



TESIS

**“EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL SECADO  
CONVECTIVO DE ARÁNDANO (*Vaccinium  
corymbosum* L.) ENTRE UN SECADOR SOLAR  
HÍBRIDO Y UNO DE BANDEJAS”**

QUE PRESENTA:

**ING. SANDRA VIRIDIANA ALVARADO FLORES**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. ARTURO MOISÉS CHÁVEZ RODRÍGUEZ**

---

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROBIOTECNOLOGÍA**

---

TLAJOMULCO DE ZÚÑIGA, JALISCO. JUNIO, 2022.



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por ser mi guía y acompañarme en el transcurso de mi vida, brindándome salud, paciencia y sabiduría para culminar con éxito mis metas propuestas. A la vida por reunirme y reencontrarme con personas en los tiempos perfectos.

Con aprecio y cariño estoy agradecida con el comité académico que conformaron este proyecto de investigación: mi director de Tesis el Dr. Arturo Moisés Chávez Rodríguez por su valioso conocimiento, además de su paciencia, tiempo invertido, su apoyo académico y personal; pero sobre todo por la confianza para el desarrollo del presente trabajo, a mi codirector de tesis el M.C. Eduardo Figueroa García por creer en mí desde el primer momento a quien hago llegar mi más sincero agradecimiento, por permitirme ser partícipe de su proyecto de investigación y por su entrega incondicional durante el desarrollo de este trabajo; y a mis asesores Dr. Isaac Andrade González y la Dra. Mayra Itzcalotzin Montero Cortés de quienes recibí asesoría y consejos académicos que surgieron durante todo el proceso de desarrollo de este trabajo así como personales para desarrollarme profesionalmente ante la sociedad. Reitero mis agradecimientos para cada uno de los miembros de mi comité ya que sin ustedes este proyecto no podría culminar satisfactoriamente.

Particularmente agradecer la disposición de su laboratorio de la Dra. Norma Alejandra Mancilla Margalli para el desarrollo de este trabajo.

Especialmente agradezco a la Dra. Vania Sbeyde Farías Cervantes por su conocimiento otorgado y apoyo durante mi estancia en la planta piloto de procesos agroindustriales y sobre todo su valiosa amistad.

Con todo mi corazón a mi hermano Daniel, a mis padres Manuel y Lupita que me dieron el regalo de la vida, que con su amor, dedicación y paciencia con la que cada día se preocupaban por mi avance y desarrollo profesional; por ser mi pilar fundamental y haberme apoyado incondicionalmente en todos mis proyectos, su bendición a lo largo de mi vida me protege y me lleva por el camino del bien.

A mi amigo y compañero de vida, mi amado esposo Adrián, gracias por brindarme tu amor incondicional, por estar conmigo en los momentos de gloria y



en los turbulentos que se han presentado, por tu apoyo motivacional el cual es vital para poder seguir adelante con todas mis proyectos.

Sin olvidar a mis amigos y compañeros de planta piloto; Cristian por su valiosa y sincera amistad, quien estuvo acompañándome en mis jornadas largas de trabajo; a Juan Manuel quien me compartió su amistad durante este periodo de aprendizaje.

Con gran cariño y gratitud a mis amigas y compañeras de generación: Fer, Mely, Bety y Mary Chuy, comenzar y culminar este proyecto en mi vida con ustedes fue de la forma más maravillosa que pudo haber pasado.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) el apoyo económico recibido durante dos años a través de una beca, el cual permitió solventar este proyecto de investigación.

Gracias, gracias, gracias...



**DICTAMEN DE TESIS APROBADA**



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Tlajomulco  
Subdirección Académica  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Tlajomulco de Zúñiga, Jal. 23/Mayo/2022  
No. DE OFICIO: DEPI/055/2022

Asunto: Autorización de impresión de tesis.

**SANDRA VIRIDIANA ALVARADO FLORES  
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRÍA  
EN CIENCIAS EN AGROBIOTECNOLOGÍA  
PRESENTE**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL SECADO CONVECTIVO DE ARÁNDANO (*Vaccinium corymbosum* L.) ENTRE UN SECADOR SOLAR HÍBRIDO Y UNO DE BANDEJAS", ha informado a esta División de Estudios de Posgrado e Investigación (DEPI), que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le AUTORIZA a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

Excelencia en Educación Tecnológica®  
Educando para la Sociedad Actual y los Retos del Futuro

**PEDRO YESCAS CORONADO  
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN DEL ITT**



S.E.P  
TECNM  
14DIT0003B  
IT TLAJOMULCO  
DIV. DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO  
E INVESTIGACION

ccp.- Luz Elena Alfaro Orozco; Departamento de Servicios Escolares  
Expediente  
MIBR/AIBR/PYC/cm².



Km. 10 Carretera Tlajomulco-San Miguel Cuyutián Tlajomulco de Zúñiga Jalisco.  
Código Postal 45640, Tels. 3329021130 al 37 tecnm.mx | www.tlajomulco.tecnm.mx





**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Tlajomulco



## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS .....	I
DICTAMEN DE TESIS APROBADA .....	III
RESUMEN .....	1
ABSTRACT.....	2
I. INTRODUCCIÓN .....	3
II. ANTECEDENTES.....	5
2.1. Secado .....	5
2.1.2. Secado convectivo .....	6
2.1.3. Secado eléctrico.....	7
2.2. Energía solar.....	7
2.2.1. El sol .....	7
2.2.2. Energía solar .....	8
2.2.3. Radiación solar.....	8
2.2.4. Energía solar en México.....	9
2.3. Uso de la energía solar en el proceso de secado. ....	9
2.3.1. Uso de la energía solar en el Estado de Jalisco .....	9
2.3.2. Análisis climatológico .....	10
2.4. Secador solar .....	12
2.4.1. Principio de los secadores solares. ....	13
2.4.2. Componentes de los secadores solares. ....	13
2.5. Clasificaciones de secadores solares.....	14
2.5.1. Modo de movimiento del aire.....	14
2.5.1.1. Secadores solares pasivos y activos. ....	14
2.5.1.2 Modo de transferir calor.....	15
2.5.1.2.1. Secador solar directo.....	15
2.5.1.2.2. Secador solar indirecto .....	16
2.5.2.3. Ejemplos de secadores de modo de transferir el calor: Secador de invernadero y secador solar mixto.....	17
2.5.2.4. Secador solar híbrido .....	18
2.5.2.4.1. Cubiertas de captador .....	19



2.5.2.4.2. Resistencia eléctrica.....	20
2.6. Optimización del secado convectivo.....	21
2.7. Generalidades Arándano.....	22
2.7.1. Antioxidantes.....	22
2.7.2. Antocianinas.....	24
2.7.3. Secado de arándano.....	25
2.7.4. Importancia económica del arándano.....	25
2.8. Actividad de agua y humedad.....	26
2.8.1. Relación actividad de agua y humedad.....	28
2.8.2. Antocianinas por pH diferencial.....	28
III. PROBLEMÁTICA.....	29
IV. JUSTIFICACION.....	29
V. HIPÓTESIS.....	29
VI. OBJETIVOS.....	30
6.1. Objetivo general.....	30
6.2. Objetivos específicos.....	30
VII. MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
7.1.-Obtención de la materia prima.....	31
7.2.-Diseños experimentales.....	31
7.3. Esquema general de trabajo.....	32
7.4. Secado por Convección de arándano en secador eléctrico de bandejas. .....	33
7.5. Análisis fisicoquímicos de arándano seco en secador solar.....	34
7.5.1. Determinación de Humedad.....	34
7.5.2. Actividad de agua.....	35
7.5.3. Índice de higroscopicidad.....	35
7.5.4. pH.....	36
7.5.5. Sólidos solubles totales.....	37
7.5.6. Extracción de Azúcares.....	38
7.5.7. Contenido de azúcares reductores por método ácido dinitrosalicílico DNS.....	38
7.5.7.1. Análisis de muestras.....	39
7.5.8. Análisis para compuestos antioxidantes.....	39



7.5.8.1. Preparación de extractos para determinación antioxidante .....	39
7.5.8.2. Método DPPH-(2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo) .....	40
7.5.8.2.1. Análisis de muestras .....	41
7.5.8.4. Método ABTS <sup>•+</sup> .....	41
7.5.8.4.1. Radical ABTS <sup>•+</sup> (ácido 2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico).....	42
7.5.8.4.2. Análisis de muestras .....	42
7.5.8.5 Determinación de antocianinas por pH diferencial .....	43
7.5.8.5.1. Preparación del Buffer pH 4.5 y pH 1.0 .....	44
7.5.8.5.2. Análisis de la Muestra .....	44
7.5.8.6. Determinación de fenoles totales .....	44
7.5.8.6.1. Extracción de compuestos fenólicos.....	46
7.5.8.6.2. Análisis de la Muestra .....	46
7.5.8.7. Análisis de colorimetría .....	47
7.5.8.8 Análisis sensoriales .....	48
7.5.8.8.1. Prueba Hedónica (escala de nueve puntos) .....	48
7.6. Análisis estadístico.....	49
VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	50
8.1. Optimización de secado de arándano en secador eléctrico de bandejas.....	50
8.1.1 Determinación de cinéticas de secado .....	50
8.2. Comparación de secadores con temperatura optima obtenida del secador eléctrico de bandejas .....	53
8.3. Análisis fisicoquímicos .....	54
8.4. Comparación energética y fisicoquímica del secado de arándano en el secador de bandejas eléctrico y el secador solar híbrido .....	70
8.4.1. Análisis fisicoquímicos.....	70
8.4.2. Evaluación energética .....	78
IX. CONCLUSIONES .....	82
X. BIBLIOGRAFÍA.....	83
Anexos.....	97



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Secado de alimentos (Fuente propia).....	5
Figura 2. Reacción de fusión nuclear del Sol (García y Pilatowsky 2017). .....	8
Figura 3. Estado de Jalisco y su clima (INEGI 2012).....	10
Figura 4. Promedio de radiación solar del año 2019 y 2020.....	11
Figura 5. Horas luz presentes durante el día en las estaciones del año 2020.	12
Figura 6. Deshidratador tipo "Colector y cámara de secado" (García y col., 2012). .....	13
Figura 7. Clasificaciones de secadores solares (El Hage y col., 2018).....	14
Figura 8. (a) Secado solar pasivo directo; (b) secador solar activo directo (El Hage y col., 2018). .....	15
Figura 9. (a) Sector solar pasivo indirecto; (b) Secador solar activo indirecto (El Hage y col., 2018). .....	16
Figura 10. Esquema del calentador solar (Koulibaly y Bayón 2015).....	20
Figura 11. Estructura de compuestos polifenólicos comunes en las frutas (Hangun-Balkir y col., 2012).....	23
Figura 12. Estructura básica y sustituyentes de las antocianinas (Durst y Wrolstad, 2001).....	24
Figura 13. Cambios que ocurren en los alimentos en función de la actividad del agua. a) Oxidación de lípidos; b) reacciones hidrolíticas; c) oscurecimiento no enzimático; d) isoterma de adsorción; e) actividad enzimática; f) crecimiento de hongos; g) crecimiento de levaduras, y h) crecimiento de bacterias (Badui Dergal, S. 2016). .....	27
Figura 14. Etapas de desarrollo de metodologías de trabajo.....	33
Figura 15. Bandeja e malla metálica con arándano fresco (Fuente propia). ....	34
Figura 16. Estufa para determinación de humedad por pérdida de peso (Fuente propia).....	34
Figura 17. Activímetro (Fuente propia).....	35
Figura 18. Desecador con muestras de tratamientos de arándano secado en secador eléctrico (Fuente propia).....	36
Figura 19. Potenciómetro (Fuente propia).....	37
Figura 20. Refractómetro (Fuente propia). .....	37

Figura 21. Curva de calibración de azúcares reductores por metodología de ácido dinitrosalicílico (DNS). Se utilizó glucosa como estándar (Fuente propia). .....	39
Figura 22. Curva de absorbancia de DPPH• con diferentes concentraciones del estándar Trólox (Fuente propia). .....	41
Figura 23. Curva de absorbancia del ABTS <sup>•+</sup> con diferentes concentraciones del estándar Trólox (Fuente propia). .....	42
Figura 24. Curva de absorbancia de ácido gálico con diferentes concentraciones (Fuente propia). .....	46
Figura 25. Curva de secado de arándano a 60, 70 y 80 °C (Fuente propia). ...	51
Figura 26. Velocidad de secado de arándano a diferentes temperaturas (Fuente propia). .....	52
Figura 27. Contenido de humedad de tratamientos sometidos al proceso de secado convectivo en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a $p < 0,05$ (Fuente propia). .....	54
Figura 28. Actividad de agua de tratamientos sometidos al proceso de secado convectivo en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a $p < 0,05$ (Fuente propia). .....	55
Figura 29. Índice de higroscopicidad de tratamientos sometidos al proceso de secado convectivo en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a $p < 0,05$ (Fuente propia). .....	56
Figura 30. pH de tratamientos sometidos al proceso de secado convectivo en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a $p < 0,05$ (Fuente propia). .....	57
Figura 31. Sólidos solubles totales de tratamientos sometidos al proceso de secado convectivo en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7	



horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a  $p < 0,05$ ) (Fuente propia). ..... 58

Figura 32. Azúcares reductores de tratamientos sometidos al proceso de secado convectivo en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a  $p < 0,05$ ) (Fuente propia). ..... 59

Figura 33. Porcentaje de inhibición del radical DPPH de tratamientos sometidos al proceso de secado convectivo en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a  $p < 0,05$ ) (Fuente propia). ..... 60

Figura 34. Porcentaje de inhibición del radical ABTS + de tratamientos sometidos al proceso de secado convectivo en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a  $p < 0,05$ ) (Fuente propia). ..... 61

Figura 35. Concentraciones de antocianinas (mg/100g) y grupos homogéneos de secados en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a  $p < 0,05$ ) (Fuente propia). ..... 62

Figura 36. Concentraciones de Ac. Gálico (mg/l) y grupos homogéneos de secados en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a  $p < 0,05$ ) (Fuente propia). ..... 63

Figura 37. Valores cromáticos y grupos homogéneos de secados en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a  $p < 0,05$ ) (Fuente propia). ..... 65

Figura 38. Valores de tonalidades y grupos homogéneos de secados en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a  $p < 0,05$ ) (Fuente propia). El secado convectivo no indujo cambios significativos en la saturación del color (Zielinska y Zielinska, 2019). 66

Figura 39 Fotografías digitales para estimación de color en coordenadas CIEL\*a\*b de las superficies de arándano fresco. (a), (b) y (c) lado superior, inferior y lateral de arándano fresco. .... 66

Figura 40. Fotografías digitales para estimación de color en coordenadas CIEL\*a\*b de las superficies de arad no seco. Protocolos experimentales: (a), (b) lado superior de arándano secado con temperatura de 60°C y un tiempo de secado de 17 hora; (c), (d) y (e) lado superior de arándano secado con temperatura de 70°C y un tiempo de secado de 12 horas, (f), (g) y (h) lado superior de arándano secado con temperatura de 80°C y un tiempo de secado de 17 horas, ..... 67

Figura 41. Fotografías digitales para estimación de color en coordenadas CIEL\*a\*b de las superficies de arándano seco en secador solar a 70°C. (a), (b) y (c) lado superior, inferior y lateral de arándano seco. .... 68

Figura 42. Prueba Hedónica (escala de nueve puntos) para el parámetro del color del arándano seco en el secador eléctrico de bandejas. Se marco las categorías en la escala, que va desde "me gusta extremadamente" equivale numérico a 9, hasta "me disgusta extremadamente" "equivalente numérico a 1..... 68

Figura 43. Prueba Hedónica (escala de nueve puntos) para el parámetro del sabor del arándano seco en el secador eléctrico de bandejas. Se marco las categorías en la escala, que va desde "me gusta extremadamente" equivale numérico a 9, hasta "me disgusta extremadamente" "equivalente numérico a 1. .... 69

Figura 44. Prueba Hedónica (escala de nueve puntos) para el parámetro de la textura del arándano seco en el secador eléctrico de bandejas. Se marco las categorías en la escala, que va desde "me gusta extremadamente" equivale numérico a 9, hasta "me disgusta extremadamente" "equivalente numérico a 1. .... 69



Figura 45. ANOVA de humedad del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia). .....	70
Figura 46. ANOVA de actividad de agua (Aw) del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia). .....	71
Figura 47. ANOVA de índice de higroscopicidad del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia). .....	72
Figura 48. ANOVA de pH del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia). .....	73
Figura 49. ANOVA de sólidos solubles totales del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia). .....	73
Figura 50. ANOVA de azúcares reductores del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia). .....	74
Figura 51. ANOVA de antocianinas del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia). .....	75
Figura 52. ANOVA del % de inhibición del radical DPPH del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia). .....	76
Figura 53. ANOVA del % de inhibición del radical ABTS + del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia). .....	76
Figura 54. ANOVA de concentración de ácido gálico del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia). .....	77
Figura 55 ANOVA del croma del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia). .....	78
Figura 56. ANOVA del croma del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia). .....	78
Figura 57. Diagrama de relación de trabajo (uso de energía eléctrica) del secador de bandejas eléctrico (Fuente propia). .....	79
Figura 58. Diagrama de relación de trabajo (uso de energía eléctrica) del secador solar híbrido (Fuente propia). .....	80



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diseño experimental (DCA) temperatura optima Secador eléctrico. ...	31
Tabla 2. diseño experimental (DCA) comparación de secadores. ....	31
Tabla 3. Curva de calibración de fenoles totales. ....	45
Tabla 4. Escala para prueba hedónica de 9 puntos utilizada para evaluación de atributos sensoriales. ....	48
Tabla 5. Boleta para prueba hedónica de 9 puntos utilizada para evaluar atributos sensoriales del arándano seco en secador eléctrico de bandejas. ....	49
Tabla 6. Valores humedad final, tiempo de secado y consumo energético de secador eléctrico. ....	50
Tabla 9. Parámetros del color de los arándanos secados en el secador eléctrico de bandejas. ....	64
Tabla 7. Gasto energético de secador solar híbrido y secador eléctrico.....	81
Tabla 8. Análisis proximal de arándano secado en secador eléctrico.....	97

## RESUMEN

La industria alimentaria desarrolla procesos para la conservación de alimentos, principalmente procesos de deshidratación; sin embargo, la alta demanda de energía eléctrica en esta industria genera gastos inminentes que van en aumento; lo cual, conduce a implementar opciones de energía renovables como lo es la energía solar. En este estudio, se secaron frutos de arándanos (*Vaccinium corymbosum* L.) utilizando tres temperaturas de secado (60 °C, 70 °C y 80 °C) en un secador eléctrico de bandejas, para optimizar la temperatura de secado y posteriormente la comparación con un secador solar híbrido, se evaluaron parámetros fisicoquímicos, capacidad antioxidante, determinación de color y análisis sensoriales de los arándanos secados en ambos equipos. Así como el consumo energético de los secadores utilizados para los tratamientos. El contenido de humedad de los arándanos, que inicialmente era de  $84,76 \pm 0,20\%$  base húmeda., se redujo a  $10,03 \pm 0,09\%$  base húmeda; se determinó como temperatura optima de secado a 70 °C con un tiempo de 12 horas para la replicación de tratamientos y llevar a cabo la evaluación de los secadores. Dentro de los resultados de los análisis no se encontró diferencia significativa de la actividad de agua e índice de higroscopicidad, arrojando valores de  $0.2 \pm 0.2$  para el arándano seco en secador eléctrico y de  $0.22 \pm 0.08$  y  $0.20 \pm 0.01$  y  $0.21 \pm 0.01$  g  $H_2O$  absorbida/100 g materia seca respectivamente, para los sólidos solubles, pH y azúcares reductores se encontró diferencia significativa de acuerdo con los resultados presentados. El porcentaje de inhibición del radical DPPH, ABTS y total de antocianinas monoméricas mostraron diferencia significativa con valores de porcentaje de inhibición y concentración mayores para la temperatura de 80°C.

