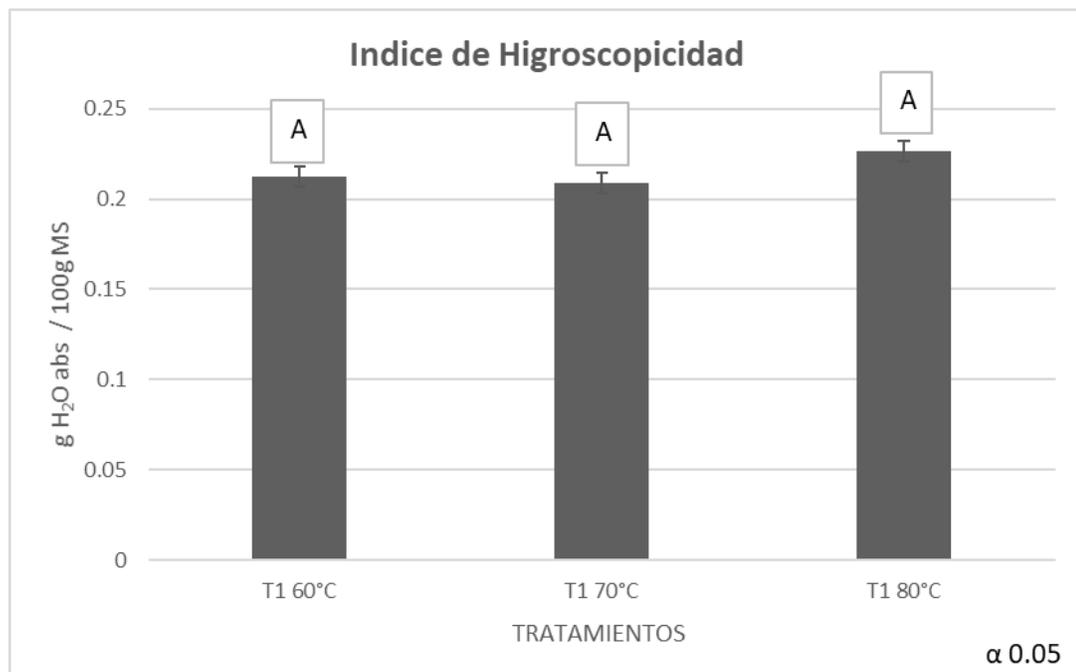


Figura 60. ANOVA de índice de higroscopicidad del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

Respecto al pH el efecto sobre el tratamiento de los arándanos fue significativo entre 80 °C con valores de  $3.83(\pm 0.629)$  respecto los demás tratamientos, como se observa en la figura 61 y de la misma manera el valor de pH bajo ( $pH < 6$ ) fue beneficioso para mantener la estabilidad de las antocianinas de los arándanos y los resultados coinciden con la mayoría de los estudios publicados sobre la estabilidad de las antocianinas (Abonce y col., 2018; Liu, y col., 2018).

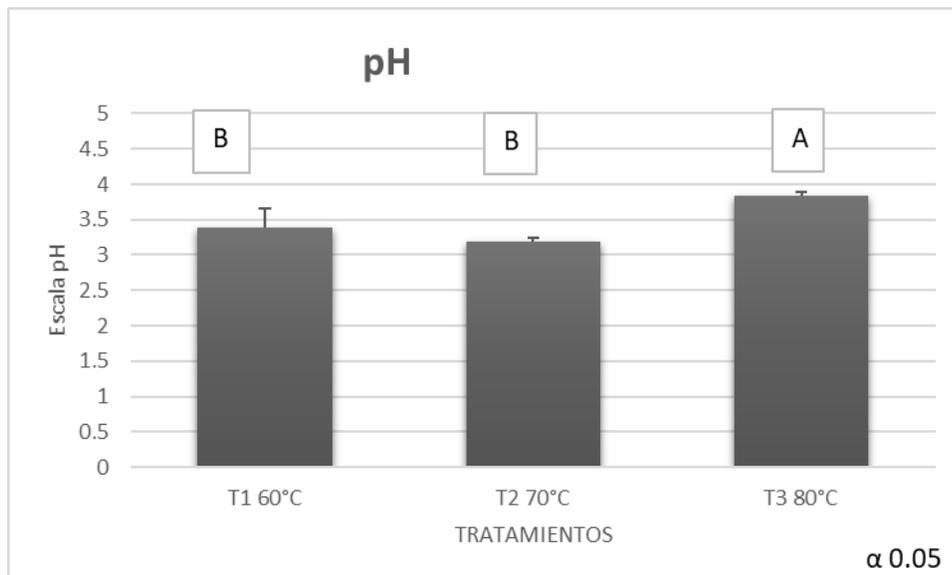


Figura 61. ANOVA de pH del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

Durante el proceso de secado se encontraron diferencias significativas para la variable sólidos solubles totales entre los tratamientos con valores de  $49 \pm (15.62)$  °Brix para 60 °C y  $47.44 (\pm 8.87)$  °Brix para 80, respecto al de 70 °C, presentando mayor concentración con  $65.44 (\pm 1.01)$  °Brix, como se muestra en la figura 62 ya que a temperaturas altas ocurre la caramelización térmica siendo estos compuestos insolubles; además, un mayor contenido de sólidos solubles aumenta la retención de agua del producto y la molécula; de la misma manera, al someter a altas temperaturas degradan o convierten algunas moléculas de interés en melanoidas (Vuarant, 2014).

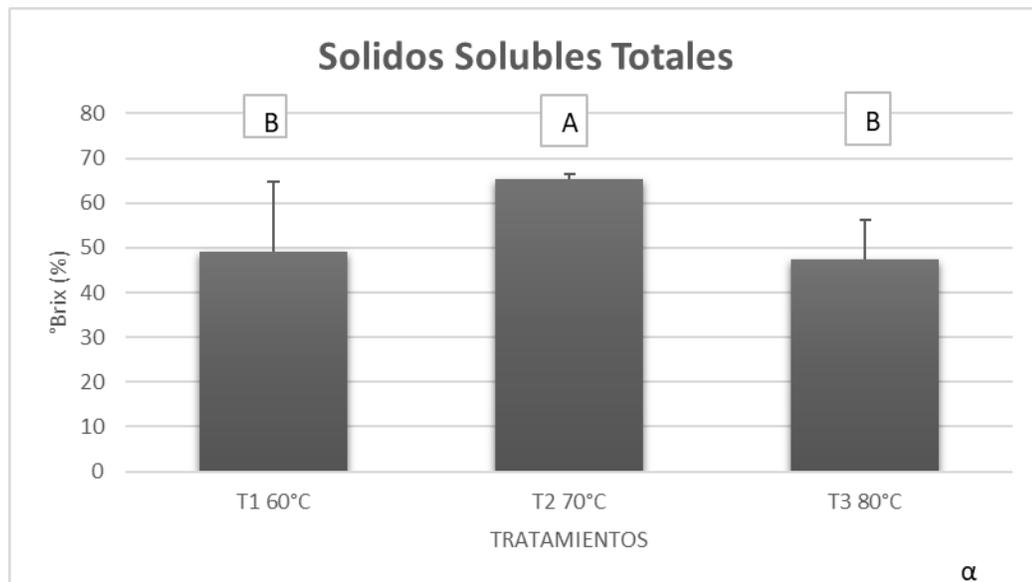


Figura 62. ANOVA de solidos solubles del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

El contenido de azúcares reductores se vio afectado por la alta temperatura de secado, obteniendo menor cantidad de azúcares para el secado a 80 °C como se observa en la figura 63.

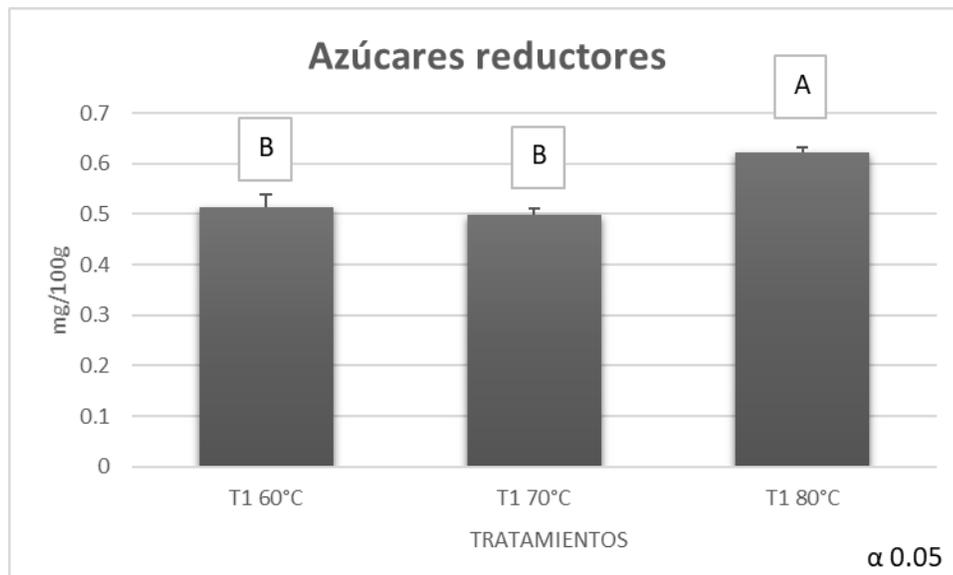


Figura 63. ANOVA de azúcares reductores del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

Un factor fundamental en los arándanos es el contenido de antocianinas ya que es una de las propiedades más distintivas de este fruto, en este caso encontramos valores de  $41(\pm 14.54)$  mg/100g a 60 °C,  $51(\pm 4.7)$  mg/100g a 70 °C y  $89.79(\pm 1.39)$  mg/100g a 80 °C con mejor valor el tratamiento de 80 °C como se observa en la figura 64, lo reportado en literatura, es que cuando hay una prolongación del tiempo de secado se tienen mayores pérdidas de antocianinas, relacionado a la exposición con el oxígeno, (Saftner y col., 2008; Aguilera-Ortiz y col., 2009).

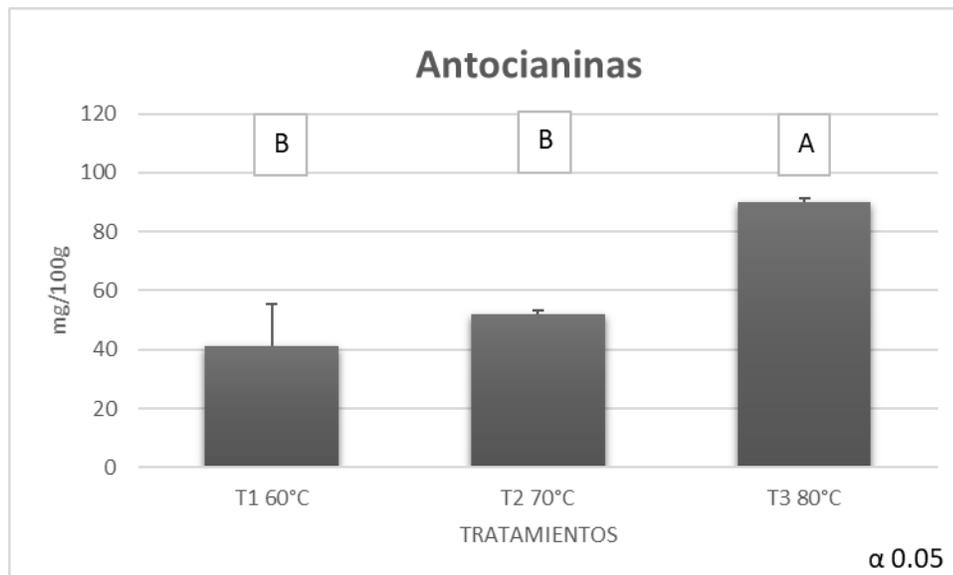


Figura 64. ANOVA de antocianinas del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

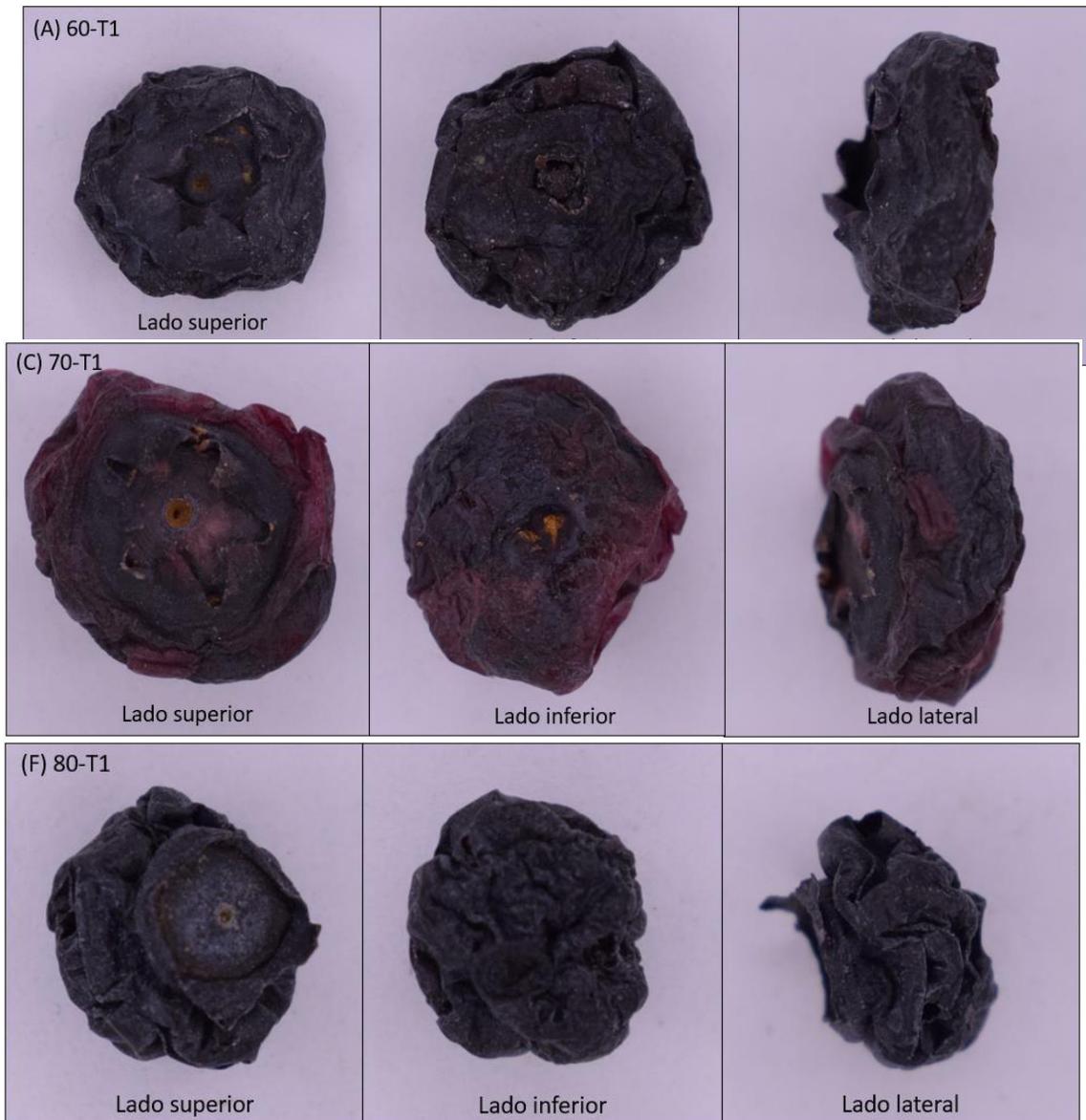
### 8.4.3 Colorimetría

El color de los arándanos es un atributo importante porque influye en la evaluación de la calidad y en la decisión de comprar de los consumidores (Saftner y col., 2008). El color de los arándanos se atribuye principalmente a sus pigmentos antociánicos rojos y azules quinoides (Mazza y Brouillard 1987), para estos tratamientos a diferentes temperaturas (Cuadro 21) no se encontraron cambios significativos en la saturación del color (Fig. 65) (Zielinska, 2019).