Palabras clave: Secado convectivo de arándano, secador solar híbrido

## ABSTRACT

The food industry develops processes for food preservation, mainly dehydration processes; however, the high demand for electrical energy in this industry generates imminent and increasing costs, which leads to the implementation of renewable energy options such as solar energy. In this study, blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.) were dried using three drying temperatures (60 °C, 70 °C and 80 °C) in an electric tray dryer to optimise the drying temperature and then compared with a hybrid solar dryer. Physicochemical parameters, antioxidant capacity, colour determination and sensory analysis of the blueberries dried in both dryers were evaluated. As well as the energy consumption of the dryers used for the treatments. The moisture content of the blueberries, which was initially  $84.76 \pm 0.20\%$  wet basis, was reduced to  $10.03 \pm 0.09\%$  wet basis; the optimum drying temperature was determined as 70 °C with a time of 12 hours for the replication of treatments and to carry out the evaluation of the dryers. Within the results of the analysis, no significant difference was found in the water activity and hygroscopicity index, giving values of  $0.2 \pm 0.2$  for the dried blueberry in electric dryer and  $0.22 \pm 0.08$  and  $0.20 \pm 0.01$  and  $0.21 \pm 0.01$  g H<sub>2</sub>O absorbed/100 g dry matter respectively, for the soluble solids, pH and reducing sugars a significant difference was found in accordance with the results presented. The percentage inhibition of DPPH· radical, ABTS·<sup>+</sup> and total monomeric anthocyanins showed significant difference with higher values of percentage inhibition and concentration at 80°C temperature.

Keywords: Convective drying of blueberry, hybrid solar dryer.

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente en la industria alimentaria desarrolla procesos para la transformación y desarrollo de alimentos, la alta demanda de energía eléctrica en esta industria genera gastos inminentes que van en aumento, lo cual lleva a implementar opciones de energía renovables como lo es la solar, es una de las fuentes de energía más renovables y fácilmente disponibles en la Tierra (Sukhatme y Nayak, 2008). La utilización de energía solar para secar alimentos sigue siendo atractiva en términos de eficiencia energética, rentabilidad y aplicabilidad rural (Mohana y col., 2020). El secado es una de las mejores opciones para la conservación de alimentos; es una de las principales técnicas que se usan en las industrias alimentarias. El secado resulta en la eliminación de la humedad, por lo tanto, detiene el crecimiento microbiano, enzimático y otras reacciones químicas autolíticas que mantienen la calidad y seguridad de los alimentos (Naidu y col., 2016). Se pueden aplicar diferentes tipos de secado según el método de transferencia de calor utilizado, como el secado por conducción, convección o radiación (Kudra y Mujumdar, 2009). El secado por convección es una operación de alta demanda energética que generalmente utiliza aire caliente para aumentar la temperatura de los alimentos y evaporar el agua del producto (Fernandes y col., 2015). De manera general el secado convectivo en un secador solar está compuesto por una cámara de secado la cual contiene el producto húmedo y puede estar compuesta de materiales transparentes (tipo directo) o de material opaco (tipo indirecto) (Ameri y col., 2018).

Para desarrollar el proceso de secado es indispensable la incorporación de bandejas dentro de la cámara de secado, las cuales varían el material del que estén echas, las bandejas de secado pueden estar hechas de redes de bambú, aluminio o mallas de alambre de acero inoxidable con asas de metal. En un secador solar típico, el producto se seca principalmente a través de los efectos de conducción de la bandeja y los efectos de convección de las corrientes de aire (Prakash y Kumar, 2017). En el caso de los secadores solares de tipo mixto, la cámara es de tipo híbrido, lo que permite que el aire caliente de los lados y la radiación de la cubierta superior de vidrio pasen a la cámara de secado (Lakshmi y col., 2018).

En la actualidad un colector solar híbrido es una alternativa de ahorro de energía para el secado de productos. Un secador solar híbrido es un captador solar que utiliza mínimo dos fuentes de energía térmica, está conformado por un captador de placa plana y una energía auxiliar para generar calor, esta energía puede ser eléctrica o por combustión (gas LP, biomasa) (Gallo y Padilla., 2017).

El arándano es una fruta que proviene de plantas arbustivas, es de piel tersa y su pulpa es jugosa y aromática de sabor agridulce. Es un fruto esférico, y dependiendo de la variedad puede variar su tamaño entre 0,7 a 1,6 cm. de diámetro, su color puede variar entre azul claro y azul oscuro. El período de desarrollo del fruto, entre la floración y la maduración de la fruta, es de 90 días para el arándano del tipo *Highbush* y de 120 días aproximadamente para variedades *Rabbiteye*, con variaciones dentro de cada variedad (Bascope, 2013).

El arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) es una fuente dietética rica en diferentes fitonutrientes (Huang y col., 2015). Su propiedad relevante es poseer gran cantidad de polifenoles asistida por el contenido de azúcares, fibra, lípidos, minerales y vitaminas, proantocianidinas, antocianidinas, flavonoides se los utiliza como colorantes alimentarios; así como flavonoides, taninos, ácidos polifenólicos tienen actividad antioxidante, coadyuvante en la microcirculación retiniana y antiagregación plaquetaria, microcirculación en general, reducción en la insuficiencia venosa crónica, considerado como coadyuvante nutrimental (Santamaria y col., 2012). Las antocianinas (ACN) son los pigmentos más importantes de las plantas vasculares. No son tóxicos y se extraen fácilmente en medios acuosos (Pazmiño-Durán y col., 2001).

## II. ANTECEDENTES

### 2.1. Secado

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). 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., 2006); preservando así la estructura, las características sensoriales y el valor nutricional del material de partida (Aguilera, 2003).

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).



*Figura 1. Secado de alimentos (Fuente propia).*

Dentro de la literatura existen investigaciones donde se reportan y analizan trabajos de secado de alimentos de los cuales destacan productos de hortalizas y frutas tal es el caso de Sun y col. (2019) en donde se revisa el efecto de los diferentes métodos de secado de las bayas, los parámetros de secado en la tasa de pérdida de agua de las bayas, y las condiciones de funcionamiento para la calidad general de las bayas en términos de contenido de humedad final, garantizando al mismo tiempo la preservación de los nutrientes.

### **2.1.2. Secado convectivo**

El secado convencional, también conocido como secado con aire caliente (SAC) o secado por convección (SC) es la técnica más económica y ampliamente adoptada en la industria alimentaria, aunque requiere largos tiempos de secado y altas temperaturas del aire. En el secado al aire, el aire calentado (de baja humedad relativa) se encuentra 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 de 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: (1) 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; (2) soplando aire caliente a través de un material granular húmedo, como en los secadores rotativos, de lecho fluidizado o de lecho de chorro; o (3) contactando el material húmedo sólido o particulado con un aire caliente (Kudra, 2012).

El secado con aire caliente 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 (Devahastin, 2000).

Kumar y col., 2021, estudiaron el secado de rodajas de calabaza espinosa (*Momordica dioica* Roxb. Ex Willd) en un secador convectivo a 40, 50, 60 y 70 °C de temperatura. En su trabajo se determinó el cambio en la calidad de la calabaza espinosa analizando el cambio en las características proximales, minerales, grupo funcional, clorofila, ácido ascórbico y antioxidantes. La muestra secada a 40 °C fue superior en calidad, mientras que a 70 °C se encontraron más proteínas y antioxidantes.

### 2.1.3. Secado eléctrico.

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. En este tipo de secadores los aspectos energéticos se evaluarán por tanto atendiendo a la fuente de energía utilizada para la generación de energía de aire caliente.

El calentamiento eléctrico rara vez se usa para la generación de aire caliente debido a su baja eficacia y elevado coste. Sus aplicaciones están generalmente limitadas a aquellos casos en los que se requieren temperaturas muy altas para el secado de productos en los que la contaminación debida a los productos de la combustión debe ser evitada (Fito Maupoey, 2001).

## 2.2. Energía solar.

### 2.2.1. El sol

El sol es una estrella que genera energía bajo un proceso nuclear de fusión, por medio del cual se convierte hidrógeno en helio, como se observa en la figura 2 (García y Pilatowsky 2017).

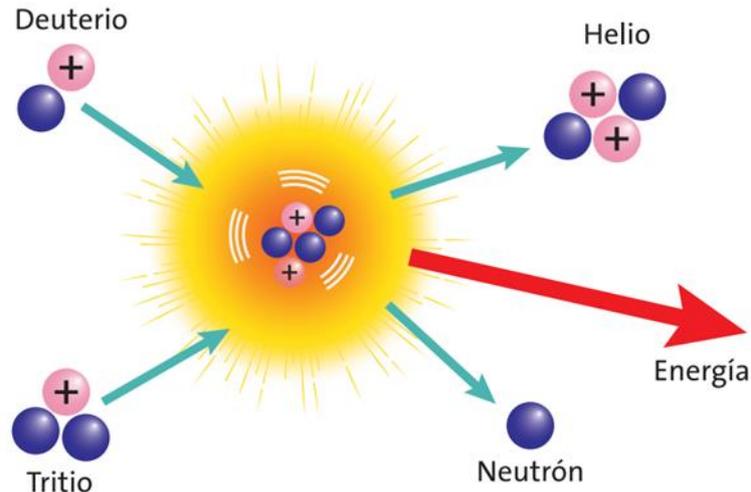


Figura 2. Reacción de fusión nuclear del Sol (García y Pilatowsky 2017).

### 2.2.2. Energía solar

La energía solar es una fuente de energía abundante y fácilmente disponible que puede desempeñar un papel importante en el suministro de energía a los edificios. (Kasaeian y Sarrafha 2021). Se encuentra entre los recursos energéticos renovables más prometedores, ya que está disponible de forma libre y abundante en muchas regiones del mundo (Kabir y col., 2018).

### 2.2.3. Radiación solar

La radiación solar es la energía electromagnética que se recibe del Sol en forma natural y que ha permitido la existencia de la vida en la Tierra. El recurso solar se entiende como la energía que en forma de radiación térmica procedente del Sol llega a la superficie terrestre y se puede utilizar para algún proceso energético (García y Pilatowsky 2017).

La energía solar, según sea su forma de captación y aplicación, podrá clasificarse como:

- Energía solar directa
- Energía solar indirecta.

La energía solar directa corresponde a la energía térmica, termodinámica y fotovoltaica, mientras que la energía solar indirecta la constituyen, la energía eólica, hidráulica, biomasa, geotérmica, marítima, etc.

Entre sus aplicaciones útiles de la energía solar se pueden citar:

La producción de agua caliente sanitaria (A.C.S), la calefacción y refrigeración de locales, la producción de electricidad, destilación y pasteurización del agua, como así también plantas de secado, invernaderos y otras (Arenas, 2019).

#### **2.2.4. Energía solar en México**

La energía solar en México es un recurso abundante distribuido en el territorio nacional. En general el conocimiento de los recursos energéticos renovables en el país es escaso, impreciso y con pocos beneficios para promover su aplicación masiva, tal es el caso de la radiación solar. (Ramos y col., 2014). Se realizó una exploración detallada del país para identificar estado por estado los niveles de DNI medio ( $\text{kWh/m}^2\text{año}$ ). El análisis mostró zonas del país con niveles de la Irradiancia Normal Directa (DNI) horaria entre 2157 y 2800  $\text{kWh/m}^2\text{año}$  en el noroeste, centro norte y península de Yucatán. Las áreas de DNI entre 1750 y 2156  $\text{kWh/m}^2\text{año}$  incluyen porciones del centro y sureste del país (SIGER, 2022).

### **2.3. Uso de la energía solar en el proceso de secado.**

#### **2.3.1. Uso de la energía solar en el Estado de Jalisco**

En el estado de Jalisco sus características climáticas muestran gran diversidad como se aprecia en la figura 3 que va desde cálido subhúmedo a semiseco templado, destacando el semicálido subhúmedo con lluvias en verano. La región proporciona las condiciones favorables para el aprovechamiento de una gran variedad de recursos, mismos que le dan la oportunidad de desarrollar energías renovables; particularmente la utilización del potencial solar. Asimismo, su clima favorece diferentes tipos de vegetación, una amplia variedad de cultivos y áreas propicias para asentamientos humanos e industriales (Ulloa y col., 2011).

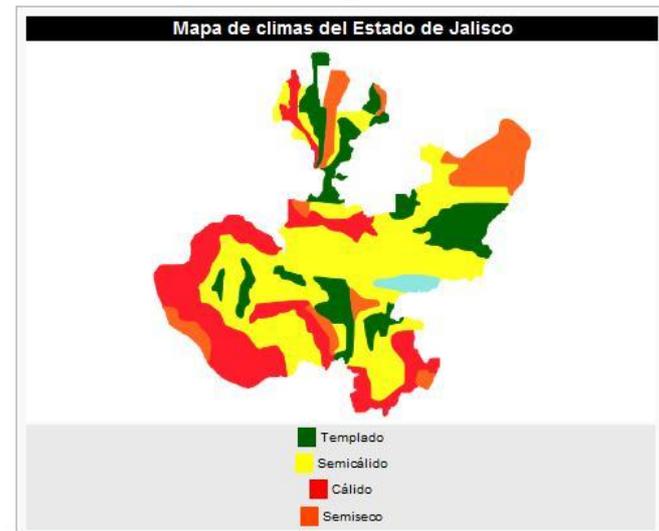


Figura 3. Estado de Jalisco y su clima (INEGI 2012).

### 2.3.2. Análisis climatológico

Los estudios realizados sobre la caracterización del clima del municipio de Tlajomulco de Zúñiga coinciden en la influencia de climas cálidos durante la mayor parte del año, se arrojan valores de acuerdo a las variables climáticas temperatura, precipitación, horas luz y radiación solar de acuerdo a los estudios se obtuvo en promedio temperatura de  $25 \pm 2.49$  °C durante el año 2019, arrojando el valor mensual máximo de  $29.39$  °C  $\text{wm}^{-2}$  durante el mes de mayo en la estación primavera y el menor de  $21.11$  °C durante el mes de enero en la estación invierno de igual manera para el año 2020 se obtuvieron resultados en promedio  $25.09 \pm 2.49$  °C, con valor mensual máximo de  $28.93$  °C para el mes de abril y mínimo  $20.81$  °C el mes de enero, de acuerdo a los resultados obtenidos se observa que la estación primavera es la que mayores valores de temperatura aporta durante todo el año. Respecto a la variable de precipitación se obtuvieron resultados los cuales indican el comienzo el día 6 de junio con un periodo de presencia hasta el 30 de septiembre obteniendo un lapso de tiempo de 3.8 meses en total con presencia de lluvia teniendo en consideración el día con mayor probabilidad de presencia de lluvia del 80% el 9 de julio.

En cuanto a la información relacionada a la radiación solar en la zona, los escasos estudios científicos existentes arrojan resultados prometedores con respecto al aprovechamiento del potencial solar local. Donde la temporada del año con mayor índice de aprovechamiento se ve reflejado durante la temporada

de primavera como se puede apreciar en la figura 5, obtenido en promedio  $677 \pm 104.7 \text{ w/m}^2$  para el año 2019, y durante el año 2020 se obtuvo un promedio de  $698.26 \pm 85.84 \text{ w/m}^2$ ; donde la radiación con índice más alto fue en la temporada de primavera durante el mes de abril con un promedio mensual de  $838.96 \text{ w/m}^2$  así como el promedio menor de todo el año fue de  $546 \text{ w/m}^2$  para el mes de enero, como se puede observar en la figura 4. Así como las horas de presencia de la luz se ve beneficiada para la temporada ya mencionada con 13.5 horas durante el mes de mayo las cuales nos indican las horas en que se puede utilizar la energía solar como se observa en la figura 5. Este conjunto de datos se llevó a cabo en la estación climatológica de Tecnológico Nacional de México campus Tlajomulco Jalisco.

Ulloa y col. (2011), mencionan que la Zona Metropolitana de Guadalajara recibe más de 270 días al año un promedio mínimo de 9 horas de sol; datos que concuerdan con lo obtenidos en esta investigación, por lo tanto, la zona es ideal para la utilización de la energía solar en el calentamiento de agua y producción de energía eléctrica, solo por mencionar algunos.

Los resultados del estudio realizado por González (2010) coinciden con los obtenidos por la SENER (2010) en cuanto al promedio de  $\text{Kwh/m}^2\text{día}$  (5.57) de radiación solar que recibe la ZMG.

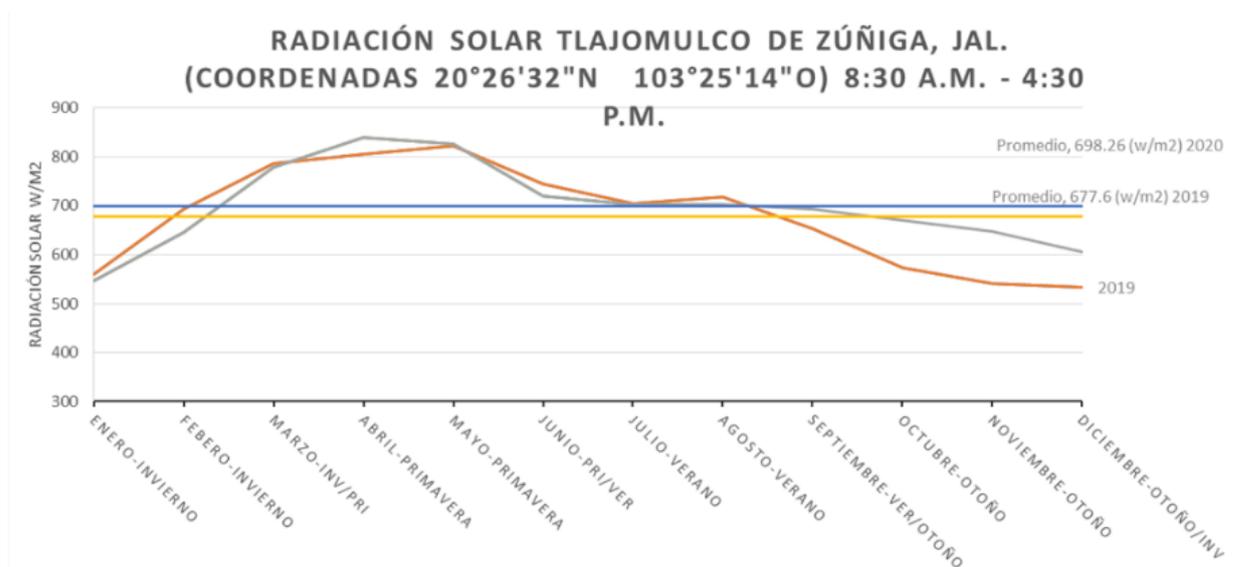


Figura 4. Promedio de radiación solar del año 2019 y 2020 (Fuente propia).

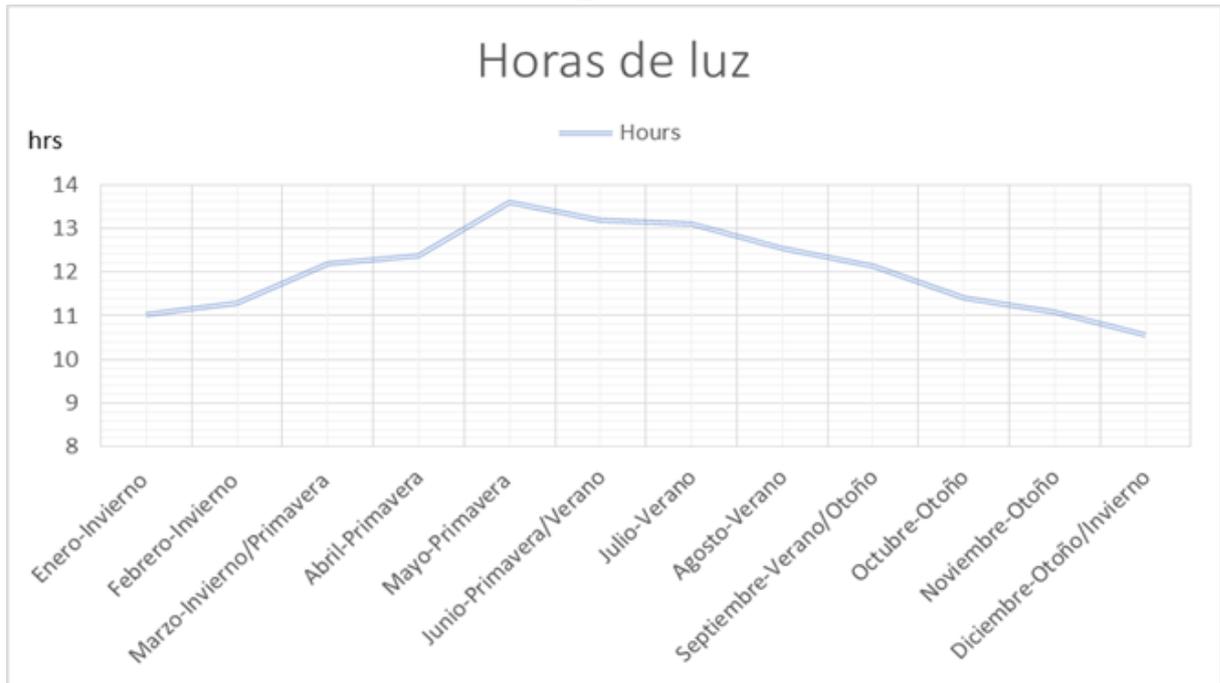


Figura 5. Horas luz presentes durante el día en las estaciones del año 2020 (Fuente propia).

## 2.4. Secador solar

El secado es una de las soluciones más importantes de conservación de alimentos, ha sido ampliamente investigado en los últimos años. Por lo tanto, este campo tiene una importancia considerable y también es necesario mejorarlo y desarrollarlo en la mayor medida posible. Hay diferentes diseños y formas de secadores solares para productos agrícolas (Sharma y col., 2009) Son clasificados según los métodos de secado (El-Sebaili y col., 2012): (1) secado al sol abierto (SSA), es el método más antiguo, (2) secado solar directo (SSD), (3) secado solar indirecto (SSI) y (4) secado solar mixto (SSM) o híbrido.

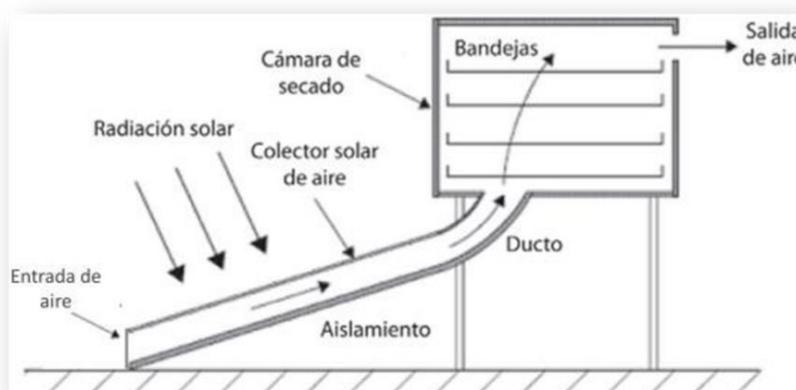
En la actualidad, la crisis energética y los métodos de reducción del consumo de energía se han convertido en un reto mundial en el que se está investigando mucho. El secado solar de diversos productos (como alimentos, verduras, frutas y hierbas) es una de las aplicaciones más importantes de la energía solar (Hnin y col., 2018).

## 2.4.1. Principio de los secadores solares.

El secador solar es un aparato que transmite calor desde la fuente de calor a un producto y transfiere masa (humedad) desde la superficie del producto al aire circundante. La función básica de un secador solar es aumentar la presión de vapor de la humedad que se encuentra dentro del producto y aumentar la capacidad de transporte de humedad del aire de secado al disminuir su humedad relativa. Durante el secado solar, el aire caliente captura la humedad del producto seco. La cantidad de humedad eliminada depende de la temperatura del aire seco donde el aire caliente tiene la capacidad de atrapar la humedad más que el aire frío (El Hage y col., 2018).

## 2.4.2. Componentes de los secadores solares.

En general, el secador solar se compone de tres componentes principales que son la cámara de secado, el calentador de aire y el sistema de flujo de aire. La cámara de secado es el lugar donde se colocan los alimentos secos. Protege los alimentos del polvo y la suciedad. En la mayoría de los casos, está aislado para aumentar la eficiencia de secado. El calentador solar (colector solar) es una caja de color oscuro con una cubierta transparente. Calienta el aire de secado al elevar la temperatura ambiente. Mientras que el sistema de flujo de aire expulsa el aire húmedo hacia los alrededores (El Hage y col., 2018).



*Figura 6. Deshidratador tipo "Colector y cámara de secado" (García y col., 2012).*

## 2.5. Clasificaciones de secadores solares

Se pueden presentar numerosos tipos o diseños de secadores solares en la literatura. Con esto en mente, la actualización persistente de las clasificaciones de los secadores solares debe desarrollarse debido al progreso continuo en el diseño de los secadores solares. Los secadores solares se clasifican según el método de flujo de aire, el modo de transferir calor del sol al producto y el tipo de cámara de secado. La Figura 7 ilustra las diferentes categorías de secadores solares.

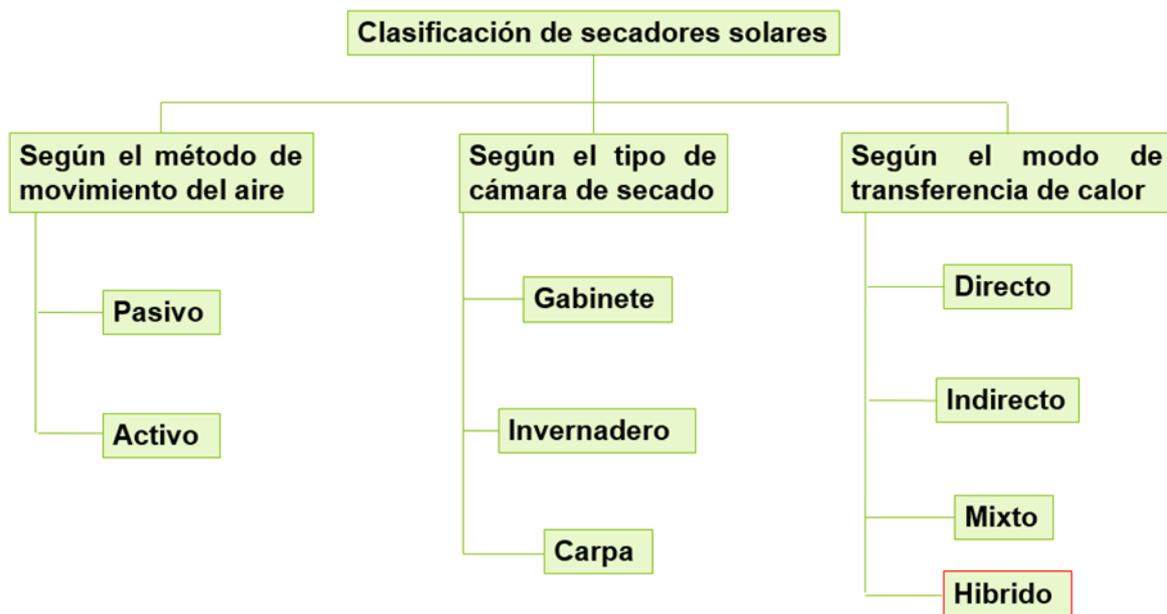


Figura 7. Clasificaciones de secadores solares (El Hage y col., 2018).

### 2.5.1. Modo de movimiento del aire

#### 2.5.1.1. Secadores solares pasivos y activos.

Los secadores solares pasivos dependen del movimiento natural del aire debido a la fuerza de flotabilidad, la diferencia de presión del viento o una combinación de ellos. Por lo tanto, este tipo de secadores se conoce como secadores solares de convección natural. Tales secadores solares tienen una velocidad de secado lenta debido al lento movimiento del aire (Bala y Janjai, 2012). Los secadores solares activos requieren ventiladores para conducir el aire a través de los componentes del secador, que se pueden montar en la entrada o en la salida. Tiene una velocidad de secado más alta en comparación con el modo pasivo,

pero necesita energía eléctrica para impulsar el ventilador (Gulcimen y col., 2016).

## 2.5.1.2 Modo de transferir calor

### 2.5.1.2.1. Secador solar directo

El secador solar directo está compuesto por una cámara de secado que está cubierta por un acristalamiento transparente compuesto de plástico o vidrio (Zarezade y Mostafaeipour, 2016). En secador solar directo, el producto se coloca en un recinto de cubierta transparente. La radiación solar es absorbida por el material y las superficies internas de la cámara de secado generando calor. Luego, el calor evapora la humedad del producto y, por lo tanto, se seca.

Los secadores directos se pueden construir de forma sencilla, son baratos y requieren un bajo coste de mantenimiento. Sin embargo, ese tipo de secador tiene una baja tasa de secado porque depende de las condiciones climáticas. Además, requiere una gran superficie de espacio y reduce la calidad del producto debido a la exposición directa al sol.

En estos secadores hay que reducir las pérdidas por convección y, por tanto, se puede aumentar la temperatura de la cámara de secado. Algunos secadores solares directos son: el secador de caja o armario solar o el secador solar de techo de cristal figura 8 (Oueslati y col., 2014) y el secador de invernadero (Mezhrab y col., 2010).

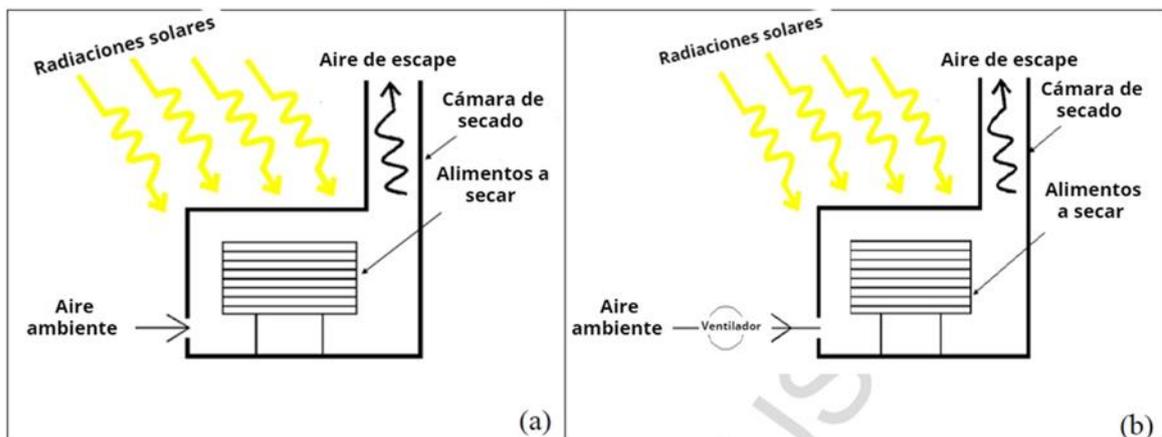


Figura 8. (a) Secado solar pasivo directo; (b) secador solar activo directo (El Hage y col., 2018).

## 2.5.1.2.2. Secador solar indirecto

El secador solar indirecto está compuesto por una cámara de secado que tiene una cubierta opaca, un ventilador y un calentador de aire solar/colector solar que puede ser un colector de placa fija o un colector de tipo concentrado. El colector solar calienta el aire atmosférico, en el que el producto no está expuesto directamente a la radiación solar. Luego, el aire caliente es conducido a la cámara de secado por el ventilador (en el tipo activo) donde transfiere el calor al material y evapora la humedad del mismo. En la figura 9 se muestra un esquema de los secadores solares pasivos indirectos y activos indirectos respectivamente.

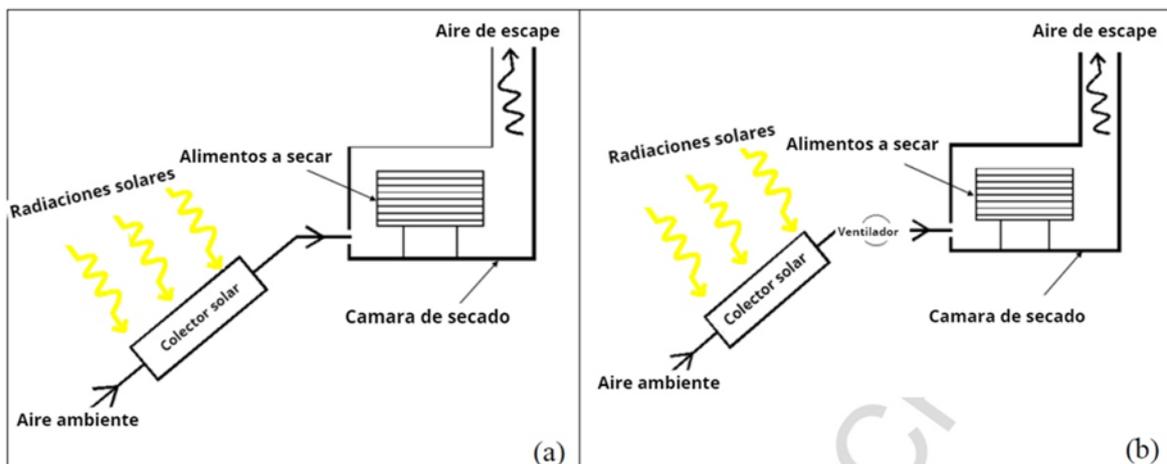


Figura 9. (a) Sector solar pasivo indirecto; (b) Secador solar activo indirecto (El Hage y col., 2018).

En la literatura se observan dos métodos de secador solar tipo indirecto; son (a) el tipo de circulación natural y (b) el tipo de circulación forzada (Kumar y col., 2016).

(a) Tipo de circulación natural: También se reconoce como secador solar pasivo debido a la circulación natural del aire por el efecto termosifón. Los alimentos se calientan por el aire caliente y luego la humedad contenida en el producto se elimina al aire exterior a través de la chimenea que se coloca en la parte superior de la cámara de secado por la circulación natural del aire (Lingayat y col., 2020).

Algunos de estos tipos son:

i. Secador solar tipo indirecto convencional:

Consiste en un colector solar de aire (CSA) para calentar el aire de entrada y una cámara para mantener los alimentos a secar (Arunsandeeep y col., 2018).

ii. Secador solar tipo indirecto con chimenea: Los principales componentes de este tipo son: SAC, armario de secado y una chimenea para crear la fuerza de tiro (Tedesco y col. 2019).

iii. Secador solar tipo indirecto con chimenea y sistema de almacenamiento de calor: Estos secadores están provistos de una chimenea para crear el tiro y de material de almacenamiento para guardar la energía térmica solar que puede ser utilizada durante la noche o cuando no hay luz solar (Yadav y col., 2018).

(b) Tipo de circulación forzada (modo activo) - Aquí, como ventilador eléctrico o soplador se utiliza para forzar el aire, dentro o fuera de la secadora. Por lo tanto, en este tipo de secadora es posible controlar la velocidad de secado. También se clasifica de la misma manera que el tipo de circulación natural con la adición de un ventilador o soplador (Fudholi y col., 2015).

Las ventajas del sistema de secado solar son las siguientes:

i) El color de los productos secados en el sistema de secado al aire libre es marrón oscuro, mientras que en el sistema de secado solar por aire se mantiene el color natural de los productos,

ii) Las cualidades físicas como el olor y la dureza de los productos eran satisfactorias en comparación con el sistema de secado al aire libre,

iii) Los productos secados en el secador solar están protegidos de la lluvia, los insectos y el polvo, y los productos secados eran de alta calidad en términos de sabor, color y textura (Sundari Umayal y col., 2013).

(iv) El contenido de humedad del producto puede controlarse según las necesidades,

(v) También es posible conseguir un secado uniforme del producto mediante un diseño adecuado del calentador de aire y del secador. El uso de la energía solar en el proceso de secado de productos agrícolas y plantas medicinales en particular se ha convertido en una de las inversiones económicas más populares y atractivas (Jangde y col., 2021).