**Cuadro 21. Parámetros e índice de color de los arándanos.**

Tratamiento		L (luminosidad) *	A (color)*	B (color)*	C (saturación de color) *	E (diferencia de color) *
60° C	1	17.9744444	5.90888 889	- 7.07111111	9.21496 502	20.1989 166
	2	15.002	5.4221	-6.9183	8.7947	17.4283
	3	12.03	4.93555 556	- 6.76555556	8.37451 196	14.6578 767
70° C	1	19.18	13.8688 889	- 4.87555556	14.7009 225	24.1658 751
	2	16.3366667	8.49	- 6.97444444	10.9874 008	18.645
	3	15.0077778	5.59444 444	- 7.32555556	9.21746 022	17.6123 527
80° C	1	14.6044444	5.16444 444	- 7.58666667	9.17763 573	17.2487 331
	2	12.5277778	5.67	-7.27	9.21964 208	15.5546 461
	3	17.7066667	5.61333 333	- 8.03555556	9.80202 347	20.2387 181



*Figura 65. Arándano seco para análisis de color, A) tratamiento de 60 °C, (B) tratamiento de 70 °C, (C) tratamiento de 80 °C (Fuente propia).*

### 8.4.4 Análisis sensorial

En el análisis sensorial se realizó con 30 personas seleccionadas al azar, respecto a la variable color solo se observó diferencia significativa entre el color que genera el tratamiento de 70 °C y el de 60 °C como se observa en la figura 66, siendo favorable para el estudio la mayor calificación, aunque hay discrepancia respecto a las temperaturas pudo ser afectado por una variable diferente a la temperatura de secado.

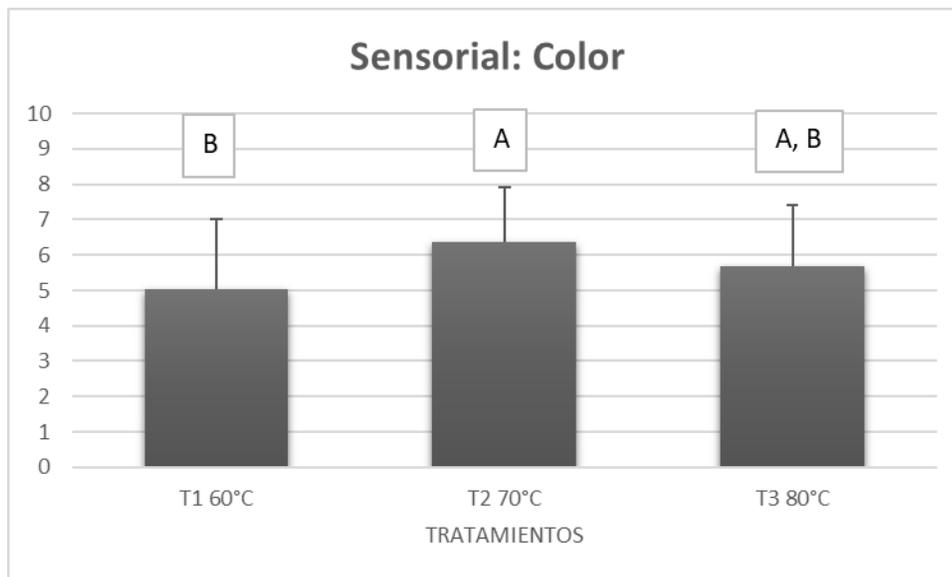
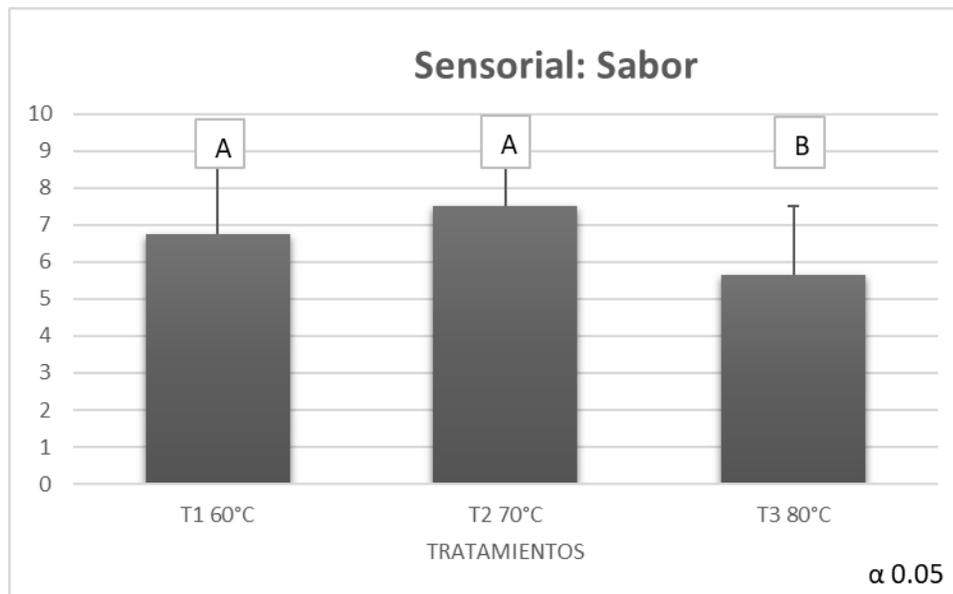


Figura 66. ANOVA de análisis sensorial de la variable color (Fuente propia).

Sin embargo, en la variable sabor se presentó una diferencia significativa del tratamiento de 80 °C respecto a 60 y 70 °C siendo los valores desfavorables para el tratamiento de 80 °C ya que fue el producto que menos agrado como se observa en la figura 67.



*Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.67. ANOVA del análisis sensorial de la variable sabor (Fuente propia).*

En la variable textura, solo encontramos diferencia significativa entre los tratamientos de 70 y 80 °C, como se observa en la figura 68, siendo favorable la mayor calificación con  $7.03(\pm 1.58)$ , lo que hace que el tratamiento de 70 °C fuera favorable en las variables analizadas.

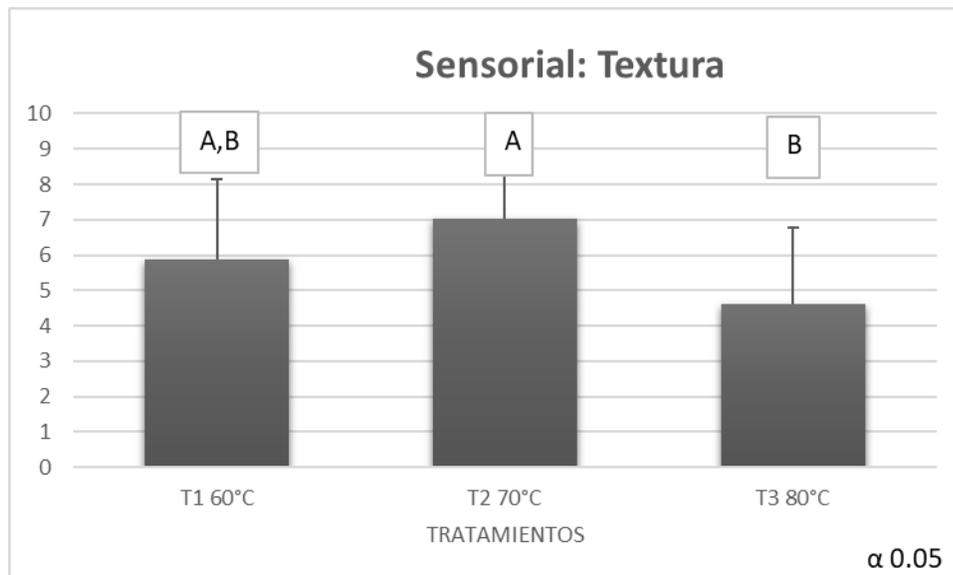


Figura 68. ANOVA de análisis sensorial de la variable textura (Fuente propia).

Con los datos experimentales se estableció el perfil de humedad en base seca para las temperaturas experimentadas, debido a que la temperatura del aire que circula sobre el arándano modifica el peso y la humedad que contiene; sin embargo hay una diferencia marcada respecto a las tres temperaturas utilizadas ya que presenta una diferencia significativa en el tiempo de secado, como lo observamos en las curvas de secado y la velocidad del secado, con lo que podemos afirmar que la velocidad de secado es afectada notablemente por la temperatura, respecto a los análisis fisicoquímicos realizados las variables humedad, índice de higroscopicidad, humedad, color y actividad de agua no fueron significativos, y para las variables de azúcares reductores, sólidos solubles totales, antocianinas y pH mostraron diferencia significativa obteniendo mejores parámetros respecto a las referencias mencionadas en literatura el tratamiento de 70 y 80 °C respecto a 60 °C, en el análisis sensorial se determinaron las cuatro variables color, sabor y textura, en las que se determinó una preferencia por las características del tratamiento a 70 °C en las variables analizadas; por lo cual, al coincidir en los análisis fisicoquímicos y primordialmente en

los análisis sensoriales se determina como el tratamiento óptimo de secado para el arándano (*V. corymbosum*) en un secador de bandejas con un tiempo de secado de 12 hrs., y un flujo de  $0.35 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ , por lo que es el la temperatura a la que se realizara el secado de arándano en la comparación de ambos secadores.

## 8.5 Comparación energética y fisicoquímica del secado de arándano en el secador de bandejas eléctrico y el secador solar híbrido.

### 8.5.1 Análisis fisicoquímicos

Respecto a humedad no observamos diferencias significativas ya que el secado se prolongó hasta peso constante obteniendo parámetros de humedad similares para los diferentes tratamientos como se observa en la figura 69.

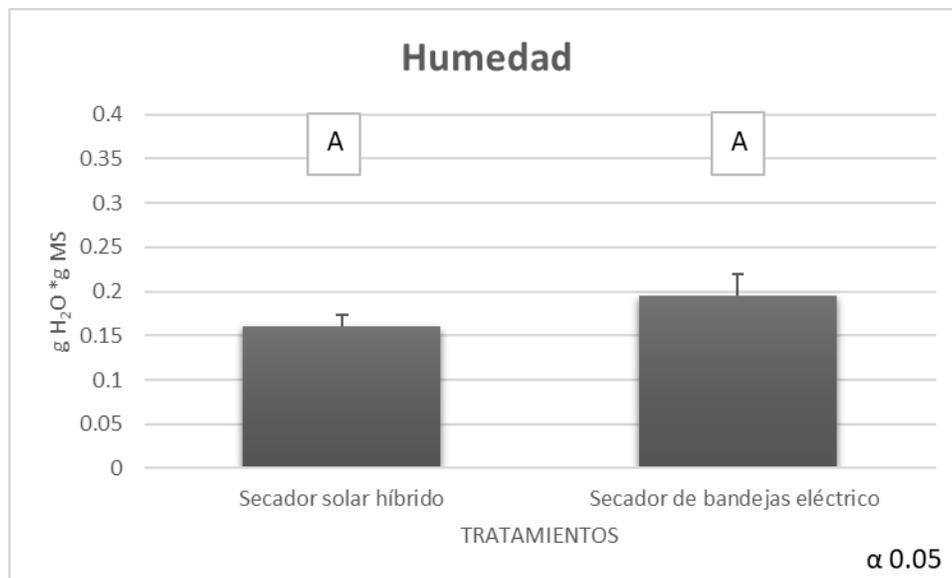


Figura 69. ANOVA de humedad del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

La actividad de agua del arándano fresco fue de alrededor de  $0.85(\pm 0.20)$ , para las muestras de los dos tipos de secadores, los valores de  $A_w$  fueron de  $0.36(\pm 0.01)$ , para el secador solar híbrido y  $0.2268(\pm 0.066)$  para el secador de bandejas, en este parámetro no se presentó diferencia significativa respecto a los tratamientos (Fig. 70) debido a que se buscó cumplir con estos parámetros.

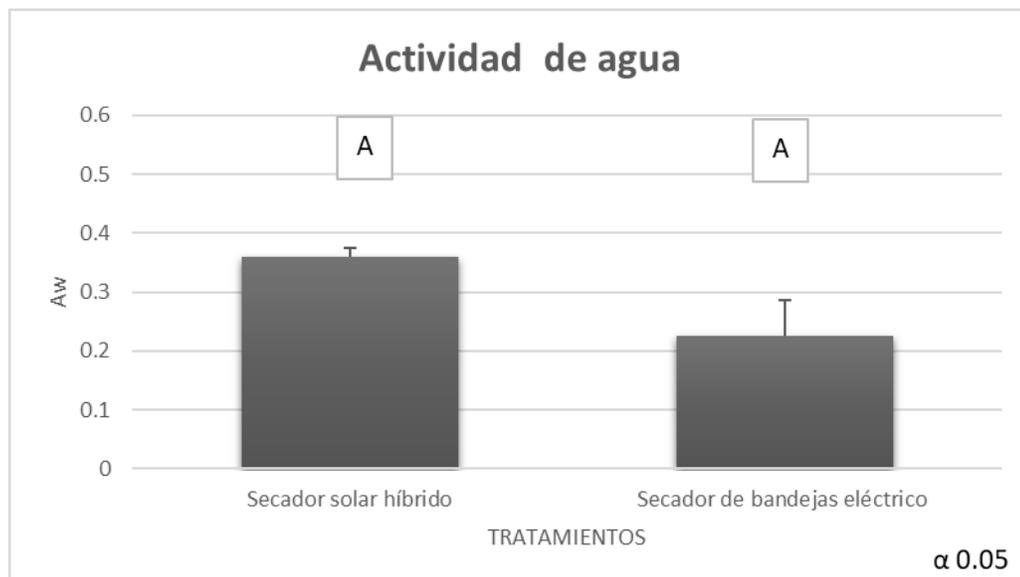


Figura 70. Actividad de agua del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

El valor obtenido de índice de higroscopicidad está relacionado con el porcentaje de sólidos solubles totales por lo que a mayor contenido de sólidos solubles y mayor valor de índice de higroscopicidad aumenta la retención de agua del producto seco, obtuvimos valores  $0.2088(\pm 0.011)$  g  $H_2O$  abs/100g MS para el secador de bandejas eléctrico y de  $0.2168(\pm 0.004)$  g  $H_2O$  abs/100g MS para el secador solar híbrido, tampoco se observó diferencia significativa entre los tratamientos como se observa en la figura 71.