### **2.5.2.3. Ejemplos de secadores de modo de transferir el calor: Secador de invernadero y secador solar mixto.**

Es un secador solar que combina la operación del colector solar con el sistema de invernadero. Las paredes y los techos de la secadora están fabricados con un material transparente como vidrio, fibra de vidrio, plástico estabilizado a los

rayos UV o láminas de policarbonato. Para mejorar la absorción de la radiación solar, se requiere una superficie negra. Tal tipo de secador tiene un control de secado considerable en comparación con otros tipos. Se puede aplicar para grandes cantidades de productos. El secador solar mixto es una combinación de los tipos directo e indirecto. La cubierta de la cámara de secado en el secador mixto es transparente. En dicho secador un colector separado precalienta el aire antes de entrar en la cámara de secado y luego la luz del sol añade calor a los productos que se van a secar.

#### **2.5.2.4. Secador solar híbrido**

Los secadores solares híbridos son secadores que dependen de la energía solar y de otra fuente como la biomasa o el combustible fósil. Estos secadores tienen la capacidad de funcionar sin energía solar, lo que reduce el riesgo de pérdida de alimentos. La diferencia sustancial entre los secadores solares mixtos y los secadores solares híbridos es que en los secadores solares mixtos la única fuente de energía es la energía solar, sin embargo, el modo de funcionamiento incluye una combinación entre los secadores solares directos e indirectos. Dicho esto, los secadores solares híbridos no dependen sólo de la energía solar, sino que combinan varias fuentes de energía como la energía solar y la biomasa, el GLP (Janjai y col., 2009), los colectores solares (Khanlari y col., 2020), etc. o utilizando los materiales de almacenamiento de energía (Atalay y col., 2021). Los sistemas híbridos permiten controlar las condiciones aerotérmicas dentro de la cámara de secado, como la temperatura, la velocidad del aire, la humedad, etc. Estas características son parámetros específicos para ampliar el uso generalizado de los secadores solares híbridos y para asegurar y controlar el valor del producto seco. (Hadibi y col., 2021).

El principio motivador del desarrollo del sistema de secado híbrido fue mejorar la calidad del producto y reducir las posibilidades de degradación del mismo. (Onwude y col., 2017). Los secadores híbridos son capaces de mejorar la cinética de secado y la calidad del producto optimizando la fuerza de cada técnica de secado (en términos de transferencia de calor y masa), preservando los compuestos nutricionales y bioactivos (por ejemplo, vitaminas y antioxidantes) y produciendo productos secos con excelentes características de calidad como el color, la textura, el sabor, el olor y la capacidad de rehidratación (Hii y col., 2021).

En el mundo actual de la tecnología desarrollada, los secadores solares híbridos son el sistema alternativo proporcionado para el secado solar rápido de productos con una calidad de producto deseable (Kumar y col., 2016). En la literatura se han discutido varios secadores híbridos en los que la energía solar ayudó al calentador de aire auxiliar, (Ferreira y col., 2007; López-Vidaña y col., 2013; Reyes y col., 2014) la convección forzada, (Sarsavadia, 2007; Juraev y Akhatov, 2009; Slama y Combarous, 2011; Singh, 2011; Banout y col., 2011) y la bomba de calor química (Fudholi y col., 2015). La operación de secado asistida por la energía solar se ha estudiado en la aplicación con varias otras técnicas para resolver los problemas que se enfrentan en las operaciones de secado convencionales (Hnin y col., 2018).

Hadibi y col. (2021), donde en su estudio se ha realizado con un sistema de secado híbrido solar-eléctrico para valorizar los excedentes de ajo en Argelia. El secador operó con tres temperaturas de secado 50, 60 y 70 °C bajo convección natural (CN) y velocidad de aire de 4,1 y 6,9 m/s. Dentro de los componentes y consideraciones de diseño de los secadores solares el más sencillo consiste en un colector, un absorbedor, una cámara de secado y un aislante. No obstante, se han desarrollado diversas variantes de diseño para mejorar el rendimiento de los secadores y cumplir el requisito de ofrecer productos secos de alta calidad (Mohana y col., 2020).

#### **2.5.2.4.1. Cubiertas de captador**

Como su nombre indica, un captador solar atrapa la radiación solar que es responsable de los efectos de calentamiento (Mohana y col., 2020) y utilizarla para calentar un fluido ya sea aire, agua u otro (Rodríguez 2021).

Los captadores se clasifican en no concentradores y concentradores en función de su modo de funcionamiento, es decir, de su capacidad para concentrar la radiación solar incidente recogida en una zona amplia en una región concreta. Los captadores utilizados en los secadores solares pueden ser parabólicos, cúbicos, de placa plana, de doble paso o de tubo de vacío, para satisfacer los requisitos específicos de la región y de la aplicación. Las consideraciones de diseño, como el ángulo de inclinación y la posición del colector, son cruciales para lograr una mayor eficiencia térmica (Arun y col., 2019). El diseño más

sencillo es un captador de placa plana, y suele combinarse con un armario de secado (Arabhosseini y col., 2019).

En los sistemas de secado con energía solar, el captador solar plano para el calentamiento del aire es quizás la parte esencial del sistema. Por tanto, es muy importante para el buen comportamiento del sistema de secado que el colector solar posea un elevado desempeño energético (Okó y Nnamchi 2012; Farahat y col., 2009). La magnitud que aprovechan es la irradiancia solar global, que es la potencia solar total (directa y difusa) por unidad de área que incide sobre la superficie captadora (Rodríguez, 2021).

El principio de funcionamiento de un captador solar plano con cubierta se basa en que la placa absorbidora posea una gran capacidad de absorción de la energía solar y una baja emisividad, que el medio de transporte sea capaz de tomar la mayor cantidad de esa energía del absorbedor y que la cubierta sea capaz de neutralizar la energía infrarroja emitida desde el absorbedor. En la figura 10 se muestra un esquema del captador solar plano (Koulibaly y Bayón 2015).

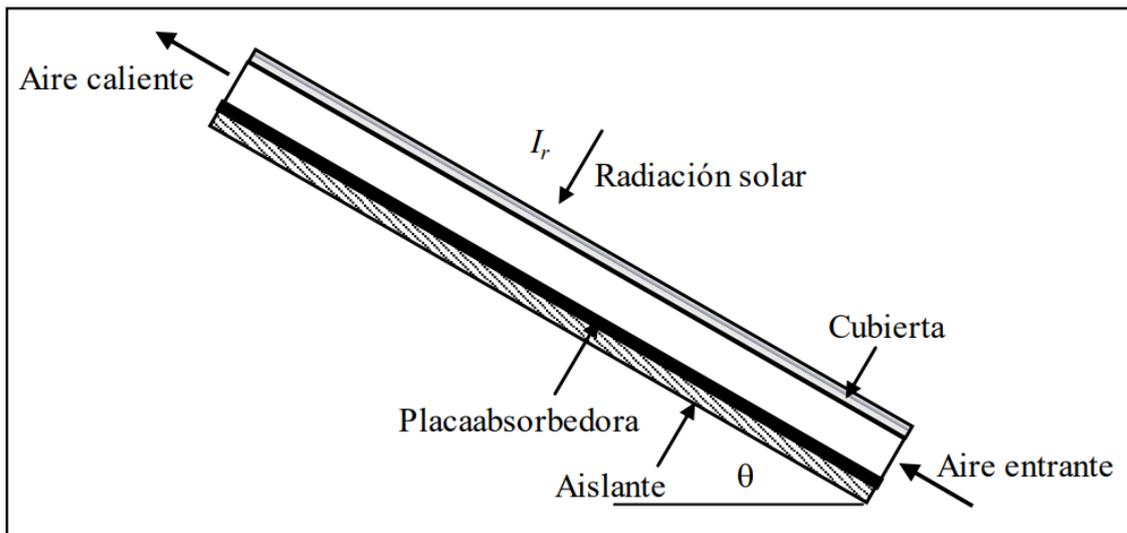


Figura 10. Esquema del calentador solar (Koulibaly y Bayón 2015).

#### 2.5.2.4.2. Resistencia eléctrica

El aire circulante es calentado en la cámara de resistencias eléctricas; el fluido es transportado por un ventilador, este ventilador es seleccionado mediante previo cálculo de tal manera que tenga una capacidad suficiente para adaptarse

al diseño de la red del sistema, permitiendo que llegue la corriente de aire caliente por todo el equipo, efectuándose la deshidratación uniforme de toda la carga de fruta colocada en el secador (Llumiquina y Suquillo 2015).

## 2.6. Optimización del secado convectivo

El secado de los alimentos provoca cambios físicos y químicos muy importantes. Cuando un alimento sólido pierde agua, se encoge y se deforma, lo que altera sus propiedades estructurales (Emadi y col., 2005; Kowalski y col., 2005).

Estas deformaciones dificultan la aplicación de modelos teóricos que describan la cinética de secado del material. En estos casos deben aplicarse modelos empíricos o semiempíricos (McMinn y col., 2005; Akpinar 2006; Arévalo-Pinedo y Murr 2006; Doymaz 2007). Los parámetros obtenidos con estos modelos sólo pueden utilizarse cuando el secado se realiza por el mismo método en materiales similares (en composición, forma y tamaño). Por otro lado, con la ecuación integrada de la segunda ley de Fick se puede calcular el coeficiente de difusión y su dependencia de la temperatura. Estos parámetros no dependen de la forma y el tamaño del material, por lo que esta ecuación puede aplicarse a otras condiciones de secado (Perez y Schmalk 2009).

El secado se trata de un fenómeno complejo de transferencia de calor y masa y es importante comprender los mecanismos de transporte de masa, como la difusividad efectiva de la humedad (DEH) y los parámetros del proceso que la afectan durante el secado de los alimentos. La relación de humedad (RH) está vinculada a la DEH y es la relación entre el contenido de humedad instantáneo (DHI) y el DHI inicial de la fruta, mientras que la DEH es un fenómeno de transporte interno y la velocidad a la que la humedad se mueve desde el centro de la fruta a su superficie donde se evapora (Onwude y col., 2016). La Deff es importante cuando se estudia el comportamiento del secado de frutas y verduras, y es una función de la temperatura del aire de entrada y de la RH de las muestras (Onwude y col., 2016).

El aumento de la temperatura de los alimentos a un nivel alto hace que las moléculas de agua se unan de forma más suelta a la matriz del alimento que a baja temperatura. En consecuencia, se requiere más energía para eliminar la humedad a baja temperatura en comparación con la alta temperatura. Además, la estructura del alimento y la fracción de vacío presente en él pueden afectar

significativamente a la difusividad de la humedad, por lo que, a baja porosidad, el valor de DEH fue principalmente por difusión de líquido, lo que es diferente de lo que se obtiene para el material granular o poroso, en el que el movimiento de la humedad es principalmente por difusión de vapor a través de los espacios vacíos o huecos (Obajemihí y col., 2021).

## 2.7. Generalidades Arándano

El arándano (*Vaccinium* spp.) es uno de los recursos de bayas más importantes, y sus productos relacionados están ampliamente disponibles en todo el mundo (Wei y col., 2020). El arándano es favorecido por los consumidores no sólo porque es delicioso y nutritivo, sino que también contiene 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).

Los arándanos más cultivados en todo el mundo pertenecen al género *Vaccinium* y la especie *corymbosum* y son nativos de América del Norte y regiones de Europa (Reque y col., 2014). Estos arándanos son de alta calidad y representan el 85% de la producción mundial de la fruta (Martín y col., 2020). El continente americano es el mayor productor de arándanos, acumulando tres cuartas partes de la producción mundial (Hidalgo y Almajo 2017). Los arándanos son pequeñas bayas dulces y jugosas de color azul intenso y alto contenido en compuestos fenólicos, como ácidos fenólicos, taninos, estilbenos, líganos y flavonoides, incluyendo antocianinas, flavonoles y flavonoides (Martín y col., 2020).

### 2.7.1. Antioxidantes

El oxígeno es esencial para la supervivencia de todos los seres vivos. Aproximadamente el 5% del oxígeno inhalado se reduce a radicales libres derivados del oxígeno en los procesos fisiológicos y metabólicos normales (Yu, 1994). Los átomos o moléculas que poseen electrones no apareados se denominan radicales libres. Los radicales más perjudiciales en sistemas biológicos son los radicales de oxígeno (a veces denominados especies de oxígeno reactivas), en especial superóxido,  $\bullet\text{O}_2^-$ , hidroxilo,  $\bullet\text{OH}$  y perhidroxilo,  $\bullet\text{O}_2\text{H}$ . El daño de tejido causado por radicales de oxígeno suele llamarse daño

oxidativo y los factores que protegen contra daño por radical de oxígeno se conocen como antioxidantes (Rodwell y col., 2016).

Aunque los radicales libres se producen de forma natural en condiciones aeróbicas, un exceso de radicales libres puede dañar todas las macromoléculas celulares, incluidas las proteínas, los carbohidratos, los lípidos y los ácidos nucleicos (Valko y col., 2007). Los radicales libres inician reacciones como la oxidación del ADN que, en última instancia, puede causar mutaciones en el material genético y posiblemente cáncer (Nakabeppu y col., 2006). Al oxidar las proteínas, se ha descubierto que el radical libre puede inhibir las enzimas o hacer que las proteínas se desnaturalicen o se degraden (Stadtman, 1992). Los radicales libres también se han implicado en la patogénesis de la diabetes, el daño hepático, la aterosclerosis, la inflamación, los trastornos cardiovasculares, los trastornos neurológicos y en el proceso de envejecimiento.

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 (*Vaccinium corymbosum* L.), posee, en general, un alto nivel de actividad antioxidante que está vinculado a los niveles de compuestos polifenólicos como los flavonoides, las catequinas y las antocianinas de las frutas. Éstos han demostrado inhibir la oxidación de las lipoproteínas de baja densidad y de los liposomas en el ser humano (Hangun-Balkir y McKenney 2012).

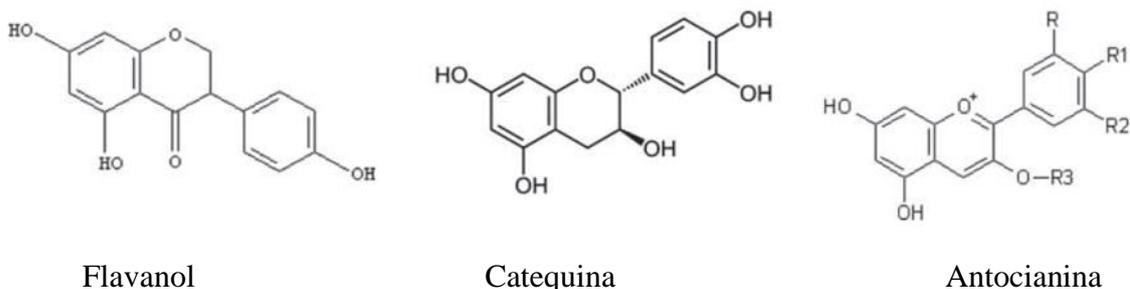
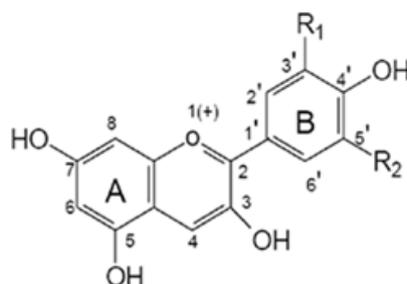


Figura 11. Estructura de compuestos polifenólicos comunes en las frutas (Hangun-Balkir y col., 2012).

## 2.7.2. 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 figura 12 (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. Variaciones estructurales del anillo B producen las seis antocianidinas conocidas (Garzón, 2008).



Aglicona	Sustituyentes		$\lambda_{\text{máx}}$ (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 12. Estructura básica y sustituyentes de las antocianinas (Durst y Wrolstad, 2001).

Además, actualmente se conocen 23 antocianidinas, aunque sólo 6 se encuentran con frecuencia en los alimentos: pelargonidina, cianidina, delphinidina, peonidina, petunidina y malvidina (Castañeda-Ovando y col. 2009).

Estos compuestos son inestables y se degradan fácilmente (Giusti y Wrolstad 2003), 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 (Bridle y Timberlake 1997; Castañeda-Ovando y col. 2009), como también el procesamiento y almacenamiento de los alimentos (Schwartz y col. 2008).

### 2.7.3. 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 antes de la cosecha y también están expuestos a numerosos contaminantes después de la cosecha y durante 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 cosecha y las condiciones de almacenamiento, así como del método de almacenamiento (Pobiega y col., 2021). La temperatura es el factor ambiental más importante que afecta a la calidad del arándano durante el almacenamiento postcosecha. Se recomienda el almacenamiento postcosecha a 0-5 °C y 90-95 % de humedad relativa (HR) para prolongar la vida postcosecha del arándano retrasando la senescencia y preservando la calidad del fruto del arándano (Chiabrando y col., 2009; Paniagua y col., 2014; Zhou y col., 2014).

El procesamiento de las frutas por deshidratación 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).

La deshidratación o secado de una fruta tiene como objetivo reducir la actividad del agua y, en consecuencia, la actividad microbiana y la velocidad de las reacciones químicas implicadas en los procesos de degradación (Vega-Mercado y col. 2001), con el fin de prolongar la vida útil (Reque y col., 2016).

### 2.7.4. Importancia económica del arándano

La producción de arándanos de arbusto alto ha aumentado enormemente desde finales de la década de 1990, lo que ha llevado a que la producción supere la demanda del mercado en algunas regiones de producción (Strik, 2012). La

mayor parte de la producción proviene de especies de la sección *Cyanococcus*, incluidos cultivares de *Vaccinium corymbosum* L. (arándano alto) y *Vaccinium ashei* (arándano ojo de conejo; sinónimo de *Vaccinium virgatum* Ait.), y rodales nativos de *Vaccinium angustifolium* Ait. (arándano bajo) (Hancock y col., 2008). Estos arándanos son de alta calidad y representan el 85% de la producción mundial de la fruta (Martín y col., 2020).

El consumo de arándanos en el mercado mundial se da principalmente en el consumo fresco, marcado por el 65% de los volúmenes totales. El mismo tuvo un gran crecimiento en los últimos 15 años; desde 2001 hasta 2016 ha aumentado un 440,14%, es decir que se ha quintuplicado en una década y media (Moyano y col., 2019).

En el año 2014, la producción mundial de esta frutilla fue de 1'177,881 toneladas (FAOSTAT, 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), Bielorusia (8,000), Países Bajos (6,400) y España (5,100). El primer productor participa con 28% del mercado mundial (basado en FAOSTAT, 2017; Cruz 2018).

## 2.8. Actividad de agua y humedad

Los alimentos de baja humedad (ABH) y los alimentos de humedad intermedia con actividad de agua ( $a_w$ ) inferior a 0.85 abarcan una amplia gama de productos alimenticios con una larga vida útil a temperatura ambiente (Beuchat y col., 2013; Farakos y Schaffner, 2013).

La  $a_w$  mínima a la que pueden crecer los microorganismos (es decir, la  $a_w$  por debajo de la cual las actividades fisiológicas necesarias para la división celular se ven afectadas) es de 0.60. La  $a_w$  mínima para el crecimiento de la mayoría de las bacterias es de aproximadamente 0,87, aunque las bacterias halófilas pueden crecer a  $a_w$  tan bajas como 0,75 (Beuchat y col., 2013).