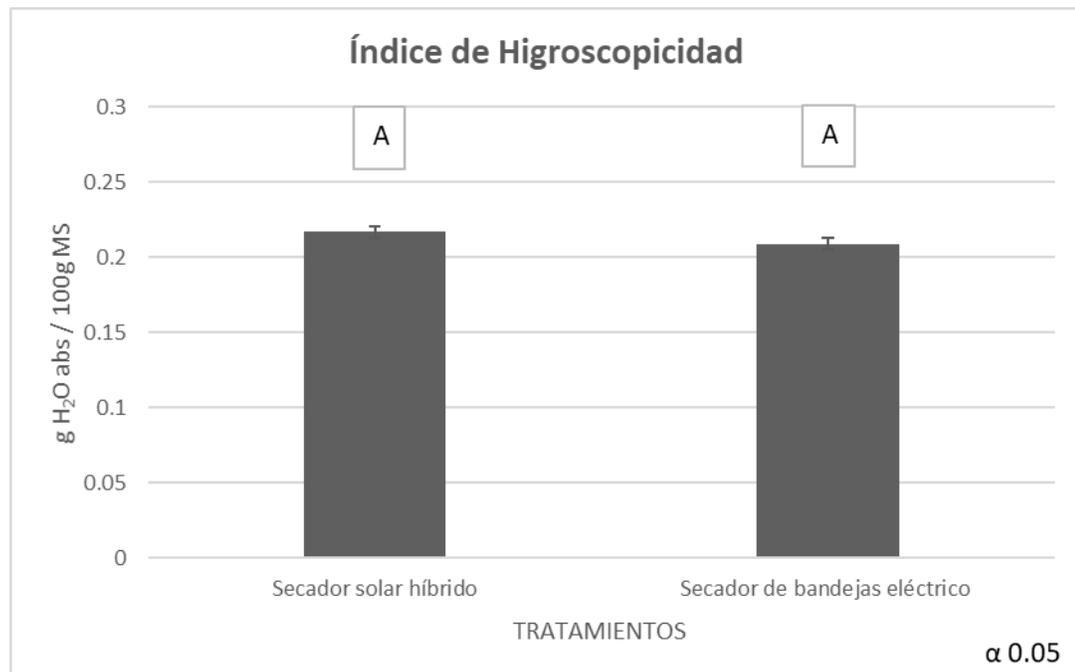


Figura 71. ANOVA de índice de higroscopicidad del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

Respecto al *pH* el efecto sobre el tratamiento de los arándanos fue significativo entre los secadores con valores de  $3.18(\pm 0.064)$  para el secador de bandejas eléctrico y de  $3.65(\pm 0.062)$  para el secador solar híbrido, como se observa en la figura 72 y valores de *pH* bajo ( $pH < 6$ ) son beneficiosos para mantener la estabilidad de las antocianinas de los arándanos (Liu, y col., 2018), el valor de *pH* fue beneficioso para mantener la estabilidad de las antocianinas de los arándanos y los resultados coinciden con la mayoría de los estudios publicados sobre la estabilidad de las antocianinas (Abonce y col., 2018).

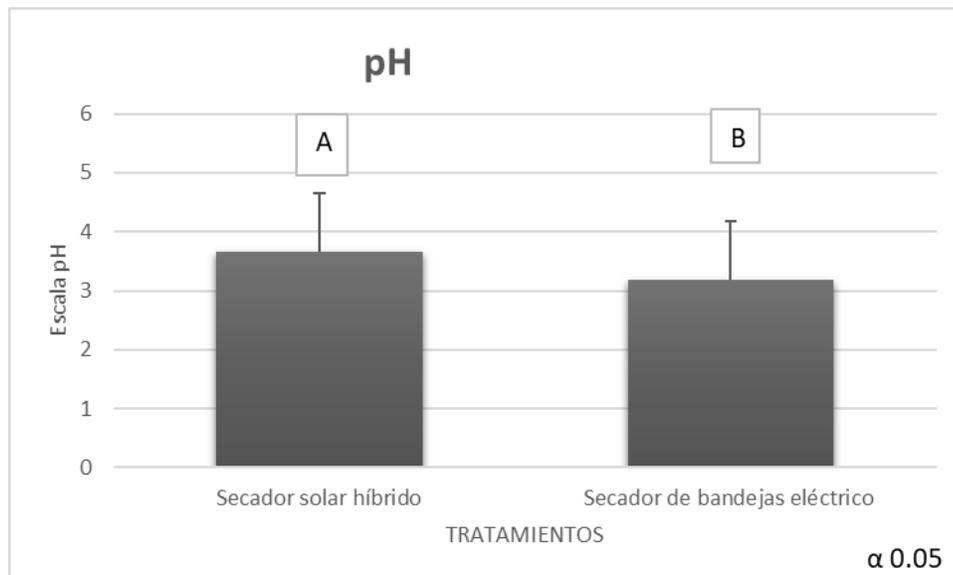


Figura 72. ANOVA de pH del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

Durante el proceso de secado encontramos diferencias significativas para sólidos solubles totales entre los tratamientos con valores de  $65.44(\pm 1.01)$  °Brix en el secador de bandejas eléctrico y de  $52.5(\pm 0.707)$  °Brix en el secador solar híbrido, como se muestra en la figura 73, esto, discrepa respecto a lo reportado ya que ambos se sometieron a la misma temperatura por lo que la diferencia puede provenir de la variación de la fruta utilizada en el experimento (Vuarant, 2014).



Figura 73. ANOVA de solidos solubles del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

El contenido de azúcares reductores fue significativo, aunque los parámetros de secado fueron los mismos (Fig. 74).

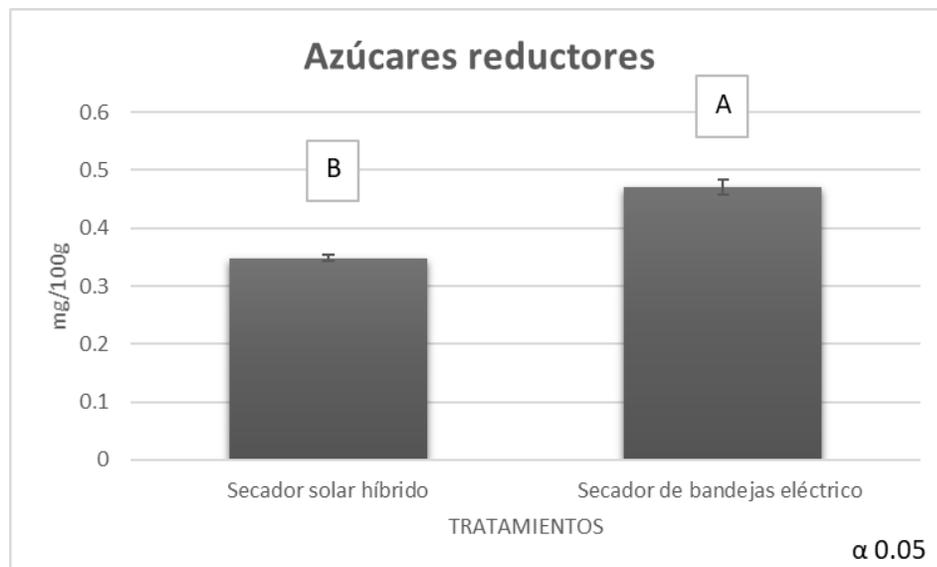


Figura 74. ANOVA de azúcares reductores del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

Un factor fundamental en los arándanos es el contenido de antocianinas ya que es una de las propiedades más distintivas de este fruto, en este caso encontramos diferencia significativa con valores de  $43.13(\pm 0.39)$  mg/100g para el secador solar híbrido y de  $51.76(\pm 1.47)$  mg/100g para el secador de bandejas eléctrico, como se observa en la figura 75 (Saftner y col., 2008).

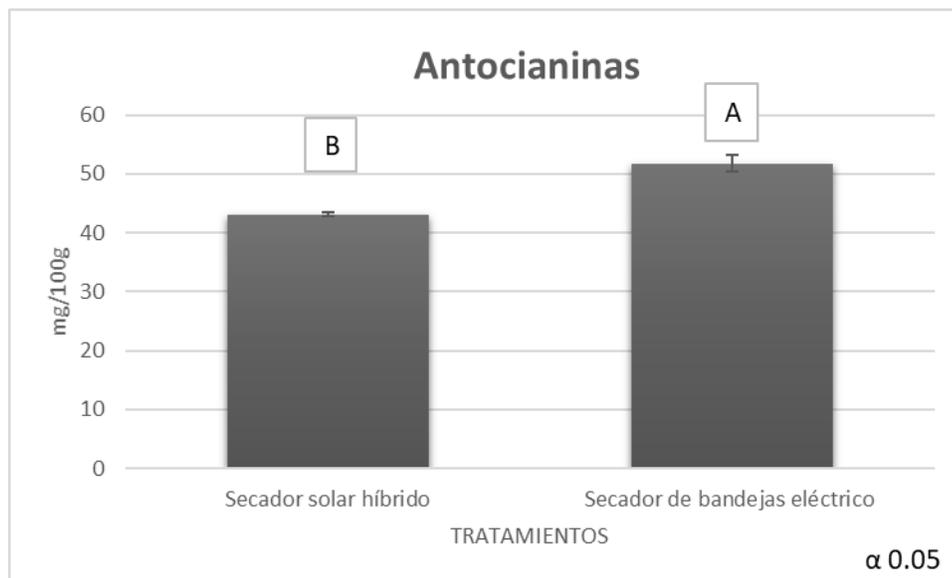


Figura 75. ANOVA de antocianinas del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

### 8.5.2 Evaluación energética

En relación a la evaluación energética, el precalentamiento del secador de bandejas fue en un tiempo de  $15.52(\pm 2.38)$  min para el secador de bandejas eléctrico y de  $72.15(\pm 10.03)$  min para el secador solar híbrido, observando una gran diferencia



en el tiempo de precalentamiento cabe resaltar que al momento de iniciar el precalentamiento la temperatura ambiente del secador de bandejas fue de  $13.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  de cabina de  $11\text{ }^{\circ}\text{C}$  y se encuentra adentro del edificio de la Planta Piloto de Procesos Agroindustriales del Instituto Tecnológico de Tlajomulco, y el secador solar híbrido al iniciar el precalentamiento tuvo una temperatura ambiente de  $6.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  y en la cabina  $3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , debido a que el secador se encuentra a la intemperie; lo cual, es un factor que influye en el tiempo de precalentamiento, que en este caso es favorable para el secador de bandejas eléctrico.

El tiempo de trabajo obtenido para ambos secadores fue de  $21\%$  (Fig. 76) para el secador de bandejas y de  $55\%$  del secador solar híbrido (Fig. 77), observando claramente una gran diferencia, este parámetro puede estar afectado por 2 aspectos importantes, primeramente el flujo de trabajo ya que el secador de bandejas trabajó con un flujo de  $0.35\text{ m}^3\text{ min}^{-1}$  y el secador solar híbrido con un flujo de  $5.1\text{ m}^3\text{ min}^{-1}$  lo que significa que el secador solar híbrido calentó mayor cantidad de aire; por lo cual, está relacionado en el porcentaje de trabajo, además, el tipo de controlador utilizado para el secador de bandejas es un control PID y para el secador solar híbrido es un ON-OFF, que de acuerdo a lo reportado el PID tiene una respuesta en menor tiempo mejorando la eficiencia de los equipos (Moreano y col., 2019).

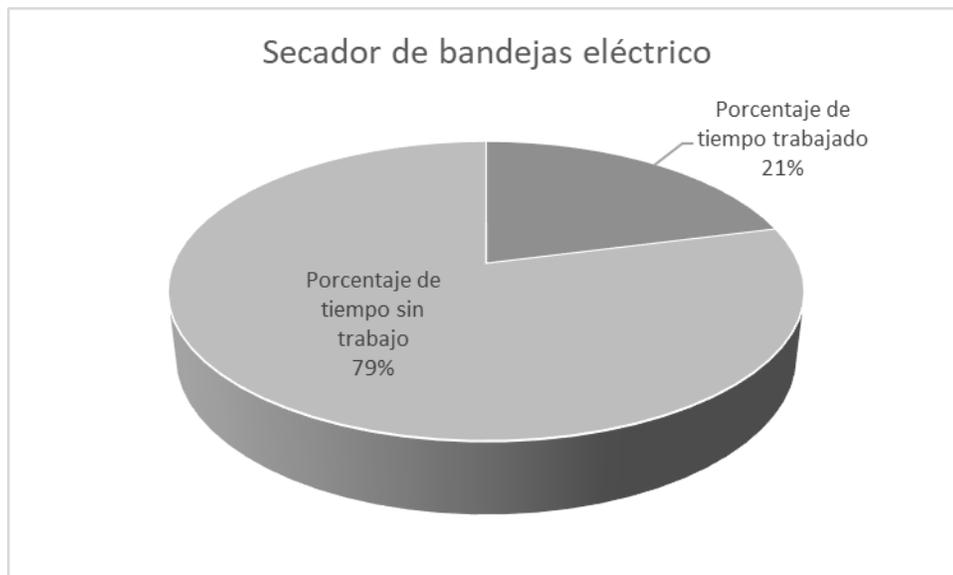


Figura 76. Diagrama de relación de trabajo (uso de energía eléctrica) del secador de bandejas eléctrico (Fuente propia).