Según la teoría de la estabilidad basada en los valores de  $a_w$ , el material tiene la mayor estabilidad con una  $a_w$  de 0,30. Las bacterias, las levaduras y el moho no son capaces de provocar el deterioro de los alimentos a una  $a_w$  de 0,30. Además, ya no se producen reacciones enzimáticas y las reacciones no

enzimáticas se producen con baja velocidad. Asimismo, la oxidación de las grasas se produce con una velocidad mínima (Staniszewska y col., 2020).

La figura 13 muestra las tres zonas hipotéticas en las que se puede dividir el agua contenida en un producto. La que integra la zona III se considera “libre”, se encuentra en macrocapilares y forma parte de las soluciones que disuelven las sustancias de bajo peso molecular, es la más abundante, fácil de congelar y evaporar, y su eliminación reduce la actividad del agua a 0.8.

En la zona II, el agua se localiza en diferentes capas más estructuradas y en microcapilares; es más difícil de quitar que la anterior, pero al lograrlo se obtienen valores de la actividad del agua de aproximadamente 0.25. Esta fracción correspondería, junto con la monocapa, al agua “ligada”.

Por último, el agua en la zona I equivale a la capa monomolecular y es la más difícil de eliminar en los procesos comerciales de secado; en algunos casos se puede reducir parcialmente en la deshidratación, pero esto no es recomendable, ya que, además de que se requiere mucha energía y se daña el alimento, su presencia ejerce un efecto protector, sobre todo contra las reacciones de oxidación de lípidos, porque actúa como barrera del oxígeno (Badui Dergal, S. 2016).

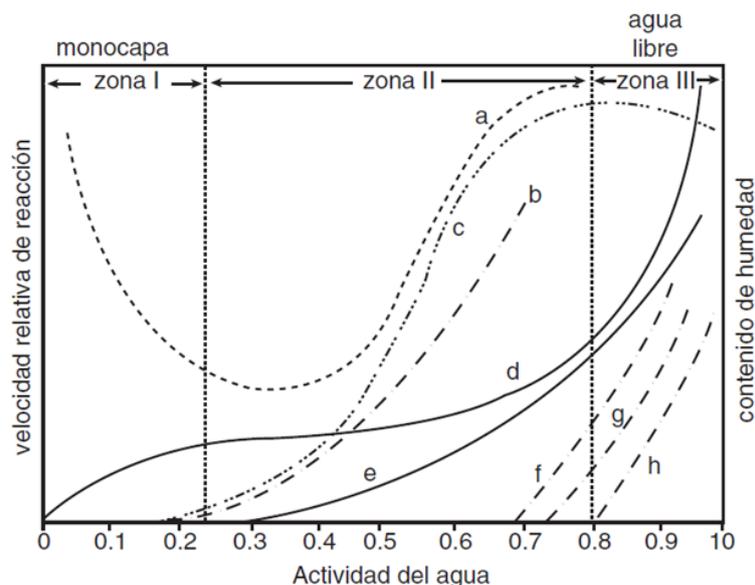


Figura 13. Cambios que ocurren en los alimentos en función de la actividad del agua.

a) Oxidación de lípidos; b) reacciones hidrolíticas; c) oscurecimiento no enzimático; d) isoterma de adsorción; e) actividad enzimática; f) crecimiento de hongos; g) crecimiento de levaduras, y h) crecimiento de bacterias (Badui Dergal, S. 2016).

## 2.8.1. Relación actividad de agua y humedad

Los frutos secos con contenidos de humedad entre el 15 y el 20% tienen valores de  $a_w$  entre 0,60 y 0,65, un rango en el que sólo pueden crecer las levaduras osmófilas y algunos hongos. Sin embargo, los frutos de arándano secados a 80° y 90°C mostraron valores de  $a_w$  entre 0,72 y 0,76, un rango que es seguro con respecto a la contaminación por microorganismos productores de toxinas, que ofrecen riesgos para la salud pública, como la ocratoxina y la aflatoxina (Beuchat, 2013; Reque y col., 2016).

## 2.8.2. 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. Brevemente, 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.

### III. PROBLEMÁTICA

Dentro de la industria alimentaria se presenta un gasto energético de 10-15% del total de la energía eléctrica, principalmente dirigida para sus procesos de secado, 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, la deshidratación de alimentos presenta características de acuerdo a su composición por lo que se deben de optimizar los procesos de deshidratación de manera particular para determinar eficiencia y características fisicoquímicas para que estos equipos de secado operen de manera eficiente.

### IV. JUSTIFICACION

El ahorro de energía en los procesos de secado es una de las prioridades para las industrias alimentarias; por lo que, la incorporación de energías renovables principalmente la energía solar a través del uso de secadores solares híbridos reduce el consumo de energía eléctrica; destacando los frutos ricos en antioxidantes como el arándano (*Vaccinium corymbosum* L.), el cual toma posición entre las frutas con gran particularidad para el estudio del secado. Teniendo alta viabilidad para industrializarlo cumpliendo con características de alta calidad. Por lo tanto, en este trabajo de estudio se evaluará el secado convectivo del arándano con un secador solar híbrido y compararlo con un secador convencional.

### V. HIPÓTESIS

El secador solar híbrido tiene menor consumo de energía eléctrica en comparación con un secador convencional y cumple con las características fisicoquímicas, capacidad antioxidante y sensoriales al aplicar el proceso de secado en la industria de los alimentos.



## VI. OBJETIVOS

### 6.1. Objetivo general

Evaluar la eficiencia energética y de calidad del secado convectivo de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.), entre un secador solar híbrido y un secador de bandejas eléctrico.

### 6.2 Objetivos específicos

- 1.- Evaluar la características fisicoquímica y sensorial del arándano seco obtenido del secador eléctrico de bandejas.
- 2.- Optimizar la temperatura de secado de arándano en el secador de bandejas eléctrico.
- 3.-Evaluar la característica fisicoquímica del arándano seco obtenido del secador solar híbrido.
- 4.- Evaluar el consumo energético de un secador solar híbrido y el secador de bandejas eléctrico.

## VII. MATERIALES Y MÉTODOS

### 7.1.-Obtención de la materia prima.

Se utilizó arándano variedad *Vaccinium corymbosum* L. procedente del municipio de Amatitán Jalisco. Se seleccionaron bayas maduras, frescas y con características de textura homogéneas con diámetro entre 1.5 cm.

Antes de comenzar a trabajar con la materia vegetal, se limpió para posteriormente lavar con agua corriente y enseguida realizar un desinfectado con solución microbicida para frutas y verduras.

### 7.2.-Diseños experimentales

Se realizó un diseño factorial completo al azar en el que se consideraron dos factores que comprenden: Temperatura y equipo de secado.

Con 3 variables de temperatura: 60°C, 70°C y 80°C. Así como dos variables de equipo de secado: Secador solar híbrido y secador eléctrico de bandejas. Este diseño se realizó aleatoriamente y por triplicado, obteniendo un total de 15 corridas (experimentos).

**Tabla 1. Diseño experimental (DCA) temperatura óptima Secador eléctrico.**

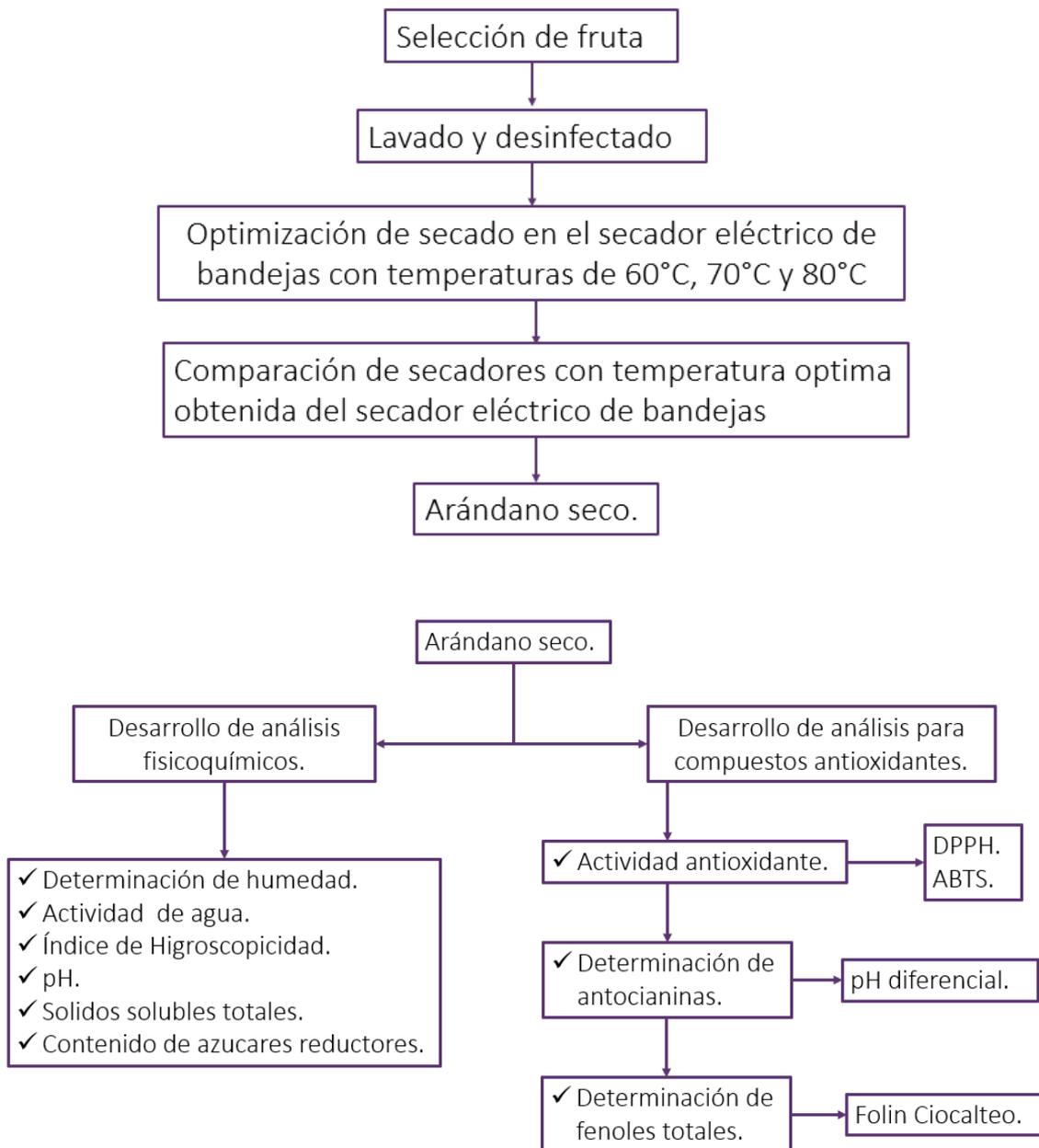
Temperatura °C	Equipo
80	Eléctrico
70	Eléctrico
60	Eléctrico

**Tabla 2. diseño experimental (DCA) comparación de secadores.**

Temperatura °C	Equipo
Optima	Eléctrico
Optima	HSC

### 7.3. Esquema general de trabajo

La figura 14 nos muestra el diagrama del plan general de trabajo para cada uno de los tratamientos de secado, los cuales se llevaron a cabo a diferentes temperaturas, así como diferente tiempo de secado. A cada tratamiento se le realizaron análisis fisicoquímicos, compuestos antioxidantes, colorimetría y análisis sensorial.



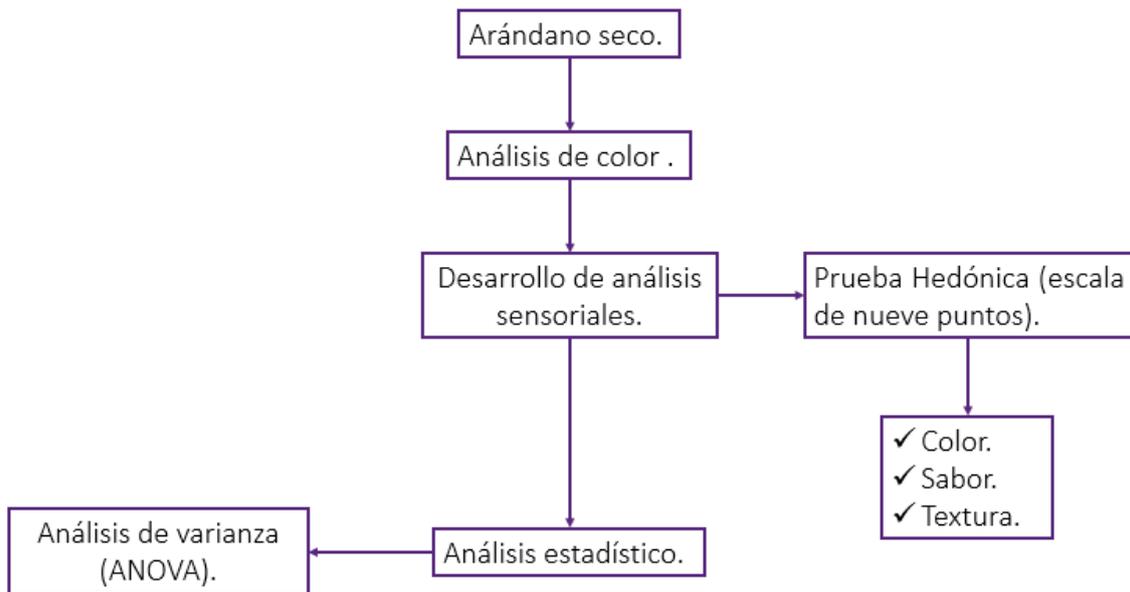


Figura 14. Etapas de desarrollo de metodologías de trabajo (Fuente propia).

#### 7.4. Secado por Convección de arándano en secador eléctrico de bandejas.

Se utilizó un secador eléctrico de bandejas de secado por convección de aire caliente escala piloto (POLINOX S.A.) para el proceso. Las condiciones operativas del secado por convección fueron: temperaturas de aire 60°C, 70°C y 80°C hasta alcanzar un contenido de humedad de  $2,03 \pm 0,04$  kg H<sub>2</sub>O kg de materia seca (Zielinska y Michalska 2016). La cantidad de la muestra utilizada en cada experimento se determinó en 0.5 kg. Los experimentos se realizaron por triplicado. El secador cuenta con un ventilado mediante circulación forzada de aire asistida por ventilador. Los experimentos se realizaron con un flujo de aire de  $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . Antes del secado, las muestras se extendieron uniformemente sobre una bandeja de malla metálica. Los cambios de masa se controlaron a intervalos de 60 minutos. Los procesos de secado se detuvieron cuando no se observaron variaciones en la masa durante dos mediciones consecutivas (Sharma y Prasad 2004).



Figura 15. Bandeja de malla metálica con arándano fresco (Fuente propia).

## 7.5 Análisis fisicoquímicos de arándano seco en secador solar.

### 7.5.1. Determinación de Humedad

La humedad, se determinó utilizando la metodología de sólidos totales en frutas y en productos de frutas. Se secó la muestra a 105°C en una estufa de calentamiento durante 18 horas, controlando el peso antes y después del secado (AOAC. 920.151, 2002); se realizan tres réplicas experimentales (Moreno y col., 2014). Se utilizó la ecuación 1 para la determinación de humedad de las muestras de secado de cada uno de los tratamientos llevados a cabo.



Figura 16. Estufa para determinación de humedad por pérdida de peso (Fuente propia).

Ecuación 1. Determinación de humedad.....% en humedad =  $\frac{(P-P1)}{P2} * 100$

En donde:

P = Peso del recipiente con la muestra húmeda, en gramos.

P1 = Peso del recipiente con la muestra seca.

P2 = Peso de la muestra en gramos.

### 7.5.2. Actividad de agua

La actividad de agua se midió de manera instrumental directa, en un activímetro (Mfr # HYGROLAB-3 SET, 115V) colocando dos piezas de arándanos secos de cada tratamiento en el activímetro; la medición, se basa en la saturación del aire dentro de la cámara de muestreo del equipo con la humedad presente en el producto, alcanzándose el punto de rocío, que es cuantificado mediante la capacidad reflectiva del espejo de condensación. Las determinaciones, se realizaron por triplicado, para cada muestra evaluada (Moreno y col., 2014)



Figura 17. Activímetro (Fuente propia).

### 7.5.3. Índice de higroscopicidad

El índice de higroscopicidad se realizó de acuerdo con el método propuesto por (Fritzen-Freire y col., 2012) modificado (ecuación 2). Se pesó una pieza de arándano seco en un portaobjetos de cristal el cual se colocó en un desecador a 25°C que 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 2. El índice de higroscopicidad se expresó como g de agua absorbida por cada 100g de materia seca. Se analizaron las muestras por triplicado y el valor medio se registró.

*Ecuación 2. Índice de Higroscopicidad...Índice de higroscopicidad=* 
$$\frac{(PV+PMF)-(PV+PMI)}{24}$$

En donde:

PV es el peso del vidrio.

PMF es el peso final de la muestra.

PMI es el peso inicial de la muestra.



*Figura 18. Desecador con muestras de tratamientos de arándano secado en secador eléctrico (Fuente propia).*

#### 7.5.4. pH

El pH se determinó por el método descrito por la AOAC 10.041/84 (2005). Se vertieron tres gramos de arándano en tres vasos de precipitados que contenían 30 ml de agua destilada y se dejaron reposar durante 2 horas, pasado este lapso de tiempo se sometieron al proceso de molienda con una batidora de inmersión (Hamilton Beach 2 Velocidades Acero Inoxidable Mod. 59765) durante dos minutos a una velocidad alta posteriormente se utilizó un potenciómetro (Hanna HI 2210) para determinar el pH de las muestras. El medidor de pH se sumergió en la muestra y la lectura se tomó después de unos 4 minutos cuando se estabilizó todas las muestras se realizan lecturas por triplicado (Ofori y col., 2020).



Figura 19. Potenciómetro (Fuente propia).

### 7.5.5. Sólidos solubles totales

La Sólidos Solubles Totales se midieron usando un refractómetro digital (Refractómetro, Brix 0,0 a 93,0% Atago 3830 pal-3); primeramente, se preparando un extracto del material seco en agua destilada (p/v), 3 gramos de arándano seco en 30 ml de agua destilada, esta mezcla permaneció en reposo durante 2 horas, posteriormente se molió con una batidora de inmersión (Hamilton Beach 2 Velocidades Acero Inoxidable Mod. 59765) durante dos minutos a velocidad alta, enseguida se filtraron cada uno de los extractos con papel filtro (Poro mediano). Los valores ajustados se expresan en Brix. Se toman tres lecturas para cada tratamiento en cada muestreo (Romano y col., 2011).



Figura 20. Refractómetro (Fuente propia).