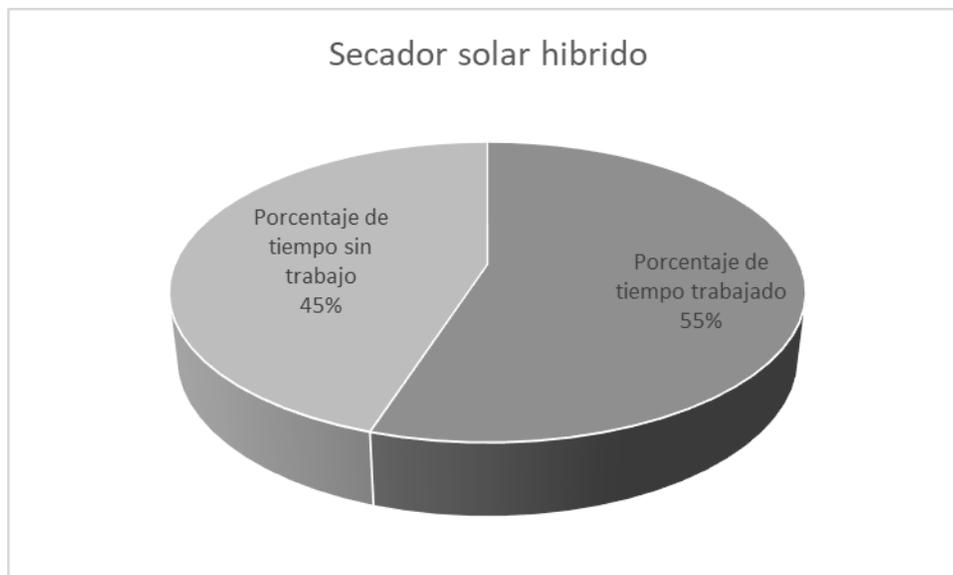


Figura 77. Diagrama de relación de trabajo (uso de energía eléctrica) del secador solar híbrido (Fuente propia).



Para finalizar, el consumo de energía eléctrica para el secador de bandejas eléctrico fue de \$ 112.49 pesos (MXN) y para el secador solar híbrido fue de \$ 147.5 pesos (MXN) para un secado de 12 hrs., teniendo una diferencia de \$ 35.01 pesos (MXN) (Cuadro 21); sin embargo, estas pruebas realizadas se establecieron en el mes de diciembre del 2021, con una temperatura promedio de 20.24 °C, recordando el análisis climatológico de Tlajomulco de Zúñiga de esta tesis podemos observar (Fig. 22) que nos encontrábamos en la etapa de invierno una de las más desfavorables para el secado solar debido a las bajas temperaturas, por lo que podemos esperar que en las demás estaciones se reduzca el consumo energético.



**Cuadro 22. Costo de energía eléctrica de los secadores.**

Costo de energía eléctrica									
Tipo de secador	Porcentaje de tiempo sin trabajo	Porcentaje de tiempo trabajado	Costo de precalentamiento del secador	Costo de un secado de 12 hrs.	Costo total del secado	Watts	Corriente (A)	Radiación Solar (W/m <sup>2</sup> )	Temperatura Ambiente °C)
Secador eléctrico de bandejas	79%	21%	\$ 8.65	\$ 103.84	\$ 112.49	9583.09	20.763	847.65	20.24
Secador solar híbrido	45%	55%	\$ 22.68	\$ 124.82	\$ 147.50	5236	16.95	847.65	20.24



En razón a la comparación de ambos secadores evaluados en el mes de diciembre (Invierno) teniendo un costo mayor de \$ 35.01 pesos (MXN) el secador solar híbrido comparado con el secador de bandejas eléctrico ( $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0.35\text{ m}^3\text{ min}^{-1}$ ), y con características fisicoquímicas del producto seco similares, sin embargo, el aprovechamiento de la energía solar es mejor en otras estaciones del año debido a que en la estación del año en la cual se realizaron las evaluaciones, nos encontrábamos a las temperaturas ambientes más bajas de todo el año en nuestra ubicación, por lo que esta diferencia disminuiría a lo largo del año. Otro factor importante, es el recambio de aire del secador solar híbrido, ya que por el CSH calentó 14.67 veces más aire que el secador de bandejas, por lo que la integración de un sistema de control para el flujo de aire en relación a la temperatura optimizaría el costo de la energía en el secador solar híbrido; debido, a que el flujo establecido en el CSH es mayor a los valores establecidos en literatura ( $1\text{ m}^3\text{ min}^{-1}$ ), pero un flujo alto es necesario para remover el aire caliente del CSH en ciertos periodos.



## IX. CONCLUSIONES

En general el proyecto de investigación demuestra que el uso de energía solar a través de los CSH son una opción viable para los procesos de secado de alimentos, particularmente de arándano en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, debido a la característica es que integra dos fuentes de energía (solar y eléctrica), combinando las ventajas de los CPP y el calentamiento con energía eléctrica, logrando una mayor concentración de temperatura en el CSH, control del proceso y reduciendo la variabilidad que puede presentar debido a las condiciones climáticas para poder ser utilizado en procesos de secado continuo. El CSH propuesto, sin sistema auxiliar de calentamiento logra un desempeño térmico satisfactorio respecto al uso de energía solar, con una eficiencia de 42 % con un flujo de  $2 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ , respecto a la hibridación del CPP con RE se logró la temperatura propuesta de  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  con un flujo de  $5.1, \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$  evaluado en el mes de diciembre. La utilización del método estadístico de regresión de componentes principales resulto útil para generar el este modelo que es capaz de predecir la *TS* del CSH conociendo las condiciones ambientales, este resultado permitiría programar o controlar el encendido del sistema auxiliar e incrementar la eficiencia del desempeño del dispositivo; además, las cinéticas de secado y análisis fisicoquímicos y sensoriales realizados en el secado de arándano, determinan la temperatura óptimo de secado para el arándano (*V. corymbosum*) a  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  en un secador de bandejas con un tiempo de secado de 12 horas y un flujo de  $0.35 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ . No se encuentra diferencias entre los parámetros de consumo de energía entre ambos secadores.

Se sugiere optimizar el CSH con materiales más eficientes a los propuestos y agregar tecnologías desarrolladas en otras investigaciones para la optimización del aprovechamiento de la energía solar y realizar un análisis profundo en la eficiencia térmica de los materiales que integran al CSH y el control de temperatura.



## X. BIBLIOGRAFÍA

- Abonce López, A. M., De la Rosa Lizárraga, R., and Sotelo Torres, A. M. (2018). Extracción e identificación de antocianinas.
- Abubakar, S., Umaru, S., Kaisan, M. U., Umar, U. A., Ashok, B., and Nanthagopal, K. (2018). Development and performance comparison of mixed-mode solar crop dryers with and without thermal storage. *Renewable Energy* 128, 285-298.
- Abuşka, M., Şevik, S., and Kayapunar, A. (2019). A comparative investigation of the effect of honeycomb core on the latent heat storage with PCM in solar air heater. *Applied Thermal Engineering* 148, 684-693.
- Aguilera-Ortíz, M., Alanis-Guzmán, M. G., García-Díaz, C. L., and Hernández-Brenes, C. M. (2009). Caracterización y estabilidad de antocianinas de higo, variedad Mission. *Universidad y ciencia*, 25(2), 151-158.
- Ahmed, J., Sinha, N., and Hui, Y. (2011). Drying of vegetables: principles and dryer design. *Handbook of vegetables and vegetable processing*, 279-298.
- Al-damook, A. and Khalil, W. H. (2017). Experimental evaluation of an unglazed solar air collector for building space heating in Iraq. *Renewable Energy*. 112, 498-509.
- Almanza, R., Cajjgal, E. and Barrientos, J. (1997) Actualización de los Mapas de Irradiación Global solar en la República Mexicana. Reportes de insolación de México. *Southwest Technology Development Institute, NMSU*, 1999.
- Amelio, M.R. (2011). Energía fotovoltaica: Presente y futuro. *Revista de Energías Renovables* 9, 28.
- Arteaga, A., and Arteaga, H. (2016). Optimización de la capacidad antioxidante, contenido de antocianinas y capacidad de rehidratación en polvo de arándano



(*Vaccinium corymbosum*) microencapsulado con mezclas de hidrocoloides. *Scientia Agropecuaria*, 7(SPE), 191-200.

Arunsandeeep, G., Lingayat, A., Chandramohan, V. P., Raju, V. R. K., and Reddy, K. S. (2018). A numerical model for drying of spherical object in an indirect type of solar dryer and estimating the drying time at different moisture level and air temperature. *International Journal of Green Energy* 15(3), 189-200.

Atalay, H. (2020). Assessment of energy and cost analysis of packed bed and phase change material thermal energy storage systems for the solar energy-assisted drying process. *Solar Energy* 198, 124-138.

Atarama Montero, N. H. (2019). Evaluación del potencial de energía solar para generación de energía eléctrica, como una alternativa para disminuir el uso de combustibles fósiles, en la región Piura.

Ávila, C. L. D. S., Pinto, J. C., Oliveira, D. P., and Schwan, R. F. (2012). Aerobic stability of sugar cane silages with a novel strain of *Lactobacillus* sp. isolated from sugar cane. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 41(2), 249-255.

Ayinde, K., Lukman, A. F., Alabi, O. O., and Bello, H. A. (2020). A new approach of principal component regression estimator with applications to collinear data. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 13(7), 1616-1622.

Balcells, J., Autonell, J., and Barra, V. (2010). Eficiencia en el uso de la energía eléctrica. Marcombo.de Jalisco,

Bandara, W. B. M. A. C., Amarasekara, B. K., and Rupasinghe, C. P. (2018). Assessment of the possibility of unglazed transpired type solar collector to be used for drying purposes: a comparative assessment of efficiency of unglazed transpired



type solar collector with glazed type solar collector. *Procedia engineering*, 212, 1295-1302.

Barbosa-Cánovas, G. V., and Vega-Mercado, H. (1996). *Dehydration of foods*. Springer Science and Business Media.

Ben-Lagha, A., Dudonné, S., Desjardins, Y., and Grenier, D. (2015). Wild blueberry (*Vaccinium angustifolium* Ait.) polyphenols target *Fusobacterium nucleatum* and the host inflammatory response: Potential innovative molecules for treating periodontal diseases. *Journal of agricultural and food chemistry*, 63(31), 6999-7008.

Bennamoun, L. (2011). Reviewing the experience of solar drying in Algeria with presentation of the different design aspects of solar dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(7), 3371-3379.

Berenson, M. L., Levine, D. M., y Krehbiel, T. C. (2001). Cap. 9: Regresión lineal simple y correlación. *Estadística para administración*, 2, 504.

Berkowitz, D. E., Malagié, M., Jensen, G., Smith, J. G. D. L., Svagr, J. J., Spiegel, J., ... and de Andrade, A. V. (2012). Industria alimentaria. *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT)*.

Bokor, B., Akhan, H., Eryener, D., and Kajtár, L. (2019). The Potential of Solar Air Heating in the Turkish Industrial Sector. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 63(1), 57-66.

Borode, A., Ahmed, N., and Olubambi, P. (2019). A review of solar collectors using carbon-based nanofluids. *Journal of Cleaner Production*, 118311.

Bosomtwe, A., Danso, J. K., Osekre, E. A., Opit, G. P., Mbata, G., Armstrong, P., and Akowuah, J. O. (2019). Effectiveness of the solar biomass hybrid dryer for drying and disinfestation of maize. *Journal of Stored Products Research* 83, 66-72.



- Brito-Vallina, M. L., Alemán-Romero, I., Fraga-Guerra, E., Para-García, J. L., and Arias-de Tapia, R. I. (2011). Papel de la modelación matemática en la formación de los ingenieros. *Ingeniería Mecánica*, 14(2), 129-139.
- Camas-Nafate, M. P., Alvarez-Gutiérrez, P., Valenzuela-Mondaca, E., Castillo-Palomera, R., and Perez-Luna, Y. D. C. (2019). Improved agricultural products drying through a novel double collector solar device. *Sustainability* 11(10), 2920.
- Çamdevýren, H., Demýr, N., Kanik, A., and Keskýn, S. (2005). Use of principal component scores in multiple linear regression models for prediction of Chlorophyll-a in reservoirs. *Ecological Modelling*, 181(4), 581-589.
- Carley, S. (2009). State renewable energy electricity policies: An empirical evaluation of effectiveness. *Energy policy* 37(8), 3071-3081.
- Carmona, F. (2018). Un análisis con R Datos multivariantes. Departament d'Estadística.
- Castañeda-Ovando, A., Galán-Vidal, C. A., Pacheco-Hernández, M. D. L., Rodríguez, J. A., and Páez-Hernández, M. E. (2009). Evaluación del contenido de metales y su efecto en la estabilidad de antocianinas Metal content evaluation and its effect on the stability of anthocyanins. *CyTA-Journal of Food*, 7(3), 225-232.
- Cerron Inga, S. A., and Junchaya Verastegui, J. A. (2019). Influencia de la temperatura del aire en la velocidad de secado de quinua germinada en un secador de bandejas.
- Charvát, P., Klimeš, L., Pech, O., and Hejčík, J. (2019). Solar air collector with the solar absorber plate containing a PCM—Environmental chamber experiments and computer simulations. *Renewable Energy* 143, 731-740.
- Chen, N., Dai, J., Yuan, X., Gui, W., Ren, W., and Koivo, H. N. (2018). Temperature prediction model for roller kiln by ALD-based double locally weighted kernel principal



component regression. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 67(8), 2001-2010.

Clark, S., Costello, M., Drake, M., and Bodyfelt, F. (Eds.). (2009). *The sensory evaluation of dairy products*. Springer Science and Business Media.

Coa Clemente, R. (2019). Consecuencias de alta multicolinealidad en un modelo de regresión lineal. *Revista Varianza*, 22.

Cortés, J., Bielsa, N., Cobo, E., Muñoz, P., y González, A. (2015). Regresión lineal simple. *Bioestadística para no estadísticos*.

Deduy Guerra, I. (2019). Regresión sobre componentes principales.

*Del Valle Moreno, J., and Guerra Bustillo, W. (2012). La multicolinealidad en modelos de regresión lineal múltiple. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 21(4), 80-83.*

Dergal, S. B., Rodriguez, H. B., and Morales, A. A. (2006). *Química de los alimentos* (No. 04; TX354 B3 2006.). Pearson educación.

Dewinter, F. (Ed.). (1990). *Solar collectors, energy storage, and materials* (Vol. 5). MIT press.

Díaz Arenas, C. A., and Guerrero Montero, J. I. (2017). *Diseño de sistema de ventilación accionado por energía solar para uso en deshidratadores solares*.

Díaz, R. (2015) *Energía eléctrica sostenible a través de la energía solar térmica*. Instituto Politécnico Nacional-Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México, D.F. Tesis Profesional. 74.

Djørup, S., Thellufsen, J. Z., and Sorknæs, P. (2018). The electricity market in a renewable energy system. *Energy* 162, 148-157.



- Döring, T. (2016). AHEAD OF THE PACK-Solar, the new Gateway to the decentralized Energy System. Sulaiman, M. S., Abood, M. M., Sinnakaudan, S. K., Shukor, M. R., You, G. Q., and Chung, X. Z. (2019). Assessing and solving multicollinearity in sediment transport prediction models using principal component analysis. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 1-11.
- Dorouzi, M., Mortezapour, H., Akhavan, H. R., and Moghaddam, A. G. (2018). Tomato slices drying in a liquid desiccant-assisted solar dryer coupled with a photovoltaic-thermal regeneration system. *Solar Energy* 162, 364-371.
- Douglas, E. M., Jacobs, J. M., Sumner, D. M., and Ray, R. L. (2009). A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types. *Journal of Hydrology*, 373(3-4), 366-376.
- Drake, M. A. (2007). Invited review: Sensory analysis of dairy foods. *Journal of dairy science*, 90(11), 4925-4937.
- Duffie John, A., and Beckman William, A. (1991). Solar engineering of thermal process. BW Duffie John, *Solar Engineering of Thermal Process*. 2a Ed., Wiley-Interscience.
- Educa, E. (2014). *Energía eléctrica y medio ambiente*.
- El-Hage, H., Herez, A., Ramadan, M., Bazzi, H., and Khaled, M. (2018). An investigation on solar drying: A review with economic and environmental assessment. *Energy* 157, 815-829.
- El-Khadraoui, A., Bouadila, S., Kooli, S., Farhat, A., and Guizani, A. (2017). Thermal behavior of indirect solar dryer: Nocturnal usage of solar air collector with PCM. *Journal of cleaner production* 148, 37-48.



El-Sebaï, A. A. and Shalaby, S. M. (2017). Experimental Investigation of Drying Thymus Cut Leaves in Indirect Solar Dryer with Phase Change Material. *Journal of Solar Energy Engineering* 139(6).

*Encuesta de Consumos Energéticos 2015. – INE.*  
[https://www.ine.es/prensa/ece\\_2015.pdf](https://www.ine.es/prensa/ece_2015.pdf)

Ernest and Young Organization (2012). Renewable Energy Country Attractiveness Indices—May 2012 Issue 33. EYGM, DE0331, Reino Unido.

Espinoza, J. (2016). Innovación en el deshidratado solar. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería* 24(ESPECIAL), 72-80.

Essalhi, H., Tadili, R., and Bargach, M. N. (2017). Conception of a Solar Air Collector for an Indirect Solar Dryer. Pear Drying Test. *Energy Procedia* 14, 29-33.

FAO (2017). Crop production data. <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E>

Fito-Maupoe, P. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Editorial

Fritzen-Freire, C. B., Prudêncio, E. S., Amboni, R. D., Pinto, S. S., Negrão-Murakami, A. N., and Murakami, F. S. (2012). Microencapsulation of bifidobacteria by spray drying in the presence of prebiotics. *Food Research International*, 45(1), 306-312.

Fudholi, A. and Sopian, K. (2019). A review of solar air flat plate collector for drying application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 102, 333-345.

Fudholi, A., Sopian, K., Bakhtyar, B., Gabbasa, M., Othman, M. Y., and Ruslan, M. H. (2015). Review of solar drying systems with air based solar collectors in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51, 1191-1204.

GALIANA, A. A. (2019). Real Academia Española.



García, M., Ulloa, H., Ramírez, H., Fuentes, M., Arias, S. and Espinoza, M. (2014) Comportamiento de los vientos dominantes y su influencia en la contaminación atmosférica en la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 1, 97-116.

García-Badell, J. J. (1983). Cálculo de la energía solar (No. 40). IGME.

García-Valladares, O., Ortiz, N. M., Pilatowsky, I., and Menchaca, A. C. (2020). Solar thermal drying plant for agricultural products. Part 1: Direct air heating system. *Renewable Energy* 148, 1302-1320.

Garzón, G. A. (2008). Las antocianinas como colorantes naturales y compuestos bioactivos: revisión. *Acta biológica colombiana*, 13(3), 27-36.

Gholampour, M. and Ameri, M. (2016). Energy and exergy analyses of Photovoltaic/Thermal flat transpired collectors: Experimental and theoretical study. *Applied energy* 164, 837-856.

Gobierno del Estado de Jalisco (2018). Ubicación geográfica de Jalisco. <http://www.Jalisco.gob.mx>

Gómez, A. E. Á., Fandiño, J. M. M., and Sarmiento, J. F. B. (2010). Evaluación energética de un colector solar de placa plana de doble cubierta. *Ingeniería y Desarrollo* 27, 93-112.

Gómez, J. (2011) Atlas Agroclimático de la República Mexicana. Departamento de Geografía, División de estudios de posgrado, Facultad de filosofía y letras. UNAM, México.

González, A., Loza, L. and Gómez, J. (2010) Características climáticas generales en la Zona Metropolitana de Guadalajara. 16.



- González-Bayón, J. J., Borrajo-Pérez, R., and Koulibaly, A. (2016). Análisis paramétrico del desempeño térmico de colectores solares planos de aire de circulación natural. *Ingeniería Mecánica*, 19(2), 68-77.
- Goud, M., Reddy, M. V. V., Chandramohan, V. P., and Suresh, S. (2019). A novel indirect solar dryer with inlet fans powered by solar PV panels: Drying kinetics of *Capsicum Annum* and *Abelmoschus esculentus* with dryer performance. *Solar Energy* 194, 871-885.
- Guerrero, S. C. (2017). Una metodología para el tratamiento de la multicolinealidad a través del escalamiento multidimensional. *Ciencia en Desarrollo* 8(2), 9-24.
- Guzmán, M. F. S., Ruiz, D. D. P., Martínez, J. F. G., Sierra, M. L. R., and Torres, S. N. C. (2017). Análisis prospectivo del uso de energía solar: Caso Colombia. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes* 71, 85-93.
- Hangun-Balkir, Y., and McKenney, M. L. (2012). Determination of antioxidant activities of berries and resveratrol. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 5(2), 147-153.
- Hao, W., Zhang, H., Liu, S., Mi, B., and Lai, Y. (2021). Mathematical modeling and performance analysis of direct expansion heat pump assisted solar drying system. *Renewable Energy* 165, 77-87.
- Hartmann, S. (2008). Modeling in philosophy of science. In M. and. Frauchiger, Representation, evidence, and justifi cation: Themes from Suppes (pp. 95-122). Frankfurt, Germany: Ontos Verlag.
- Hashim, N., Daniel, O., and Rahaman, E. (2014). A preliminary study: kinetic model of drying process of pumpkins (*Cucurbita moschata*) in a convective hot air dryer. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 2(2), 345-352.



Hernández, R. V. (2021). Procesos de modelación matemática y modelación estadística en tiempos contemporáneos: similitudes y diferencias. *Revista Boletín Redipe*, 10(7), 334-356.

Hidalgo, G.I, Almajano, M.P., (2017). Red fruits: extraction of antioxidants, phenolic content, and radical scavenging determination: A review. Chemical Engineering Department, Universitat Politècnica de Catalunya.

Huamán, L. Q. (2018). Estimación de la radiación solar global en la ciudad de Puno mediante la aplicación del modelo Bristow y Campbell. *Ñawparisun-Revista de Investigación Científica*, 1(1).

Instituto de Astronomía y Meteorología (2010) Estación meteorológica y base de datos climatológicos. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías. Universidad de Guadalajara, Jalisco, México.

Irena, P. (2016). Leadership and management development: role, úlohy a kompetence managerů a lídrů. Grada Publishing as.

Jadhav, N. H., Kashid, D. N., and Kulkarni, S. R. (2014). Subset selection in multiple linear regression in the presence of outlier and multicollinearity. *Statistical Methodology*, 19, 44-59.

Jaume, M. J. R., Catalá, R. M., and Universitat d'Alacant. (2001). Estadística informàtica: casos y ejemplos con el SPSS. Universidad de Alicante.

Jayaraman, K. S., and Das Gupta, D. K. (2006). Handbook of industrial drying. (pp. 606–630). UK: Francis and Taylor Group LLC.

Jolliffe, I. (2005). Principal component analysis. Encyclopedia of statistics in behavioral science.



- Karam, M. C., Petit, J., Zimmer, D., Djantou, E. B., and Scher, J. (2016). Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review. *Journal of Food Engineering* 188, 32-49.
- Karki, S., Haapala, K. R., and Fronk, B. M. (2019). Technical and economic feasibility of solar flat-plate collector thermal energy systems for small and medium manufacturers. *Applied Energy* 254, 113649.
- Kicsiny, R. (2014). Multiple linear regression-based model for solar collectors. *Solar Energy*, 110, 496-506.
- Kumar, C., Karim, M. A., and Joardder, M. U. (2014). Intermittent drying of food products: A critical review. *Journal of Food Engineering* 121, 48-57.
- Labandeira, X., Labeaga, J. M., and López-Otero, X. (2012). Estimation of elasticity price of electricity with incomplete information. *Energy Economics*, 34(3), 627-633.
- Lehrer, R., and English, L. (2018). Introducing children to modeling variability. In D. M. Ben-Zvi, In *International handbook of research in statistics education* (pp. 229-260). Cham: Springer
- Lever, J., Krzywinski, M., and Altman, N. (2017). Points of significance: Principal component analysis. *Nature methods*, 14(7), 641-643.
- Lingayat, A., Chandramohan, V. P., and Raju, V. R. K. (2017). Design, development, and performance of indirect type solar dryer for banana drying. *Energy Procedia* 109, 409-416.
- Liu, Y., Tikunov, Y., Schouten, R. E., Marcelis, L. F., Visser, R. G., and Bovy, A. (2018). Anthocyanin biosynthesis and degradation mechanisms in Solanaceous vegetables: a review. *Frontiers in Chemistry*, 6, 52.



López Pineda, G. (2017). *Modelos de regresión para datos funcionales por la metodología de Kernel Reproductor en Espacios de Hilbert* (Master's thesis, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla).

López-Vidaña, E. C., Cesar-Munguía, A. L., García-Valladares, O., Pilatowsky, I., and Brito-Orosco, R. (2020). Thermal performance of a passive, mixed-type solar dryer for tomato slices (*Solanum lycopersicum*). *Renewable Energy* 147, 845-855.

Luan, Y., He, L., Ostendorf, M., and Hajishirzi, H. (2018). Multi-task identification of entities, relations, and coreference for scientific knowledge graph construction. arXiv preprint arXiv:1808.09602.

M'hiri, N., Ioannou, I., Boudhrioua, N. M., and Ghoul, M. (2015). Effect of different operating conditions on the extraction of phenolic compounds in orange peel. *Food and bioproducts processing*, 96, 161-170.

Maltini, E., Torreggiani, D., Venir, E., and Bertolo, G. (2003). Water activity and the preservation of plant foods. *Food Chemistry*, 82(1), 79-86.

Martínez, J. L. P., Herrera, R. V., Díaz, J. A. G., and Fernández, J. A. G. (2016). Deshidratación de alimentos utilizando energía solar térmica. *Cultura Científica y Tecnológica* 50.

Martínez, P. R. (2009). *Energía solar térmica: técnicas para su aprovechamiento* (Vol. 4). Marcombo.

Martín-Gómez, J., Varo, M. Á., Mérida, J., and Serratos, M. P. (2020). Influence of drying processes on anthocyanin profiles, total phenolic compounds, and antioxidant activities of blueberry (*Vaccinium corymbosum*). *LWT*, 120, 108931.

Mazza, G., and Brouillard, R. (1987). Recent developments in the stabilization of anthocyanins in food products. *Food chemistry*, 25(3), 207-225.



- Montero, I., Miranda, M. T., Sepúlveda, F. J., Arranz, J. I., Rojas, C. V., and Nogales, S. (2015). Solar dryer application for olive oil mill wastes. *Energies* 8(12), 14049-14063.
- Moreano, G. V., Arregui, C. D., Tenesaca, C. G., and Pilco, H. J. (2019). Rendimiento y eficiencia de distintas técnicas de control en un calefón eléctrico. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, (22), 90-99.
- Moyano, M. B., Galvan, J., Rios De Gonzalez, L., and Paz, C. (2019). Comercialización y competitividad del arándano argentino. Ediciones INTA.
- Moyls, A. L. (1981). Drying of apple purees. *Journal of Food science*, 46(3), 939-942.
- Mujumdar, A. S., and Devahastin, S. (2000). Fundamental principles of drying. Exergex, Brossard, Canada, 1(1), 1-22.
- Murali, S., Amulya, P. R., Alfiya, P. V., Delfiya, D. A., and Samuel, M. P. (2020). Design and performance evaluation of solar-LPG hybrid dryer for drying of shrimps. *Renewable Energy* 147, 2417-2428.
- Natarajan, K., Thokchom, S. S., Verma, T. N., and Nashine, P. (2017). Convective solar drying of *Vitis vinifera* and *Momordica charantia* using thermal storage materials. *Renewable energy* 113, 1193-1200.
- Navarro, O. (2009). Selección de variables en regresión componentes principales. *Energy and Technology for the America: Education, Innovation, Technology and Practice*.
- Núñez, R. Á., Pérez, B. R., Motzezak, R. H., and Chirinos, M. (2012). Contenido de azúcares totales, reductores y no reductores en *Agave cocui* Trelease. *Multiciencias*, 12(2), 129-135.



- Orna, J., Chuquín, N., Saquina, L., and Cueva, O. (2018). Diseño y construcción de una secadora automática para cacao a base de aire caliente tipo rotatorio para una capacidad de 500 kg. *Enfoque UTE*, 9(2), 159-174.
- Ortiz, J. E. D. (2005). Propuesta metodológica para determinar el potencial de humedad de un material granular a partir de la humedad relativa. *Ingeniería y Competitividad*, 7(1), 73-79.
- Ortiz-Hernandez, A. A., Araiza-Esquivel, M., Delgadillo-Ruiz, L., Ortega-Sigala, J. J., Durán-Muñoz, H. A., Mendez-Garcia, V. H., and Vega-Carrillo, H. R. (2020). Physical characterization of sunflower seeds dehydrated by using electromagnetic induction and low-pressure system. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 60, 102285.
- Ostle, B. (1973). *Estadística aplicada* (p. 629). Limusa.
- Paniagua, A. C., East, A. R., and Heyes, J. A. (2014). Interaction of temperature control deficiencies and atmosphere conditions during blueberry storage on quality outcomes. *Postharvest biology and technology*, 95, 50-59.
- Pareja, M. (2010). *Radiación solar y su aprovechamiento energético*. Marcombo SA, Barcelona España.
- Parikh, D. and Agrawal, G. D. (2012). Solar drying in hot and dry climate of Jaipur. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*. 1(4): 224-231.
- Park, H. P., and Jung, J. H. (2018). Load-adaptive modulation of a series-resonant inverter for all-metal induction heating applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(9), 6983-6993.