## 7.5.6. Extracción de Azúcares

Para la extracción se trabajó con 3 g de muestra seca de arándanos con 30 ml de agua destilada se dejaron hidratar durante 2 horas a temperatura ambiente para enseguida triturar con una batidora de inmersión (Hamilton Beach 2 Velocidades Acero Inoxidable Mod. 59765) durante 2 minutos a una velocidad alta, filtrar (poro medio) y recuperar el extracto filtrado para posteriormente analizar con reactivo DNS.

## 7.5.7. Contenido de azúcares reductores por método ácido dinitrosalicílico DNS

Los azúcares reductores se determinaron mediante el uso de un método colorimétrico que emplea ácido dinitrosalicílico (DNS) propuesto por Miller en 1959. Para la aplicación del método DNS de Miller se necesitó preparar el reactivo DNS, se disolvieron 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-dinitrosalicílico). Esta mezcla se aforo a 50 mL con agua destilada y se almaceno en un frasco ámbar a 4°C. La concentración de azúcares reductores se determinó utilizando una curva de calibración absorbancia en función de concentración. Para obtener esta curva se preparar una solución madre 10 g/L de glucosa, como se muestra en la figura 21, 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 Model #6132) a una longitud de onda 550 nm.

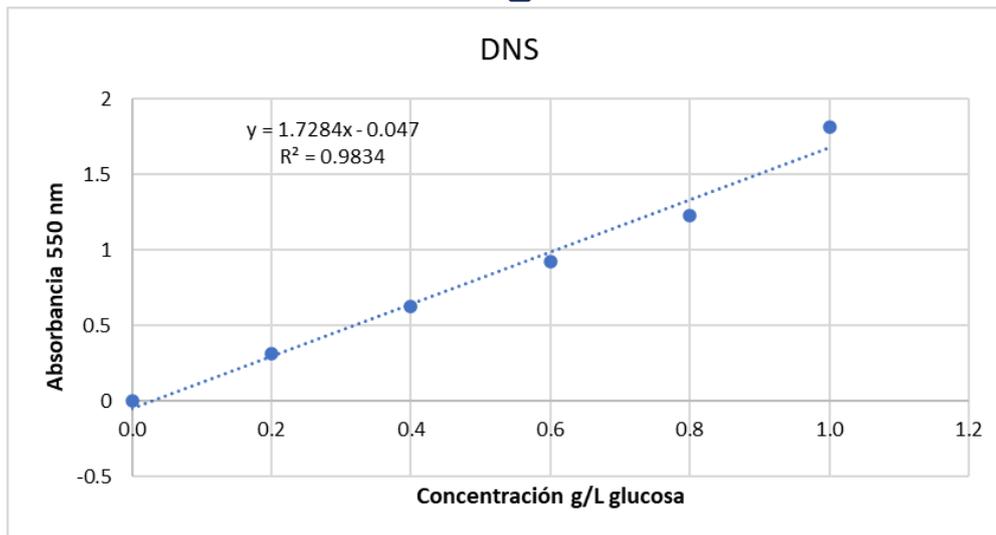


Figura 21. Curva de calibración de azúcares reductores por metodología de ácido dinitrosalicílico (DNS). Se utilizó glucosa como estándar (Fuente propia).

#### 7.5.7.1. Análisis de muestras

Una vez construida 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 reposar 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. Para el promedio se utilizaron tres replicaciones y las desviaciones estándar fueron máximo de 10% (Avila y col., 2012).

#### 7.5.8. Análisis para compuestos antioxidantes

##### 7.5.8.1. Preparación de extractos para determinación antioxidante

Se utilizaron 30 g de arándanos secos y como solvente: metanol 80%, ácido clorhídrico 1% y agua destilada 19%, se mezcló perfectamente en un matraz Erlenmeyer. Se molieron los arándanos con el solvente preparado en una licuadora convencional (Oster® con vaso de vidrio y dos velocidades más pulso BLSTKAGWPB) a velocidad baja durante un minuto, se dejó en maceración

durante 24 horas a temperatura ambiente y bien cubierto el recipiente, todo el proceso de preparación se realizó en total obscuridad para evitar la degradación de compuestos por la luz.

### 7.5.8.2. Método DPPH·(2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo)

Como primer paso fue crear una curva de calibración utilizando como estándar TROLOX (6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid), mezclando 2 mg en 10 ml de metanol al 80%, después se realizaron las correspondientes diluciones para obtener concentraciones de 800, 700, 600, 500, 400, 300 y 100  $\mu\text{M}$  del estándar Trolox como se observa en la figura 22.

De la misma manera se preparó el radical DPPH (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl) mezclando 3.9 mg de DPPH en 100 ml de metanol al 80% cubriendo de la luz en todo momento. Se tomaron 100  $\mu\text{L}$  de cada una de las concentraciones de Trolox, se hicieron reaccionar con 2900  $\mu\text{L}$  del reactivo del radical DPPH, se dejaron reposar por un periodo de 30 minutos para su posterior lectura a una absorbancia de 517 nm en un espectrómetro de luz ultravioleta-visible (Ocean Optics Jaz UV/Visible Spectrophotometer with Remote Probe) se utilizó como blanco metanol al 80% que también es considerado como control negativo.

Para la calibrar el espectrofotómetro primeramente se realizó la lectura de metanol al 80% para posteriormente leer el blanco que contiene metanol al 80% y reactivo DPPH dando como resultado la absorbancia del blanco de la formula (Marinova y Batchvarov 2011).

El porcentaje de inhibición de DPPH· se determinó con la ecuación 3 que se describe a continuación:

$$\text{Ecuación 3. Porcentaje de Inhibición} \dots \dots \dots \% \text{ de Inhibición} = \frac{\text{Abs Blanco} - \text{Abs Muestra}}{\text{Abs Blanco}} * 100$$

Donde

Abs Blanco = Absorbancia de metanol 80% + reactivo DPPH

Abs Muestra = Absorbancia de muestra + reactivo DPPH

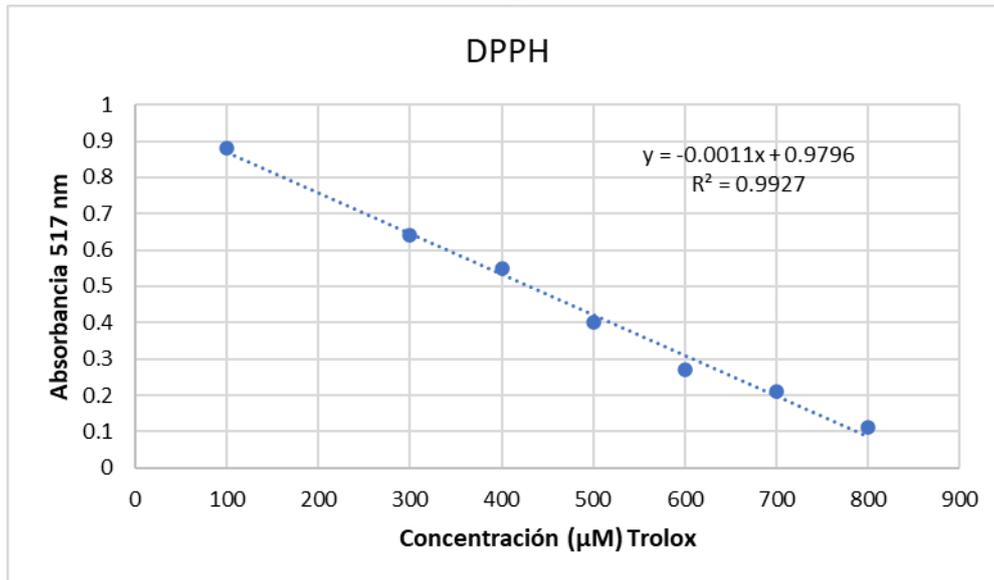


Figura 22. Curva de absorción de DPPH• con diferentes concentraciones del estándar Trólox (Fuente propia).

#### 7.5.8.2.1. Análisis de muestras

Para las muestras se realizó una dilución 1:80 con agua destilada (v/v), de las cuales se tomaron 100 µL y se hicieron reaccionar con 2900 µL del reactivo DPPD se agitaron perfectamente y dejaron reposar durante un lapso de 30 minutos, para el blanco se utilizó 100 µL de metanol al 80 % y se hicieron reaccionar con 2900 µL del reactivo DPPH con el mismo tiempo de las muestras.

#### 7.5.8.4. Método ABTS<sup>+</sup>

La actividad antioxidante total se midió mediante la decoloración del catión radical del ácido 2,2'-azino-bis (3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico (ABTS) según el método descrito por Re y col., 1999.

Como primer paso se generó una curva de calibración que consistió en mezclar 4 mg de Trolox en 1 mL de etanol al 70% (16 mM), de esta solución patrón se tomaron 250 µL y se aforo a 1 mL de etanol al 70 % para obtener una solución 4mM a partir de esta solución se realizaron las correspondientes diluciones para obtener concentraciones de 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 y 400 µM del estándar Trolox.

### 7.5.8.4.1. Radical ABTS<sup>•+</sup> (ácido 2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico))

De la misma manera se generó el radical ABTS mediante la mezcla de 0.003 g de persulfato de potasio (2.45 mM) y 0.0194 g de ABTS (7 mM) en 5 ml de agua destilada, se agitó y se dejó reposar durante 16 horas a temperatura ambiente antes de usarse, en ausencia total de luz (este reactivo es estable a temperatura menor a los 4 °C durante 5 días).

Después se tomaron 500 µL de la solución del radical y se diluyeron en 40 ml de agua destilada para obtener una absorbancia de  $0.7 \pm 0.02$  (Abs inicial) a 754 nm de absorbancia medida en un espectrómetro de luz ultravioleta-visible (Ocean Optics Jaz UV/Visible Spectrophotometer with Remote Probe).

La figura 23 indica la curva de calibración, donde se tomaron 400 µL de cada una de las concentraciones, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 y 400 µM del estándar Trolox y se hicieron reaccionar con 3600 µL del radical ABTS durante 7 minutos, para su posterior lectura a 754 nm de absorbancia medida en un espectrómetro de luz ultravioleta-visible, como blanco se utilizó agua destilada.

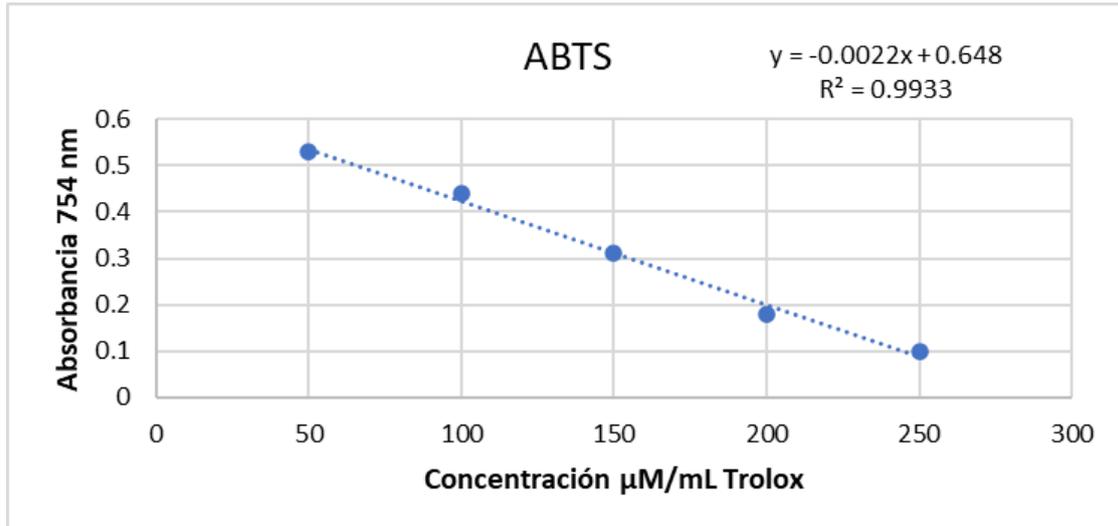


Figura 23. Curva de absorbancia del ABTS<sup>•+</sup> con diferentes concentraciones del estándar Trólox (Fuente propia).

### 7.5.8.4.2. Análisis de muestras

Para el análisis de las muestras se diluyeron 1:200 (v: v) en agua destilada, se tomaron 400 µL y se hicieron reaccionar con 3600 µL del radical ABTS, se agitaron fuertemente, se dejaron reposar durante 7 min, para su posterior lectura

a 754 nm de absorbancia (Abs final) medida en un espectrómetro de luz ultravioleta-visible (Ocean Optics Jaz UV/Visible Spectrophotometer with Remote Probe) (Arnao, 2000).

El porcentaje de inhibición se calculó mediante la ecuación 4.

$$\text{Ecuación 4. Efecto antirradical} \dots \dots \dots \text{Efecto antirradical} = \frac{\text{Abs Blanco} - \text{Abs muestra}}{\text{Abs Blanco}} * 100$$

### 7.5.8.5 Determinación de antocianinas por pH diferencial

Las muestras secas de arándanos se disolvieron en tampones de 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 tomaron 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 siguiendo las ecuaciones 5 y 6.:

*Ecuación 5. Absorbancia diferencial de pH.*

$$\text{Abs} = [(\text{Abs}520\text{nm} - \text{Abs}700\text{nm})]_{\text{pH}1.0} - [(\text{Abs}520\text{nm} - \text{Abs}700\text{nm})]_{\text{pH}4.5}$$

El contenido de TMA se calculó mediante la siguiente ecuación:

*Ecuación 6. Total, de Antocianinas Monoméricas.*

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

Donde:

Abs: es la absorbancia

MW: es el peso molecular (449,2 g mol<sup>-1</sup>)

DF: es el factor de dilución

I: es la longitud de la trayectoria (1 cm)

$\epsilon$ : 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 (Pallas y col., 2013).

### **7.5.8.5.1. Preparación del Buffer pH 4.5 y pH 1.0**

pH 4.5: Se mezclaron 32.812 g de acetato de sodio en 980 ml de agua bidestilada para obtener una solución 0.4 M, se agito hasta disolver completamente, posteriormente se agregó HCl concentrado hasta que llego a un pH 4.5 se afora en un matraz volumétrico de 1.0 L.

pH 1.0: Se preparo una solución 0.025 N, que consistió en disolver 1.86 g de KCl en 980 mL de agua bidestilada, se agito hasta disolver completamente, una vez disuelto se agregó HCl concentrado hasta que llego a un pH 1.0, se transfirió a un matraz volumétrico y se aforo a 1.0 L. Este buffer, se almaceno en refrigeración, siendo estable hasta por cuatro meses se recomienda verificar siempre el pH antes de su uso.

### **7.5.8.5.2. Análisis de la Muestra**

Se tomo 1 ml de la muestra mediante una pipeta volumétrica y se agregó a un matraz volumétrico de 10 ml, se aforo 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 dejaron reposar durante 15 min para que se estabilicen, posteriormente transcurrido el tiempo, se leyeron a absorbancias de 520 y 700 nm en un espectrómetro de luz ultravioleta-visible, las absorbancias fueron determinadas en un espectrofotómetro (Ocean Optics Jaz UV/Visible Spectrophotometer with Remote Probe) 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.

### **7.5.8.6. Determinación de fenoles totales**

Los fenoles totales se determinaron mediante el método espectrofotométrico de Folin-Ciocalteu usando ácido gálico como material de referencia. Se preparó una disolución patrón de ácido gálico de 0,1 g/L, para lo cual se pesaron 25 mg de ácido gálico, se colocaron en un matraz aforado de 25 mL y se llevaron a volumen con agua destilada, enseguida se preparó una dilución 1:10 con agua destilada (siempre se utiliza una solución recién preparada).

De la misma manera se preparó una disolución de carbonato de sodio al 20 % pesando 5 g de carbonato de sodio en un matraz aforado de 25 mL, inicialmente se disolvió en 15 mL de agua destilada y se llevó a agitación hasta su completa disolución, finalmente se llevó a su volumen de aforo con agua. Por otro lado, se preparó una disolución 1N del reactivo de Folin Ciocalteu, por medio de una dilución 1:2 del reactivo comercial (2N) en agua destilada; el reactivo se protegió de la luz y se colocó en refrigeración hasta su uso.

A partir de la disolución patrón de ácido gálico, en tubos protegidos de la luz, se hicieron las diluciones necesarias con agua destilada para obtener concentraciones de 8, 16, 24, 40, 56 y 80  $\mu\text{g}/\mu\text{L}$  como de observa en la figura 24, para la preparación de la curva de calibración se tomaron cantidades de los reactivos de acuerdo con la tabla 3

**Tabla 3. Curva de calibración de fenoles totales.**

<b>Concentración <math>\mu\text{g}/\mu\text{L}</math></b>	<b><math>\mu\text{L}</math> de disolución 1:10 de muestra patrón 1g/L ac. Gálico</b>	<b><math>\mu\text{L}</math> de Reactivo Folin ceocalteu 1 N</b>	<b><math>\mu\text{L}</math> Carbonato de calcio al 20%</b>	<b><math>\mu\text{L}</math> agua</b>
<b>0</b>	0	500	500	3000
<b>8</b>	80	500	500	2920
<b>16</b>	160	500	500	2840
<b>24</b>	240	500	500	2760
<b>40</b>	400	500	500	2600
<b>56</b>	560	500	500	2440
<b>80</b>	800	500	500	2200

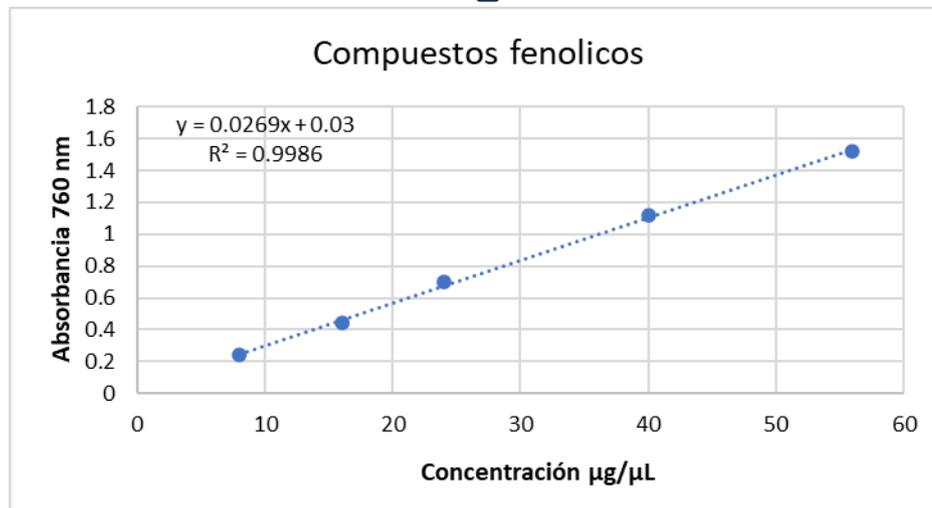


Figura 24. Curva de absorbancia de ácido gálico con diferentes concentraciones (Fuente propia).

El contenido de fenoles de cada extracto es expresado en mg/g de peso seco de la planta, basándose en la curva de calibración del material de referencia de ácido gálico, de ahí que se utilice el término “Unidades de ácido gálico equivalentes por gramo de extracto o materia vegetal desecada” (Avella y col., 2008).

#### 7.5.8.6.1. Extracción de compuestos fenólicos

En este método se homogenizo la muestra sólida de arándanos y se tomaron 3g y se agregan 40 ml del líquido de extracción, acetona, agua, ácido acético (70:29,5:0,5 v/v). Se llevaron a agitación durante una hora a temperatura ambiente. Se filtro y se determinó la concentración de fenoles solubles según el método citado anteriormente (Barreto y col., 2016).

#### 7.5.8.6.2. Análisis de la Muestra

Para la determinación de fenólicos totales de la muestra, se tomó 1 mL y se diluyo ya que su antecedente contenía muchos compuestos fenólicos (1:40) y (1:80). De las diluciones se tomó 1 mL, se les adiciono 1.5 mL de la solución del reactivo Folin-Ciocalteu, se agito en el vortex dejando en reposo a temperatura ambiente por 5 minutos; pasado el tiempo de reposo se agregó 1.5 mL de carbonato de sodio al 20%. Se agito fuertemente y se dejó reposar durante 90 minutos a temperatura ambiente en completa oscuridad. Después de este tiempo

se midió la absorbancia a 760 nm en un espectrofotómetro de luz ultravioleta visible (Ocean Optics Jaz UV/Visible Spectrophotometer with Remote Probe) Reportándose los fenólicos totales como ( $\mu\text{g}/\mu\text{L}$  de ácido gálico) (Gutiérrez, 2009).

### 7.5.8.7. Análisis de colorimetría

Las mediciones de color se realizaron con un software medidor de color digital, para visualización de imágenes (Versión 5.11 de Apple Inc.). Se utilizaron tres muestras de arándano seco, una por cada tratamiento que se llevó a cabo; los arándanos se fotografiaron en tres puntos tomando en cuenta la parte superior, inferior y lateral de la superficie de cada una de las muestras, estas fueron iluminadas con un aro de luz cálida en total oscuridad (Cámara profesional Nikon D5300; modo manual: velocidad 1/350, diafragma: F 9.5 e ISO: 1000) Las fotografías fueron analizadas por triplicado. El valor resultante fue la media de los tres valores medidos. Los resultados de los parámetros de luminosidad ( $L^*$ ), y color ( $a^*$  coordenadas rojo/verde (+a indica rojo, -a indica verde),  $b^*$  coordenadas amarillo/azul (+b indica amarillo, -b indica azul)) se dividieron en categorías.

La saturación de color y el tono de cada una de las muestras de determinaron con las ecuaciones 7 y 8 que se muestran a continuación.

Ecuación 7. Saturación de color  $C^*$  .....  $C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$

Ecuación 8  $H^*$  (tono) .....  $H^* = \arctg \frac{b^*}{a^*}$

Las diferencias de color (E) correspondientes a cada una de las muestras que son descritas en la ecuación 9 (Mezquitillo Bocanegra y col., 2014).

Ecuación 9. Diferencias de color .....  $\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$

### 7.5.8.8 Análisis sensoriales

#### 7.5.8.8.1. Prueba Hedónica (escala de nueve puntos)

A los panelistas se les pide evaluar muestras codificadas de los arándanos secos, indicando cuanto les agrada cada muestra, marcando una de las categorías en la escala, que va desde "me gusta extremadamente" hasta "me disgusta extremadamente" la tabla 4 menciona cada una de las escalas con su respectivo significado. Cabe resaltar que la escala puede ser presentada gráfica, numérica o textualmente, horizontal o verticalmente y se utilizó para indicar las diferencias en gusto del consumidor de los productos (Clark y col., 2009). En esta escala se permitió asignar la misma categoría a más de una muestra (Watts y col., 1989). Las variables evaluadas en este análisis fueron color, sabor y textura de las muestras de cada temperatura de secado. Las muestras se presentaron en recipientes idénticos, codificados con letras aleatorias del abecedario de un 1 dígito, para los tratamientos secados a 60°C se designó la letra D como código de identificación, de igual manera la letra Z se asignó para los tratamientos de 70°C así como la letra P como código para los tratamientos a 80°C cada uno de estos se menciona en la tabla 5. El orden de presentación de las muestras fue aleatorio para cada panelista (Ramírez-Navas, 2012).

**Tabla 4. Escala para prueba hedónica de 9 puntos utilizada para evaluación de atributos sensoriales.**

Puntaje	Categoría	Puntaje	Categoría
1	Me disgusta extremadamente	6	Me gusta levemente
2	Me disgusta mucho	7	Me gusta moderadamente
3	Me disgusta moderadamente	8	Me gusta mucho
4	Me disgusta levemente	9	Me gusta extremadamente
5	No me gusta ni me disgusta		

**Tabla 5. Boleta para prueba hedónica de 9 puntos utilizada para evaluar atributos sensoriales del arándano seco en secador eléctrico de bandejas.**

CÓDIGO	Calificación para cada atributo		
	Color	Sabor	Textura
D (60°C)			
Z (70°C)			
P (80°C)			

### 7.6. Análisis estadístico

Todos los análisis se realizaron por triplicado y los resultados experimentales fueron procesados con el programa estadístico “Minitab®” aplicando un análisis de varianza de una vía (Anova). Las diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre las medias de los datos se analizaron mediante una prueba de “Tukey”.

## VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 8.1. Optimización de secado de arándano en secador eléctrico de bandejas

#### 8.1.1 Determinación de cinéticas de secado

La tabla 6 muestra los distintos tipos de secado de cada temperatura establecida, así como la humedad final del arándano seco. El contenido de humedad inicial de los arándanos fue de  $85 \pm 0.20\%$  en base húmeda, se redujo hasta  $15.03 \pm 0.09\%$  base húmeda y  $0.2 \pm 0.09 \text{ g H}_2\text{O}^*\text{g}$  materia seca. Trabajando con temperaturas de  $60^\circ\text{C}$ ,  $70^\circ\text{C}$  y  $80^\circ\text{C}$  siendo el tiempo de secado de 17 horas el más largo con la temperatura de  $60^\circ\text{C}$  así mismo de tuvo un tiempo de secado de 12 horas a la temperatura de  $70^\circ\text{C}$  y un mínimo de tiempo de 7 horas refiriendo se a la temperatura de  $80^\circ\text{C}$ . De acuerdo a la relación tiempo de secado y temperatura a mayor temperatura menor el tiempo de secado como se observa en las figuras 25 y figura 26 con la velocidad de secado es mayor a una menor temperatura; de igual manera las curvas de velocidad de secado carecen de un periodo de velocidad constante durante el secado esto ocurre después de un breve periodo de atemperamiento de los arándanos, comienza un descenso de la velocidad que puede subdividirse en dos etapas siendo velocidad de secado decreciente y ajustable al modelo de Page (Martin-Gómez y col., 2020; Zia y Alibas, 2021).

**Tabla 6. Valores humedad final, tiempo de secado y consumo energético de secador eléctrico.**

Temperatura de secado	Humedad Final gr H <sub>2</sub> O*g MS	Tiempo de secado (min)
60°C	0.290251524 <sup>a</sup>	1020
70°C	0.225663767 <sup>a</sup>	720
80°C	0.192696089 <sup>a</sup>	420

$\alpha$  0.05

Estos resultados son similares a los reportados en literatura, donde se menciona que el aumento de temperatura muestra una rápida disminución de tiempo de

secado. López y col. (2010) estudiaron la cinética de secado convectivo por aire de arándanos variedad O'Neil 50°C, 60°C, 70°C, 80°C y 90°C y se encontró que entre más alta la temperatura de secado del aire, se tiene una disminución de tiempo como es observado en este estudio. Zia y Alibas (2021) realizaron el secado convectivo de arándanos a 50°C, 70°C y 90°C con el menor tiempo de secado 340 min para 90°C seguido de 650 min para 70°C y el mayor tiempo 3540 min para 50°C. Su estudio también concluyó que el aumento de las temperaturas provocaba una rápida disminución del tiempo de secado.

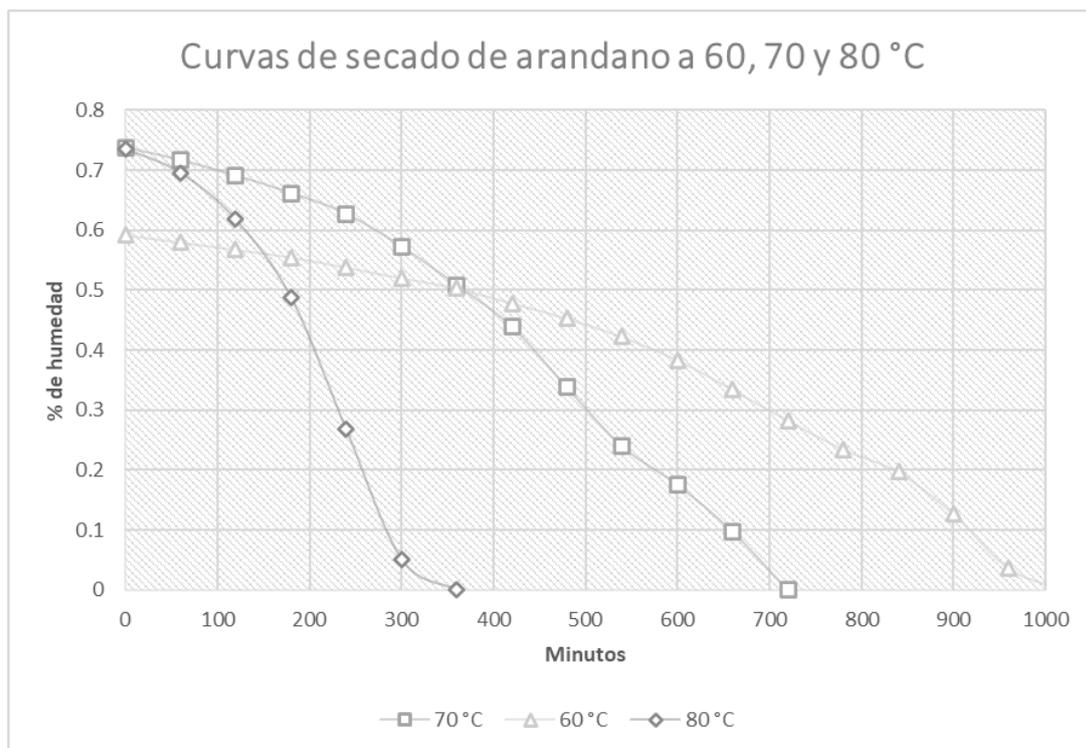


Figura 25. Curva de secado de arándano a 60, 70 y 80 °C (Fuente propia).

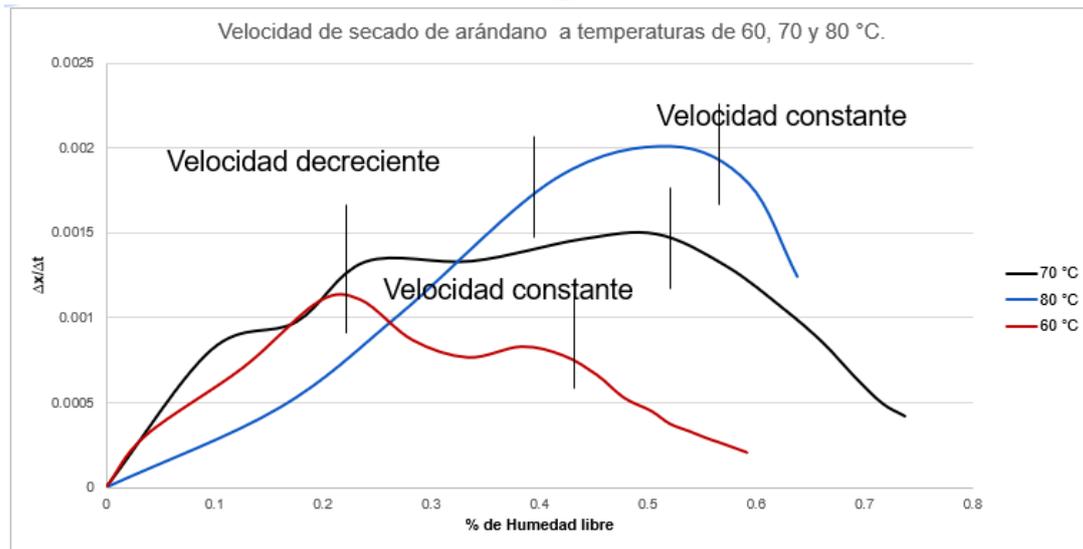


Figura 26. Velocidad de secado de arándano a diferentes temperaturas (Fuente propia).

De acuerdo a los datos experimentales se formó el perfil del contenido de humedad en base seca para las temperaturas experimentales realizadas, ya que conforme a la temperatura del aire que circula dentro de la cámara de secado tiende a modificar el peso y la humedad que contiene el arándano fresco; no obstante se tiene una diferencia marcada respecto las temperaturas utilizadas en las cuales se presenta una diferencia significativa relacionado al tiempo de secado como se puede observar en los gráficos de curvas de secado así como velocidad de secado, por lo que se puede afirmar que la velocidad de secado es afectada considerablemente por la temperatura, en relación a los análisis fisicoquímicos realizados las variables humedad, índice de higroscopicidad color y actividad de agua no fueron significativos y para las variables de azúcares reductores, sólidos solubles totales antocianinas y pH mostraron diferencia significativa resultando mejor parámetro respecto a las diferencias mencionadas en literatura el tratamiento de 70 y 80 °C en comparación a 60°C, para el análisis sensorial se determinaron tres variables color, sabor y textura, en donde se tuvo preferencia por las características del tratamiento a 70°C en cuanto a las variables analizadas, de acuerdo a estos resultados y coincidir en los análisis fisicoquímicos y primordialmente en los análisis sensoriales se determina como el óptimo de secado para el arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) en un secador de bandejas con un tiempo de secado de 12 horas y un flujo de 0.35 m<sup>3</sup>\*min<sup>-1</sup>.

1, conforme a esta temperatura se realizará el secado de arándano en la comparación de ambos secadores.

## **8.2. Comparación de secadores con temperatura optima obtenida del secador eléctrico de bandejas**

El desarrollo del análisis de consumo energético del secador solar en comparación del secador eléctrico de bandejas se muestra en la tabla , donde se observan las variables evaluadas; en el caso del porcentaje del tiempo sin trabajar de cada uno de los equipos, como se observa en la tabla 7 con un 79% para el secador eléctrico de bandejas y 45% correspondiente al secador solar híbrido donde nos muestra mejor porcentaje sin trabajar para el secador eléctrico debido ya que el secador solar debe permanecer mayor tiempo trabajando para llegar a la temperatura de 70°C la cual corresponde a los experimentos trabajados en el secador solar. Dentro de la variable del porcentaje de tiempo trabajando se presenta una diferencia entre los secadores en cuanto al tiempo que permanecen encendidas las resistencias eléctricas de cada uno, considerando 2.52 horas en el secador eléctrico y 6.6 horas para el secador solar de acuerdo con el porcentaje presentado en la tabla correspondiente a cada equipo. Tanto el costo de precalentamiento como el tiempo del secado de arándano a 70 °C por 12 horas (metodología establecida) es considerablemente elevado para el secador solar a diferencia del secador eléctrico convencional debido al alto porcentaje de trabajo de las resistencias que integran el secador solar híbrido

### 8.3. Análisis fisicoquímicos

El contenido de humedad inicial de los arándanos frescos del tratamiento de 60°C fue de 6.0 g H<sub>2</sub>O\* g materia seca (85% ± 4 en peso húmedo) que durante las 17 horas se llegó a peso constante resultando una humedad de 0.2 g H<sub>2</sub>O\* g materia seca (Zielinska y Michalska 2016).

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 (Karathanos y Belessiotis, 1999).

Se puede apreciar que la temperatura influye en forma decreciente en la tasa de extracción de humedad como se muestra en la figura 26.

Según la FAO (2010), el contenido de humedad final deseado para las frutas secas es del 15% para las frutas secadas convencionalmente (Phuon y col., 2021). La figura 27 muestra los resultados de cada una de las temperaturas con las que se trabajó la fruta del arándano, llegando a la humedad descrita en bibliografía mencionada.

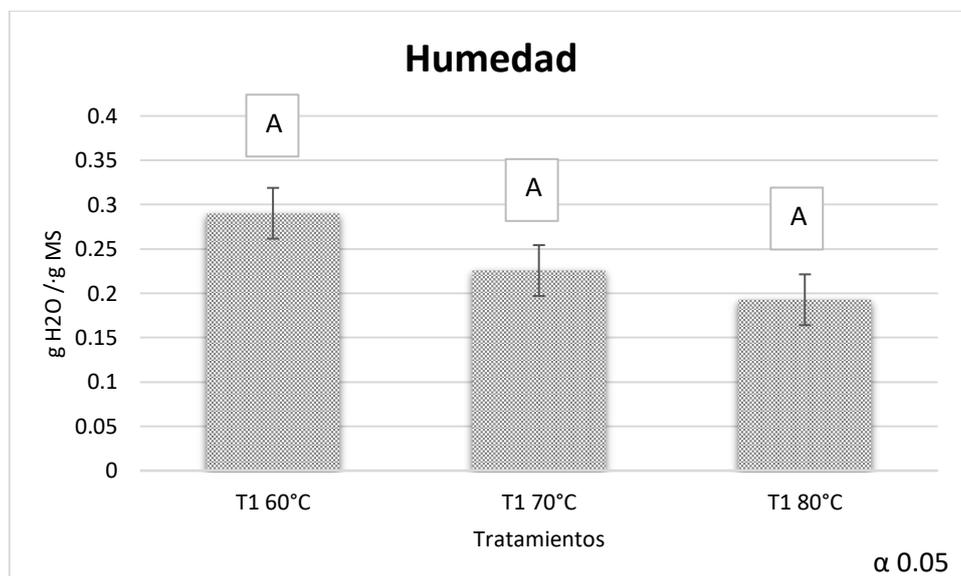
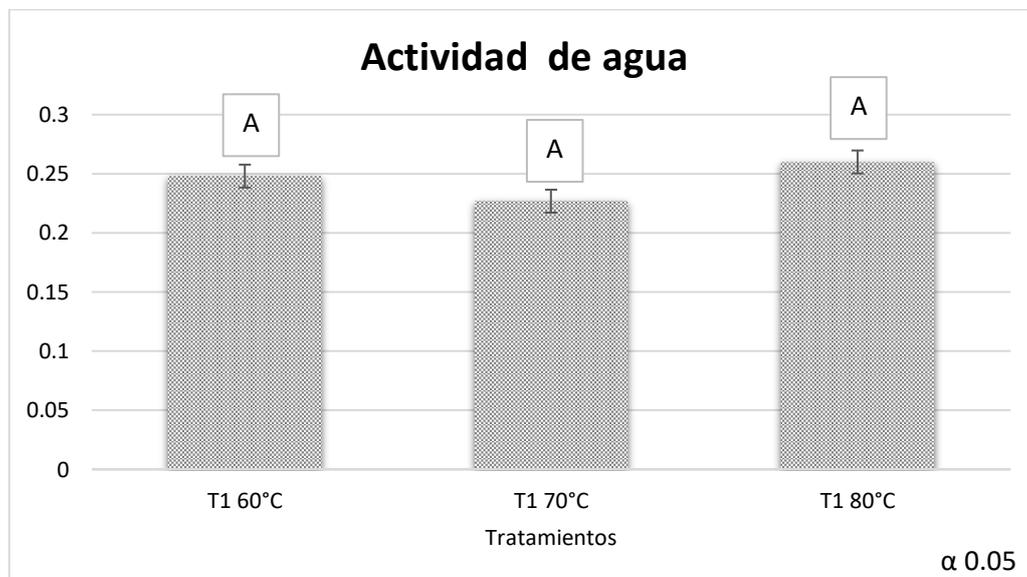


Figura 27. Contenido de humedad de tratamientos sometidos al proceso de secado convectivo en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a  $p < 0,05$  (Fuente propia).