Parreño, J., Lara, O., Jumbo, R., Caicedo, H., and Sarzosa, D. (2020). Diseño de un módulo de energía solar como estrategia de ahorro energético y disminución de la emisión de CO<sup>2</sup>. *Agroindustria, Sociedad Y Ambiente* 2(15), 4-18.

Patil, R., and Gawande, R. (2016). A review on solar tunnel greenhouse drying system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56, 196-214.

PER, (2005). Ministerio de industria, turismo y comercio. Instituto para la diversificación y ahorro de energía. Plan de energía renovable en España 2005-2010.

Phuon, V., Ramos, I. N., Brandão, T. R., and Silva, C. L. (2021). Assessment of the impact of drying processes on orange peel quality characteristics. *Journal of Food Process Engineering*, e13794.

Pillajo Corella, B. M., and Romero Velasco, F. I. (2015). Diseño y construcción de un horno calentado por resistencias eléctricas que trabaje en un rango de temperaturas entre 1000 a 1350 grados centígrados, y controlado por un sistema computarizado (Bachelor's thesis, Quito, 2016.).

Pirasteh, G. (2014). A review on development of solar drying applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31, 133-148.

Plaza Gálvez, L. F. (2016). Modelación matemática en ingeniería. *IE Revista de investigación educativa de la REDIECH*, 7(13), 47-57.

Pobiega, K., Igielska, M., Włodarczyk, P., and Gniewosz, M. (2021). The use of pullulan coatings with propolis extract to extend the shelf life of blueberry (*Vaccinium corymbosum*) fruit. *International Journal of Food Science and Technology*, 56(2), 1013-1020.



Poonia, S., Singh, A. K., and Jain, D. (2018). Design development and performance evaluation of photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid solar dryer for drying of ber (*Zizyphus mauritiana*) fruit. *Cogent Engineering* 5(1), 1507084.

Porter, J. R., Xie, L., Challinor, A. J., Cochrane, K., Howden, S. M., Iqbal, M. M., ..., and Mastrandrea, M. D. (2014). Food security and food production systems. In C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White (eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 485-533). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Quiñones, L., Gurbillon, M. B., Angeles, W. G., López, R. S., and Milla, M. (2019). Estimación de la radiación solar diaria para la ciudad de Bagua, región Amazonas, Perú. *Selecciones Matemáticas*, 6(2), 320-328.

Raeber, M., Amiras, P., and Heinzelmann, A. (2020, October). Analysis on the use of non-resonant inverters in single-phase induction heating applications. In *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 4315-4319). IEEE.

Rani, P., and Tripathy, P. P. (2021). Drying characteristics, energetic and exergetic investigation during mixed-mode solar drying of pineapple slices at varied air mass flow rates. *Renewable Energy* 167, 508-519.

Rath, S., Tripathy, A., and Tripathy, A. R. (2020). Prediction of new active cases of coronavirus disease (COVID-19) pandemic using multiple linear regression model.



Diabetes and Metabolic Syndrome: Clinical Research and Reviews, 14(5), 1467-1474.

Reque, P. M., Steckert, E. V., dos Santos, F. T., Danelli, D., Jablonski, A., Flôres, S. H., ... and de Jong, E. V. (2016). Heat processing of blueberries and its effect on their physicochemical and bioactive properties. *Journal of Food Process Engineering*, 39(6), 564-572.

Reque, P. M., Steffens, R. S., Jablonski, A., Flôres, S. H., Rios, A. D. O., and de Jong, E. V. (2014). Cold storage of blueberry (*Vaccinium* spp.) fruits and juice: Anthocyanin stability and antioxidant activity. *Journal of Food Composition and Analysis*, 33(1), 111-116.

Restrepo, L. F., and González, J. (2007). De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(2), 183-192.

Rizal, T. A. and Muhammad, Z. (2018). Fabrication and testing of hybrid solar-biomass dryer for drying fish. *Case studies in thermal engineering* 12, 489-496.

Romano, G., Nagle, M., Argyropoulos, D., and Müller, J. (2011). Laser light backscattering to monitor moisture content, soluble solid content, and hardness of apple tissue during drying. *Journal of Food Engineering*, 104(4), 657-662.

Romeva, C. R. (2010). Selección de materiales en el diseño de máquinas. *Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica*.

Saftner, R., Polashock, J., Ehlenfeldt, M., and Vinyard, B. (2008). Instrumental and sensory quality characteristics of blueberry fruit from twelve cultivars. *Postharvest Biology and Technology*, 49(1), 19-26.



Sałat, R., Awtoniuk, M., and Korpysz, K. (2017). Black-box identification of a pilot-scale dryer model: A Support Vector Regression and an Imperialist Competitive Algorithm approach. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 1559-1564.

Salguero-Parra, J. O. (2018). Comparativo del proceso de Implementación de la energía solar Brasil VS Colombia.

Samimi-Akhijahani, H. and Arabhosseini, A. (2018). Accelerating drying process of tomato slices in a PV-assisted solar dryer using a sun tracking system. *Renewable Energy* 123, 428-438.

Sarabia Escrivà, E. J., Soto Francés, V. M., and Pinazo Ojer, J. M. (2018). Fundamentos de radiación térmica.

Secretaria de energía (2015), Atlas de Potencial Solar y Eólico de la República Mexicana. Energías Renovables. <http://www.gob.mx>, 05-02-2020.

Mezquitillo Bocanegra, C., Ruiz Camacho, B., and Martínez Álvarez, O. (2014). Construcción y evaluación de un secador solar indirecto para el deshidratado de tomate saladette. *Química Hoy Chemistry Sciences*, 4(1), 12-16.

Secretaría de Energía (2016), Sistema de Información Energética, Balance Nacional de Energía, consultado en <http://sie.energia.gob.mx/>, 05-02-2020.

Servicio Meteorológico Nacional (2015) Comisión Nacional del Agua. smn. conagua. gob. mx. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Shalaby, S. M., Bek, M. A., and El-Sebaili, A. A. (2014). Solar dryers with PCM as energy storage medium: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33, 110-116.



Sharma, A. K., Sharma, C., Mullick, S. C., and Kandpal, T. C. (2017). Solar industrial process heating: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 78, 124-137.

Sharma, G. P., and Prasad, S. (2004). Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying. *Journal of Food engineering*, 65(4), 609-617.

Simonetti, M., Restagno, F., Sani, E., and Noussan, M. (2020). Numerical investigation of direct absorption solar collectors (DASC), based on carbon-nanohorn nanofluids, for low temperature applications. *Solar Energy* 195, 166-175.

Skrede, G., Wrolstad, R. E., and Durst, R. W. (2000). Changes in anthocyanins and polyphenolics during juice processing of highbush blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.). *Journal of food science*, 65(2), 357-364.

Sola, M. E., Teryn, S., Di Prátula, P. E., Cardillo, E., and Frechero, M. A. (2018). Captadores solares. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 9.

SOLAIRE, T. (2018). Energía solar térmica.

Solanki, A. and Pal, Y. (2020). Applications of a flat plate collector in dairy industries: a review. *International Journal of Ambient Energy* 1-9.

Solar Power Europe (2015). European Photovoltaic Industry Association. Estudio de los países con gran potencial solar ubicados dentro del cinturón global solar en el año 2010. <http://www.solarpowereurope.org>

Solar, E. (2020). Energía solar. *Acesso em*, 15(03), 202013-2014.

Strik, B. (2012, June). Organic blueberry production systems-Advances in research and industry. In *X International Symposium on Vaccinium and Other Superfruits* 1017 (pp. 257-267).



- Sulaiman, S., Hasan, A., Noor, A. M., Ismail, M. I., and Noordin, N. H. (2019). Proposed models for unit trust waqf and the parameters for their application. *ISRA International Journal of Islamic Finance*.
- Tarigan, E. (2018). Mathematical modeling and simulation of a solar agricultural dryer with back-up biomass burner and thermal storage. *Case studies in thermal engineering* 12, 149-165.
- Telis, V. R. N., and Sobral, P. J. A. (2001). Glass transitions and state diagram for freeze-dried pineapple. *LWT-Food Science and Technology*, 34(4), 199-205.
- Téllez, M. C., Sierra, J. C. O., Zárraga, F. L., and Álvarez, D. C. M. (2019). Nut drying of India cultivated in Campeche, México through direct solar technologies and under controlled conditions. *Revista Bistua Facultad de Ciencias Basicas* 17(3), 60-69.
- Thoma, U., Dominguez, G. and Bolaños, J.L. (2013) De lo Insostenible a lo Sustentable. Propuestas básicas, indicadores y casos de éxito para tomar decisiones sustentables en México. Editorial IEXE.
- Tlatelpa-Becerro, A., Rico-Martínez, R., Urquiza-Beltrán, G., and Calderón-Ramírez, M. (2020). Obtaining of *Crataegus Mexicana* leaflets using an indirect solar dryer. *Revista Mexicana De Ingeniería Química* 19(2), 669-676.
- Torres-Gallo, R., Miranda-Lugo, P. J., and Martínez-Padilla, K. A. (2017). Design and construction of a hybrid system of heating air by combustion of biomass and solar radiation, using phase change material (PCM) as a source of thermal storage, for cassava drying. *TecnoLógicas* 20(39), 71-83.
- Ulloa, H., García, M., Pérez, A., Meulenert, A. and Ávila, D. (2011) Clima y radiación solar en las grandes ciudades: zona metropolitana de Guadalajara (estado de Jalisco, México). *Investigaciones Geográficas*, 56, 165-175.



Ulloa-Godínez, H. H., García-Guadalupe, E. M., Ramírez-Sánchez, U. H., Regla-Carrillo, C. J., and Fajardo-Montiel, L. A. (2017). Solar radiation data for the state of Jalisco and Guadalajara metropolitan zone, Mexico. *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering*, 6(03), 205.

Valdés-Barrón, M. G., Bonifaz-Alfonzo, R., González-Cabrera, A. E., Estévez-Pérez, H. R., Rodríguez-Rasilla, I., Retama-Hernández, A., and Riveros-Rosas, D. (2020). Energía solar disponible en la ciudad de México. In CIES2020-XVII Congreso Ibérico e XIII Congreso Iberoamericano de Energía Solar (pp. 905-910). LNEG-Laboratorio Nacional de Energía y Geología.

Varsano, F., Bellusci, M., La Barbera, A., Petrecca, M., Albino, M., and Sangregorio, C. (2019). Dry reforming of methane powered by magnetic induction. *International Journal of Hydrogen Energy* 44(38), 21037-21044.

Velasco, J. G. (2009). Energías renovables. Reverte

Villicaña Ortiz, E. (2012). Método de evaluación de la radiación solar por transmisibilidad atmosférica. Aplicación a la determinación del potencial energético solar de México.

Voigt, A. L., da Cunha, T. V., and Bohórquez, C. E. N. (2020). Conception, implementation, and evaluation of induction wire heating system applied to hot wire gtaw (ihw-gtaw). *Journal of Materials Processing Technology* 116615.

Vuarant, C. O. (2014). Optimización del proceso de secado de arándanos por infrarrojos (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).

Walpole, R. E., Myers, R. H., y Myers, S. L. (1999). *Probabilidad y estadística para ingenieros*. Pearson Educación.



- Wang, W., and Lu, Y. (2018, March). Analysis of the mean absolute error (MAE) and the root mean square error (RMSE) in assessing rounding model. In IOP conference series: materials science and engineering (Vol. 324, No. 1, p. 012049). IOP Publishing.
- Watts, B. M., Ylimaki, G. L., Jeffery, L. E., and Elias, L. G. (1989). Basic sensory methods for food evaluation. IDRC, Ottawa, ON, CA.
- Wei, L., Pan, W., Qichang, Z., Bingjun, H., and Zejun, X. (2020). Phenotypic diversity analysis of blueberry germplasm resources. *Journal of Beijing Forestry University*, 42(2), 124-134.
- Wuttichaikitcharoen, P., and Babel, M. S. (2014). Principal component and multiple regression analyses for the estimation of suspended sediment yield in ungauged basins of Northern Thailand. *Water*, 6(8), 2412-2435.
- Xu, R., Takeda, F., Krewer, G., and Li, C. (2015). Measure of mechanical impacts in commercial blueberry packing lines and potential damage to blueberry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 110, 103-113.
- Xue, Y., Wang, C., Hu, Z., Zhou, Y., Liu, G., Hou, H., ..., and Li, J. (2018). Thermal treatment on sewage sludge by electromagnetic induction heating: Methodology and drying characterization. *Waste management* 78, 917-928.
- Yang, S. J., Lu, O. H., Huang, A. Y., Huang, J. C., Ogata, H., and Lin, A. J. (2018). Predicting students' academic performance using multiple linear regression and principal component analysis. *Journal of Information Processing*, 26, 170-176.
- Zhang, L., and Crisafulli, V. (2017, May). High Energy Harvesting in High Current/Voltage Induction Heating Application Using the new Ultra Filed Stop IGBTs Technology. In *PCIM Europe 2017; International Exhibition and Conference for Power*



*Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management* (pp. 1-6).  
VDE.

Zhang, M., Chen, H., Mujumdar, A. S., Tang, J., Miao, S., and Wang, Y. (2017). Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products. *Critical reviews in food science and nutrition* 57(6), 1239-1255.

Zhou, C. Y., Wang, C., Cai, J. H., Bai, Y., Yu, X. B., Li, C. B., ..., and Cao, J. X. (2019). Evaluating the effect of protein modifications and water distribution on bitterness and adhesiveness of Jinhua ham. *Food chemistry* 293, 103-111.

Zhou, Q., Zhang, C., Cheng, S., Wei, B., Liu, X., and Ji, S. (2014). Changes in energy metabolism accompanying pitting in blueberries stored at low temperature. *Food chemistry*, 164, 493-501.

Zia, M. P., and Alibas, I. (2021). The effect of different drying techniques on color parameters, ascorbic acid content, anthocyanin, and antioxidant capacities of cornelian cherry. *Food Chemistry*, 364, 130358.

Zielinska, M., and Michalska, A. (2016). Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture. *Food Chemistry*, 212, 671-680.

Zielinska, M., and Zielinska, D. (2019). Effects of freezing, convective and microwave-vacuum drying on the content of bioactive compounds and color of cranberries. *LWT*, 104, 202-209.



## XI. NOMENCLATURA

<i>EE</i>	<i>Energía eléctrica.</i>
<i>ES</i>	<i>Energía solar.</i>
<i>ER</i>	<i>Energía renovable.</i>
<i>IA</i>	<i>Industria alimentaria.</i>
<i>ENR</i>	<i>Energías no renovables.</i>
<i>CSG</i>	<i>Cinturón solar global</i>
<i>IND</i>	<i>Insolación normal directa.</i>
<i>ZMG</i>	<i>Zona metropolitana de Guadalajara.</i>
<i>TD</i>	<i>Tipo directo.</i>
<i>TI</i>	<i>Tipo indirecto.</i>
<i>CS</i>	<i>Captador solar.</i>
<i>CSH</i>	<i>Captador solar híbrido.</i>
<i>CPP</i>	<i>Captador solar de placa plana.</i>
<i>CPPMCF</i>	<i>Captador solar de placa plana con materiales con cambio de fase.</i>
<i>CSN</i>	<i>Captador solar de placa plana con nanofluidos.</i>
<i>CPI</i>	<i>Calentamiento por inducción.</i>
<i>RE</i>	<i>Resistencias eléctricas.</i>
<i>PCA</i>	<i>Análisis de componentes principales.</i>
<i>PCR</i>	<i>Regresión sobre componentes principales.</i>



TS	<i>Temperatura de salida.</i>
R	<i>Radiación solar.</i>
TA	<i>Temperatura ambiente.</i>
EMA	<i>Estación meteorológica automática.</i>
V	<i>Voltaje.</i>
DC	<i>Corriente directa.</i>
A	<i>Amperes.</i>
F	<i>Flujo de alimentación del CSH.</i>
H	<i>Humedad del ambiente.</i>
M	<i>Tiempo en minutos.</i>
HI	<i>Humedad dentro del CSH.</i>
VV	<i>Velocidad del viento.</i>
TC	<i>Temperatura de cabina.</i>
TI	<i>Temperatura dentro del CSH.</i>
CSH-CPI	<i>Captador solar híbrido con sistema de calentamiento auxiliar por calentamiento por inducción.</i>
CSH-RE	<i>Captador solar híbrido con sistema de calentamiento auxiliar por resistencias eléctricas.</i>
MPCR	<i>Modelo de regresión sobre componentes principales.</i>
SAC	<i>Sistema auxiliar de calentamiento.</i>
TCPI	<i>Temperatura de CPI dentro del CSH.</i>



<i>TR</i>	<i>Temperatura de RE dentro del CSH.</i>
<i>PC</i>	<i>Componentes principales.</i>
<i>RMSE</i>	<i>Raíz cuadrada media del error.</i>
<i>MAE</i>	<i>Error absoluto medio.</i>
<i>R<sup>2</sup></i>	<i>Coeficiente de determinación.</i>
<i>PID</i>	<i>Proporcional, Integral, Derivado.</i>



## XII. ANEXOS

### Anexo 1 Artículos

Vol. 20, No. 3(2021) Alim2452



Revista Mexicana de Ingeniería Química

**Design of a hybrid solar collector with a flat plate solar collector and induction heating: evaluation and modelling with principal components regression**

**Diseño de un captador solar híbrido con captador solar de placa plana y calentamiento por inducción: evaluación y modelado con regresión de componentes principales**

E. Figueroa-García<sup>1</sup>, M.A. Segura-Castruita<sup>2</sup>, F.M. Luna-Olea<sup>2</sup>, O.F. Vázquez-Vuelvas<sup>3</sup>,  
A.M. Chávez-Rodríguez<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez; domicilio, Campus Cocula, Calle Tecnológico No. 1000, Col. Lomas de Cocula, C.P. 48500, Cocula, Jalisco, México.

<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tlajomulco. Km 10 Carr. San Miguel Cayatlán, Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, C.P. 45640, México.

<sup>3</sup>Biochemical Engineering and Bioprocessing Laboratory. Chemical Science Faculty, University of Colima. Campus Coquimatlán. Carr. Km 9 Carretera Colima - Coquimatlán s/n. Coquimatlán, Colima. 28400. Mexico.

Received: May 4, 2021; Accepted: July 5, 2021

#### Abstract

Food drying is one of the main food preservation processes, which are supplied with electrical energy (EE). Recently, the EE has had constant increases in its costs, prompting the integration of renewable energy sources for these processes. Therefore, the objective of this research was to design, build and model a hybrid solar collector (HSC-IH) for drying food, made up of solar energy (SE) through a solar collector and EE by means of induction heating. (IH), this work prioritizes the incorporation of an auxiliary heating system for the solar collectors, minimizing temperature variability and increasing its heat capacity, the HSC-IH has a collection surface of 1 m<sup>2</sup>, adjustable flow of 0.3 - 4 CMM and maxim of 80 °C, the prediction model developed with PCR, to determine the outlet temperature (OT) provided by the HSC-IH with only the use of solar energy and to estimate the energy provided by the EE with the IH, the final model it has an R<sup>2</sup> of 0.934 and can be used to understand the OT of HSC-IH.

**Keywords:** solar dry, hybrid solar collector, flat plate collector, induction heating, principal components regression.

#### Resumen

El secado de alimentos es uno de los principales procesos de conservación de alimentos, los cuales, se abastecen de energía eléctrica (EE). Recientemente la EE ha tenido constantes incrementos en sus costos, suscitando la integración de fuentes de energía renovables para estos procesos. Por lo que, el objetivo de esta investigación fue diseñar, construir y modelar un captador solar híbrido (HSC-IH) para secado de alimentos, conformado por energía solar (SE) a través de un captador solar y EE por medio de calentamiento por inducción (IH), este trabajo prioriza la incorporación de un sistema auxiliar de calentamiento para los captadores solar minimizando la variabilidad de temperatura y aumentando su capacidad calorífica, el HSC-IH cuenta con una superficie de captación de 1 m<sup>2</sup> flujo regulable de 0.3-4 CMM y temperatura máxima de 80 °C, el modelo de predicción desarrollado con PCR, para determinar la temperatura de salida (OT) que aporta el HSC-IH con solo el uso de energía solar y estimar la energía que aportara la EE con el IH, el modelo final presenta una R<sup>2</sup> de 0.934 y se puede utilizar para comprender la OT del HSC-IH.

**Palabras clave:** energía solar, captador solar híbrido, captador solar de placa plana, calentamiento por inducción, regresión sobre componentes principales.

\* Corresponding author. E-mail: arturo\_moisesc@hotmail.com  
<https://doi.org/10.24275/rmiq/Alim2452>  
ISSN:1665-2738, issn-e: 2395-8472



DOI: <https://doi.org/10.24275/rmiq/Sim1403>

1 *Revista Mexicana de Ingeniería Química*

2 **TEMPERATURE OPTIMIZATION IN A TRAY DRYER FOR DEHYDRATED**  
3 **BLUEBERRY (*VACCINIUM CORYMBOSUM* L.) AND COMPARISON WITH A**  
4 **HYBRID SOLAR DRYER.**

5  
6 **OPTIMIZACIÓN DE LA TEMPERATURA EN UN SECADOR DE BANDEJAS**  
7 **PARA EL DESHIDRATADO DE ARÁNDANO (*VACCINIUM CORYMBOSUM* L.) Y**  
8 **COMPARACIÓN CON UN SECADOR SOLAR HÍBRIDO.**

9 E. Figueroa-García<sup>1,2</sup>, S.V. Alvarado-Flores<sup>1</sup>, V.S. Farias-Cervantes<sup>1</sup>, I.G. López-Muraira<sup>1</sup>,  
10 I. Andrade-Gonzalez<sup>1</sup>, M.I. Montero-Cortés<sup>1</sup>, H. Silos-Espino<sup>3</sup>, A.M. Chávez-Rodríguez<sup>1\*</sup>

11  
12 <sup>1</sup>Tecnologico Nacional de México/Campus Tlajomulco. Km 10 Carr. San Miguel Cuyutlán,  
13 Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, C.P. 45640, México

14 <sup>2</sup>Tecnologico Nacional de México/Campus José Mario Molina Pasquel y Henríquez  
15 domicilio, Unidad académica Cocula, Calle Tecnológico No. 1000, Col. Lomas de Cocula,  
16 C.P. 48500, Cocula, Jalisco, México

17 <sup>3</sup>Tecnologico Nacional de México/Campus El Llano km 18 Carretera AGS. -SLP C.P.  
18 20330, El Llano, Aguascalientes, México

19 **Abstract:**

20 *The objective of this research was to optimize the blueberry drying temperature in a tray*  
21 *dryer and compare it with a hybrid solar dryer to improve the physicochemical and sensory*  
22 *characteristics of the blueberry. Blueberry drying was carried out at 3 different temperatures*  
23 *60, 70 and 80 °C with an air flow of 0.35 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>, in the tray dryer. Total soluble solids*  
24 *(TSS), water activity (WA), moisture (H), hygroscopicity index (HI), pH, reducing sugars*  
25 *(RS), Anthocyanins (A) and sensory analysis (color, flavor, and texture) are used as quality*  
26 *indicators. Within the experimental range studied, it was established that the optimum drying*  
27 *temperature was 70 °C, presenting values of 3.18(±0.064) for pH, 65.4(±1.01) TSS,*  
28 *0.498(±0.0123) RS, 51.76(±1.47) A and raising awareness with greater acceptance in*  
29 *sensory analysis for 70 °C. Regarding the comparison between both dryers, physicochemical*  
30 *similar parameters were obtained in the quality of the dry product in both dryers and*  
31 *regarding energy expenditure, the total cost of drying was \$112.49 (MXN) for the tray dryer*  
32 *and \$147.5 (MXN) for the hybrid solar dryer.*

33 **Keywords:** tray dryer, blueberry drying, temperature optimization, hybrid solar dryer.  
34



**Anexo 2 Cuadro de evaluación térmica con sistema auxiliar de calentamiento por inducción, flujo 1.4 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>**

**Cuadro 23. Evaluación térmica con sistema auxiliar de calentamiento por inducción.**

Hora	Temperatura de inductor (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )	Temperatura de Salida (°C)	Temperatura de cabina (°C)
09:00	113.59	14.40	850.10	71.3	8
09:01	119.75	14.40	850.10	71.6	8
09:02	117.90	14.40	850.10	71.6	8
09:03	109.94	14.40	850.10	71.6	8.1
09:04	111.65	14.40	850.10	71.6	8.2
09:05	127.30	14.40	850.10	71.4	8.4
09:06	121.39	14.40	850.10	71.6	8.4
09:07	123.51	14.40	850.10	71.6	8.6
09:08	116.85	14.40	850.10	71.6	8.6
09:09	109.29	14.40	850.10	71.6	8.8
09:10	109.98	15.30	850.30	71.6	8.9
09:11	116.44	15.30	850.30	71.6	9
09:12	118.10	15.30	850.30	71.8	9.2
09:13	125.16	15.30	850.30	71.8	9.6
09:14	121.91	15.30	850.30	71.8	9.9
09:15	116.60	15.30	850.30	71.7	10.3
09:16	129.69	15.30	850.30	71.8	11
09:17	131.74	15.30	850.30	71.6	10.9
09:18	117.14	15.30	850.30	71.2	11.3
09:19	125.23	15.30	850.30	71.2	11.5
09:20	117.22	16.10	850.40	71.4	11.7
09:21	105.57	16.10	850.40	71.6	11.8
09:22	123.51	16.10	850.40	71.6	11.9
09:23	119.66	16.10	850.40	71.6	12
09:24	114.58	16.10	850.40	71.6	12.1
09:25	118.95	16.10	850.40	71.6	12.2
09:26	111.97	16.10	850.40	71.6	12.4
09:27	119.22	16.10	850.40	71.8	12.6
09:28	125.53	16.10	850.40	71.8	12.6
09:29	127.69	16.10	850.40	71.8	12.8



09:30	121.16	16.90	850.40	71.6	12.9
09:31	126.59	16.90	850.40	71.6	13
09:32	121.65	16.90	850.40	71.4	13.1
09:33	109.33	16.90	850.40	71.4	13.1
09:34	115.47	16.90	850.40	71.2	13.3
09:35	114.76	16.90	850.40	71.4	13.3
09:36	113.43	16.90	850.40	71.4	13.7
09:37	118.38	16.90	850.40	71.4	14.5
09:38	115.70	16.90	850.40	71.6	14.9
09:39	124.22	16.90	850.40	71.6	14.9
09:40	114.38	17.30	850.40	71.6	15.3
09:41	113.56	17.30	850.40	71.6	15.2
09:42	110.60	17.30	850.40	71.8	15.4
09:43	123.31	17.30	850.40	71.8	15.6
09:44	120.38	17.30	850.40	71.7	15.6
09:45	114.97	17.30	850.40	71.8	15.8
09:46	117.23	17.30	850.40	71.9	16
09:47	123.28	17.30	850.40	71.9	16.2
09:48	113.95	17.30	850.40	71.9	16.1
09:49	110.54	17.30	850.40	71.9	16.3
09:50	118.85	18.30	850.40	71.9	16.5
09:51	113.46	18.30	850.40	72.1	16.7
09:52	117.88	18.30	850.40	72.1	16.7
09:53	121.74	18.30	850.40	72.1	16.9
09:54	104.56	18.30	850.40	72.1	17.1
09:55	126.66	18.30	850.40	72.1	17.2
09:56	118.60	18.30	850.40	72.1	17.5
09:57	122.11	18.30	850.40	72.3	18.1
09:58	115.54	18.30	850.40	72.3	18.1
09:59	113.51	18.30	850.40	72.3	18.5
10:00	128.34	18.60	850.40	72.3	18.4
10:01	134.79	18.60	850.40	72.3	18.7
10:02	112.32	18.60	850.40	72.3	19
10:03	117.91	18.60	850.40	72.3	19
10:04	119.53	18.60	850.40	72.3	19.2
10:05	121.57	18.60	850.40	72.3	19.6
10:06	120.16	18.60	850.40	72.3	19.5
10:07	120.60	18.60	850.40	72.3	19.8
10:08	129.10	18.60	850.40	72.3	19.9



10:09	108.98	18.60	850.40	72.3	20
10:10	115.01	18.90	850.40	72.1	20.3
10:11	123.75	18.90	850.40	72.1	20.4
10:12	119.09	18.90	850.40	72.1	20.7
10:13	134.60	18.90	850.40	72.1	20.7
10:14	127.75	18.90	850.40	72.1	20.9
10:15	130.30	18.90	850.40	72	21
10:16	116.50	18.90	850.40	71.9	21.2
10:17	121.72	18.90	850.40	71.9	21.3
10:18	122.51	18.90	850.40	71.6	21.5
10:19	114.20	18.90	850.40	71.4	21.6
10:20	121.93	19.00	850.30	71.6	21.7
10:21	117.16	19.00	846.80	71.6	22.1
10:22	125.10	19.00	846.80	71.4	22
10:23	112.11	19.00	846.80	71.4	22.2
10:24	125.29	19.00	846.80	71.3	22.3
10:25	109.30	19.00	846.80	71.3	22.5
10:26	126.89	19.00	846.80	71.3	22.6
10:27	115.74	19.00	846.80	71.1	22.8
10:28	117.05	19.00	846.80	71.1	22.9
10:29	117.85	19.00	846.80	70.9	23.1
10:30	101.61	19.30	850.30	70.9	23.2
10:31	119.37	19.30	850.30	70.7	23.3
10:32	119.66	19.30	850.30	70.7	23.6
10:33	117.49	19.30	850.30	70.6	23.5
10:34	119.42	19.30	850.30	70.6	23.9
10:35	113.50	19.30	850.30	70.4	24
10:36	127.91	19.30	850.30	70.2	24
10:37	123.98	19.30	850.30	70.3	24.2
10:38	106.23	19.30	850.30	70.3	24.3
10:39	108.22	19.30	850.30	70.1	24.5
10:40	127.12	20.00	850.20	70	24.5
10:41	115.02	20.00	850.20	70	24.7
10:42	128.18	20.00	850.20	69.8	24.9
10:43	121.11	20.00	850.20	69.6	25
10:44	112.37	20.00	850.20	69.6	25.1
10:45	116.84	20.00	850.20	69.5	25.2
10:46	124.87	20.00	850.20	69.5	25.3
10:47	119.10	20.00	850.20	69.5	25.4



10:48	123.43	20.00	850.20	69.5	25.5
10:49	121.95	20.00	850.20	69.3	25.6
10:50	116.08	20.40	850.00	69.3	25.9
10:51	117.16	20.40	850.00	69.3	25.8
10:52	123.97	20.40	850.00	69.1	26
10:53	123.01	20.40	850.00	69.1	26.2
10:54	118.00	20.40	850.00	69.1	26.2
10:55	112.28	20.40	850.00	69	26.4
10:56	117.47	20.40	850.00	69	26.5
10:57	125.52	20.40	850.00	69	26.6
10:58	118.07	20.40	850.00	69	26.7
10:59	109.83	20.40	850.00	69	26.9
11:00	120.02	20.40	849.90	69	27
11:01	118.17	20.40	849.90	69	27.1
11:02	119.36	20.40	849.90	69	27.2
11:03	123.33	20.40	849.90	69	27.2
11:04	117.68	20.40	849.90	68.8	27.4
11:05	121.71	20.40	849.90	69	27.4
11:06	116.28	20.40	849.90	69	27.6
11:07	122.47	20.40	849.90	69	27.7
11:08	126.73	20.40	849.90	69	27.8
11:09	116.84	20.40	849.90	69	27.9
11:10	125.14	20.40	850.00	69	28.1
11:11	113.23	20.40	850.00	69	28.1
11:12	118.97	20.40	850.00	69	28.3
11:13	120.80	20.40	850.00	69.1	28.3
11:14	117.89	20.40	850.00	69.2	28.5
11:15	118.92	20.40	850.00	69.2	28.6
11:16	113.91	20.40	850.00	69.1	28.8
11:17	113.99	20.40	850.00	69.1	28.8
11:18	112.73	20.40	850.00	69.3	28.9
11:19	115.38	20.40	850.00	69.3	29.1
11:20	120.27	20.50	849.90	69.3	29.1
11:21	123.21	20.50	849.90	69.3	29.2
11:22	118.80	20.50	849.90	69.3	29.4
11:23	118.19	20.50	849.90	69.4	29.3
11:24	121.56	20.50	849.90	69.5	29.5
11:25	130.51	20.50	849.90	69.4	29.6
11:26	116.96	20.50	849.90	69.4	29.8



11:27	120.67	20.50	849.90	69.6	29.8
11:28	121.40	20.50	849.90	69.6	29.8
11:29	123.19	20.50	849.90	69.6	30
11:30	124.72	20.70	849.50	69.6	30
11:31	129.76	20.70	849.50	69.6	30.1
11:32	131.87	20.70	849.50	69.6	30.2
11:33	113.08	20.70	849.50	69.6	30.3
11:34	119.51	20.70	849.50	69.6	30.4
Promedio	119.14	18.46	850.00	70.79	20.39
Desviación estándar	6.034411042	1.93039216	0.82807867	1.20453444	6.83920302



**Anexo 3 Cuadro de evaluación térmica con sistema auxiliar de calentamiento por resistencias eléctricas (2) con flujo 5.1 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>.**

**Cuadro 24. Evaluación térmica con sistema auxiliar de calentamiento por resistencias eléctricas.**

Hora	Temperatura de resistencias (°C)	Temperatura de salida (°C)	Temperatura de cabina (°C)	Radiación Solar (W/m <sup>2</sup> )	Temperatura ambiente (°C)
11:40:00	62.6	46.7	34.6	731	22.7
11:50:00	89.6	67.4	37.8	744	22.9
12:00:00	93.9	70.1	41.2	756	23.4
12:10:00	100.4	70.1	43.4	749	23.6
12:20:00	104.1	72.1	45	784	24
12:30:00	104.8	73.3	47.2	767	24.2
12:40:00	116.2	73.7	48.6	781	24.4
12:50:00	110.8	74.8	49.6	787	24.7
13:00:00	110.9	73.7	50.4	714	24.7
13:10:00	115.9	74.8	51.8	823	25.3
13:20:00	118.9	75.8	52.5	825	25.5
13:30:00	117.9	76.7	53.20	819	25.6
13:40:00	118.6	76.6	54.20	802	25.9
13:50:00	118.8	76.9	54.70	815	26
14:00:00	121.5	76.4	55.2	793	26.3
14:10:00	123.3	75.7	55.6	749	26.3
14:20:00	119.7	74.7	55.8	713	26.4
14:30:00	114.4	74.7	56.1	694	26.7
14:40:00	121.6	74.2	55.9	672	26.9
Promedio	109.678947	72.5473684	49.6210526	764.105263	25.02631579
Desviación estándar	14.9053525	6.74992744	6.51029774	45.2203184	1.306752593



**Anexo 4 Cuadro de evaluación térmica con sistema auxiliar de calentamiento por resistencias eléctricas (4) con flujo 5.1 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>.**

**Cuadro 25. Evaluación térmica con sistema auxiliar de calentamiento por resistencias eléctricas (4).**

Hora	Temperatura ambiente (°C)	Radiación Solar (W/m <sup>2</sup> )	Temperatura de resistencias (°C)	Temperatura de salida (°C)	Temperatura cabina (°C)
07:00	5.8	847.7	110.36	109.11	68.83
07:10	5.7	847.8	118.60	106.11	70.35
07:20	5.4	847.9	116.31	95.35	69.04
07:30	5.2	848.1	119.34	92.98	69.05
07:40	5.1	848.3	113.42	104.34	69.95
07:50	5.7	848.4	113.80	100.11	70.01
08:00	6.8	848.5	121.00	100.42	69.95
08:10	7.7	848.5	112.50	91.63	69.90
08:20	8.9	848.6	115.09	91.48	70.55
08:30	10.2	848.7	112.75	99.44	69.47
08:40	11.9	848.7	117.95	103.72	68.51
08:50	13.1	848.7	122.04	90.66	69.70
09:00	14.2	848.8	117.69	98.17	69.99
09:10	15.1	848.9	127.24	95.49	68.77
09:20	16.3	848.9	118.12	101.02	70.58
09:30	17.3	848.9	114.79	98.95	69.60
09:40	18.1	848.8	117.65	93.01	69.85
09:50	19	848.9	119.57	95.95	69.22
10:00	19.5	848.9	118.87	111.35	69.46
10:10	19.9	848.9	116.94	92.33	70.29
10:20	20.5	848.8	120.89	104.16	69.45
10:30	21	848.8	115.12	103.62	69.28
10:40	21.3	848.7	119.59	96.67	69.12
10:50	21.5	848.6	123.39	104.75	69.78
11:00	21.9	848.6	121.96	90.13	69.46
11:10	22.3	848.5	113.37	97.01	69.78
11:20	22.8	848.4	113.88	100.12	69.81
11:30	23.2	848.3	123.48	110.94	70.00
11:40	23.6	848.2	120.88	100.68	69.80
11:50	23.5	847.9	119.88	92.13	69.18



12:00	23.8	847.8	116.71	94.16	69.28
12:10	24.2	847.6	118.16	104.99	69.69
12:20	24.3	847.5	115.44	87.94	69.37
12:30	24.6	847.3	124.73	103.24	69.43
12:40	24.5	847.1	120.55	95.79	70.17
12:50	25	847	116.22	90.29	68.83
13:00	25.4	846.6	124.18	103.29	69.64
13:10	25.5	846.4	119.13	97.22	69.73
13:20	25.8	846.2	114.44	102.96	70.06
13:30	26	845.9	123.59	106.99	69.50
13:40	26.2	845.8	115.26	89.11	69.47
13:50	26.1	845.6	125.06	99.13	69.15
14:00	26.5	845.4	122.00	93.39	69.71
14:10	26.7	845.3	122.19	88.97	69.58
14:20	26.8	845.2	118.05	95.29	69.22
14:30	27	845.2	121.62	91.51	70.35
14:40	27.1	845.1	120.69	102.65	70.64
14:50	27.2	845	117.81	102.42	70.17
15:00	27.1	844.9	121.18	101.45	68.98
15:10	27.2	844.9	117.79	98.13	69.91
15:20	27.3	844.8	111.01	101.36	69.25
15:30	27.2	844.9	112.91	107.94	68.93
15:40	27.2	844.9	117.79	97.76	69.55
15:50	27	844.9	119.98	95.74	69.62
16:00	26.7	844.9	119.99	100.52	69.33
16:10	26.6	846.5	123.31	104.45	69.11
16:20	25.1	846.5	121.00	102.02	69.50
16:30	24.9	846.7	118.73	96.92	69.69
16:40	24.5	846.7	118.02	100.72	70.03
16:50	24	846.6	120.30	97.57	69.83
17:00	23.5	846.5	112.13	94.22	70.15
17:10	22.4	846.7	127.96	95.21	69.81
17:20	21.8	845.5	117.87	95.29	70.20
17:30	20.7	845.5	118.37	87.18	68.87
17:40	20.1	846.6	113.83	92.13	69.23
17:50	19.6	845.7	119.78	102.26	69.59
18:00	19.4	845.8	117.52	101.61	69.88
18:10	19.2	845.9	118.01	100.26	69.86
18:20	18.9	846	117.25	94.03	69.63



18:30	18.8	846.1	121.24	93.03	70.22
18:40	18.8	846.3	118.97	96.48	70.10
18:50	18.9	846.5	123.46	100.79	70.05
19:00	19.1	846.7	113.65	97.65	69.61
19:10	19.1	846.8	122.72	89.94	70.11
19:20	18.9	846.9	111.42	94.41	69.29
19:30	18.7	847.1	114.35	98.94	69.18
19:40	18.6	894.72	118.27	95.19	70.29
19:50	18.7	847.3	127.47	107.63	69.20
20:00	18.8	847.4	122.41	99.24	68.86
20:10	18.8	847.4	116.57	98.71	70.21
20:20	19.2	847.5	114.61	94.81	69.36
20:30	19.8	847.6	120.53	94.88	69.65
20:40	19.7	847.7	117.68	109.44	69.42
20:50	19.6	847.9	117.80	100.78	70.06
21:00	19.3	847.9	114.95	102.38	69.83
Promedio	20.24	847.657882	118.5070364	98.3794026	69.6363077
Desviación estándar	6.1612692	5.33149851	3.845643402	5.53293453	0.46046582



## Anexo 5 Cuadro de análisis fisicoquímicos del secado de arándano.

**Cuadro 26. Análisis fisicoquímicos del secado de arándano.**

Temperatura de secado	Humedad Final (g H <sub>2</sub> O*g MS)	Tiempo de secado (min)	Aw	Índice higroscopicidad (g H <sub>2</sub> O abs/100 g MS)
60°C	0.2902±0.093	1020	0.248±0.0451	0.2123±0.009
70°C	0.2256±0.052	720	0.2268±0.0661	0.2110±0.024
80°C	0.1926±0.0127	420	0.26±0.0831	0.2232±0.0128
Temperatura de secado	pH	Sólidos solubles totales (°Brix)	Azúcares reductores (mg/100g)	Antocianinas (mg/100g)
60°C	3.39±0.259	49±15.6	0.512±0.019	41±14.45
70°C	3.18±0.064	65.4±1.01	0.498±0.0123	51.76±1.47
80°C	3.83±0.0629	47.4±8.87	0.416±0.0407	89.79±1.39



**Anexo 6 Cuadro de análisis sensorial del secado de arándano.**

**Cuadro 27. Análisis sensorial del arándano seco.**

	Color			Sabor			Textura		
	70 °C	80 °C	90 °C	70 °C	80 °C	60 °C	70 °C	80 °C	60 °C
	3	3	3	2	2	2	3	1	1
	4	3	2	5	2	2	4	2	2
	4	3	2	6	3	4	5	2	3
	4	4	4	6	4	4	5	2	3
	5	4	3	7	4	5	5	2	4
	5	4	3	7	4	5	5	2	4
	5	4	3	7	4	5	5	3	4
	5	4	3	7	4	5	6	3	4
	5	4	3	7	4	6	7	3	4
	6	5	4	7	4	6	7	3	5
	6	5	4	7	5	6	7	3	5
	6	5	4	7	5	7	7	4	5
	6	5	4	8	5	7	7	4	5
	6	5	4	8	6	7	7	4	5
	6	5	4	8	6	7	7	4	5
	7	6	5	8	6	7	8	4	6
	7	6	5	8	6	7	8	4	6
	7	7	7	8	6	8	8	6	7
	7	7	7	8	6	8	8	6	7
	7	7	7	8	6	8	8	6	7
	7	7	7	8	7	8	8	6	7
	7	7	7	8	7	8	8	7	7
	8	7	6	8	7	8	8	7	8
	8	7	6	8	7	8	8	7	8
	8	7	6	9	8	9	8	7	9
	8	7	6	9	8	9	8	7	9
	8	7	6	9	8	9	9	7	9
	8	8	8	9	8	9	9	7	9
	9	9	9	9	8	9	9	8	9
	9	9	9	9	9	9	9	8	9



Desviación estándar	1.5 64329 39	1.7 25068 71	1.9 91072 03	1.4 32384 07	1.8 65907 07	1.9 98850 24	1.5 86219 39	2.1 41274 73	2.2 85385 85
Promedio	6.3 66666 67	5.7	5.0 33333 33	7.5	5.6 33333 33	6.7 33333 33	7.0 33333 33	4.6 33333 33	5.8 66666 67