En el presente estudio, la actividad de agua del arándano fresco fue de alrededor de  $0,85 \pm 0,20$ . Para las muestras de secado convectivo en secador eléctrico de los tratamientos con las temperaturas de  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $70^{\circ}\text{C}$ , y  $80^{\circ}\text{C}$ , los valores de  $A_w$  fueron, respectivamente, de  $0,196 \pm 0,00$  a  $0,2775 \pm 0,00$ , de  $0,184 \pm 0,00$  a  $0,303 \pm 0,00$ , y de  $0,2095 \pm 0,00$  a  $0,356 \pm 0,00$ . 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). En el estudio de Maltini y col (2003), la máxima actividad de agua requerida para las frutas secas osciló entre 0,60 y 0,65. En la figura 28 se aprecia como es que los arándanos secos tratados en esta investigación alcanzaron los niveles de aceptación de actividad de agua y contenido de humedad, que permiten su almacenamiento seguro.



*Figura 28. Actividad de agua de tratamientos sometidos al proceso de secado convectivo en el secador eléctrico de bandejas. ( $60^{\circ}\text{C}$ ) tiempo de secado de 17 horas; ( $70^{\circ}\text{C}$ ) tiempo de secado 12 horas y ( $80^{\circ}\text{C}$ ) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a  $p < 0,05$ ) (Fuente propia).*

En un entorno de alta humedad relativa (70%-90%), en comparación los arándanos, tienden a tener la mayor capacidad higroscópica comparada con otras frutas, lo que se debe principalmente a que la estructura interna de los arándanos era más leve o a que el contenido de sustancias solubles era mayor. Clemente y col., 2011 también consideraron que en el rango de humedad relativa

de 85%-90%, el aumento del contenido de agua relativa de la muestra podría ser causado por los compuestos solubles y los poros de la muestra (Chen y col., 2021). En la figura 29 se muestra el efecto de las diferentes condiciones de secado sobre la higroscopicidad del producto. El índice de higroscopicidad de todas las muestras secadas aumentó con el tiempo. Li y col., 2020 consideraron que el menor contenido de azúcares reductores en los frutos secos en pueden ser responsable de la débil higroscopicidad de las muestras. Los azúcares reductores se consideran altamente higroscópicos. Sin embargo, el contenido de azúcares reductores en las muestras secadas con una temperatura de 80°C durante 7 horas fue temperatura superior al de las muestras tratadas con temperaturas de 60°C y 70°C, pero mostraron una higroscopicidad similar en todos los tratamientos.

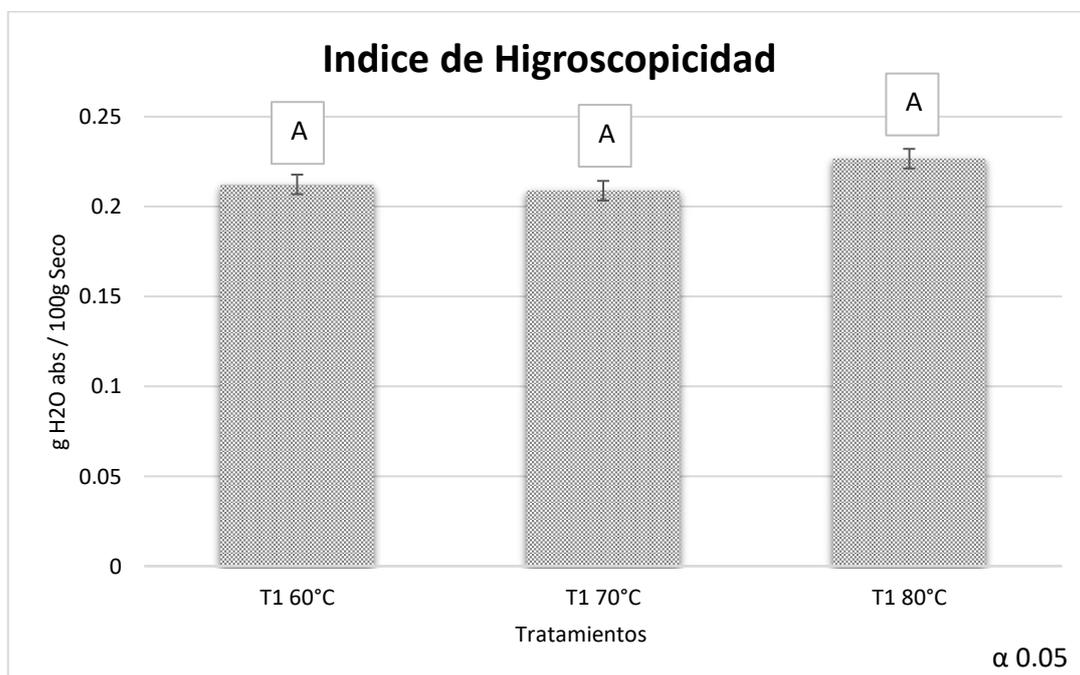


Figura 29. Índice de higroscopicidad de tratamientos sometidos al proceso de secado convectivo en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a  $p < 0,05$  (Fuente propia).

La prueba ANOVA para la variable pH reveló diferencias significativas para los tratamientos ( $p \leq 0,05$ ). En la figura 30, se muestra la disminución del pH de los

arándanos secos obtenidos de los diferentes tratamientos. La comparación entre los tratamientos reveló que existía diferencia de pH entre los arándanos secos provenientes del tratamiento T2 y del tratamiento T3 esto se debe a la acción del calor y la temperatura aplicada a las muestras, es decir, que durante el proceso de deshidratación se produce eliminación de agua y se concentran otras sustancias tales como ácidos que provocan la disminución del pH. Barbosa Canovas y Vega Mercado (2000) reportan que esto se debe principalmente a la acción del calor, ya que en los alimentos deshidratados hay pérdida o disminución en algunos de sus componentes y características físicas (pH, vitaminas, color, carbohidratos, entre otros).

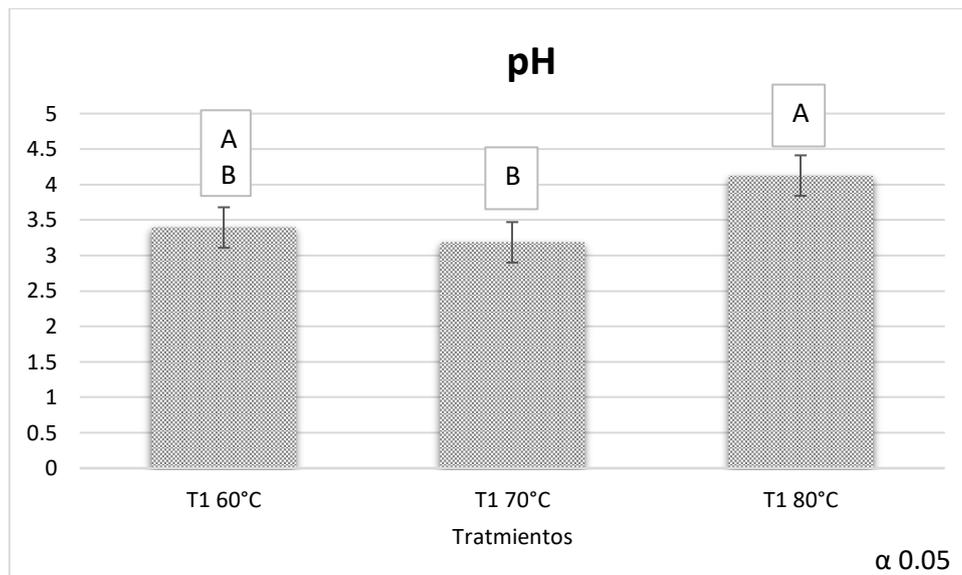
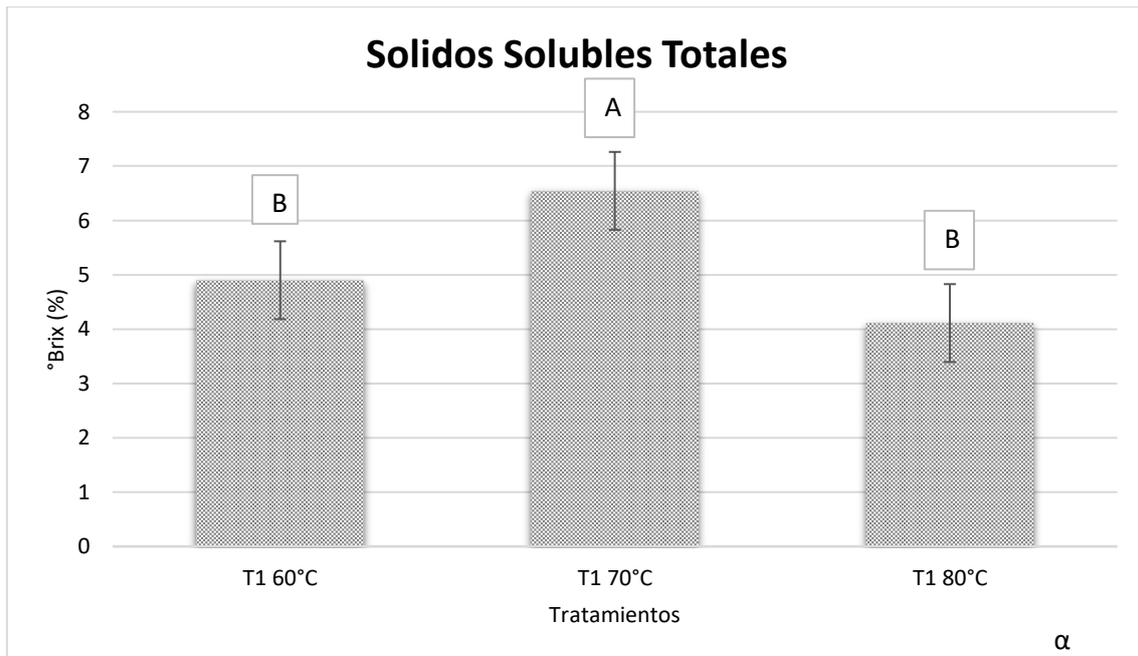


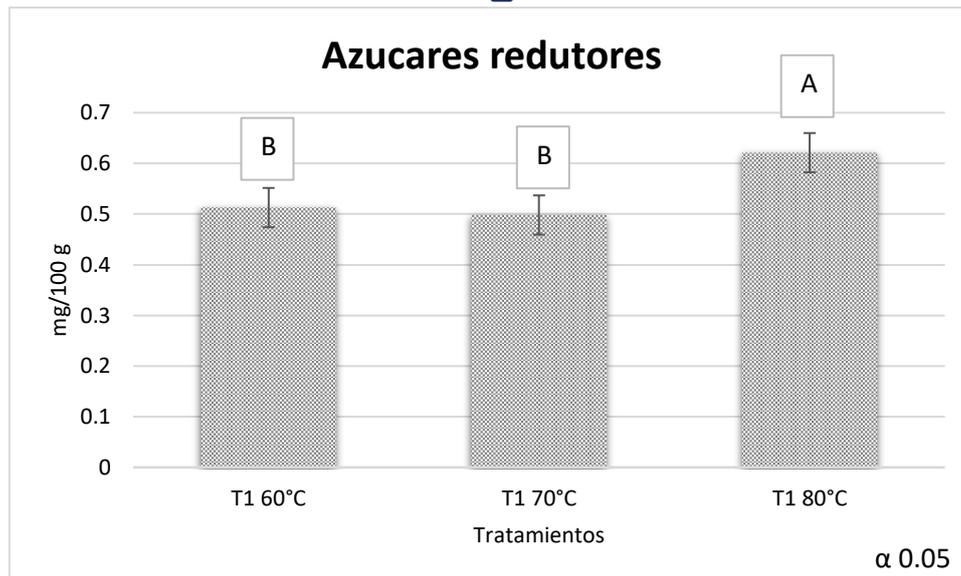
Figura 30. pH de tratamientos sometidos al proceso de secado convectivo en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a  $p < 0,05$  (Fuente propia).

La figura 31 muestra que se produjo una ganancia de sólidos solubles totales en relación a la temperatura a 70°C. Torreggiani, (2003), este autor explica que la salida de fluidos desde la matriz de los frutos se lleva a cabo en las etapas iniciales del proceso, para luego dar paso a una segunda etapa o etapa de impregnación, en la cual la ganancia de sólidos es mayor que la pérdida de agua. De igual manera se muestra diferencia significativa sobre los tratamientos.



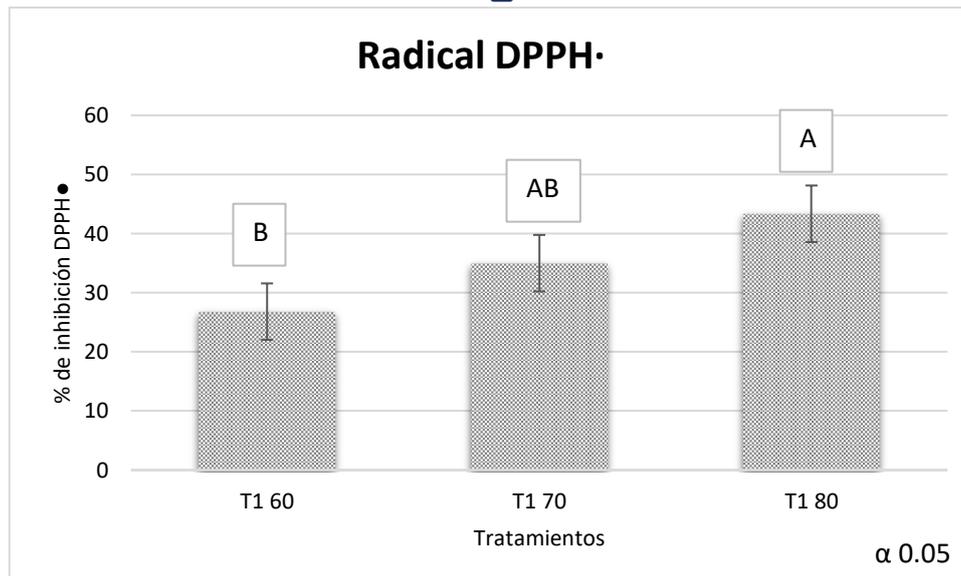
*Figura 31. Solidos solubles totales de tratamientos sometidos al proceso de secado convectivo en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a  $p < 0,05$  (Fuente propia).*

La figura 32 muestra cierta diferencia significativa sobre la temperatura de secado a 80°C sobre los azúcares reductores, determinado mediante la técnica colorimétrica con DNS (3,5 Acido dinitrosalicílico). Se observó durante el secado convectivo un incremento en el contenido de azúcares reductores totales del arando seco. Perera (2005) hace mención a los tratamientos térmicos elevados donde las interacciones entre los azúcares reductores y los grupos aminos dar lugar al pardeamiento de Maillard y a cambios en el sabor. Los azúcares pueden caramelizarse a altas temperaturas para dar colores entre marrón oscuro y negro, lo que resta calidad a los productos secos.



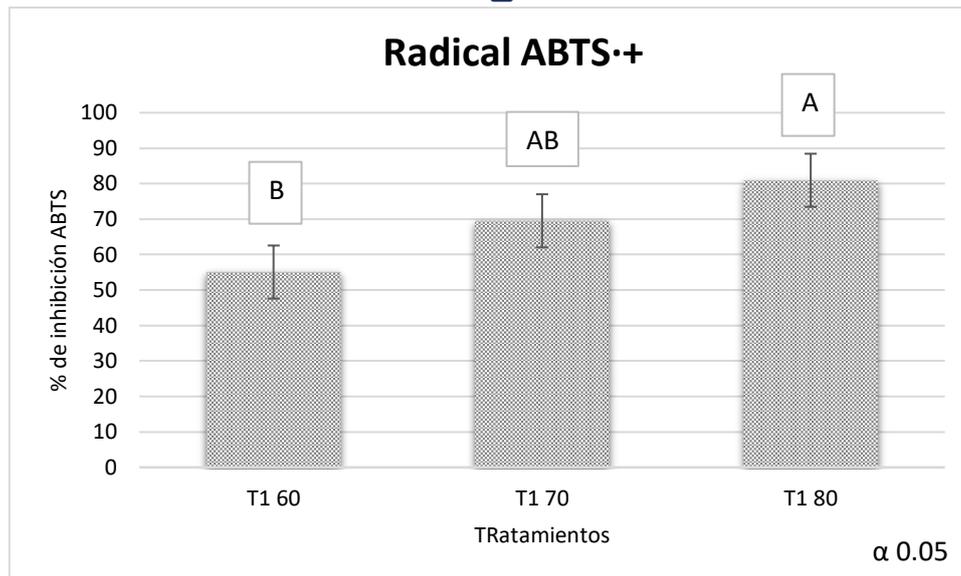
*Figura 32. Azúcares reductores de tratamientos sometidos al proceso de secado convectivo en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a  $p < 0,05$ ) (Fuente propia).*

Además, se evaluó el efecto de los diferentes tratamientos de secado sobre las características antioxidantes de los arándanos mediante el ensayo DPPH. Los resultados se expresaron en términos de porcentaje de retención de la capacidad antioxidante (CA) respecto a la fruta fresca. Todas las muestras procesadas presentaron una disminución significativa de la CA. La mayor retención de antioxidantes se observó en los arándanos secados mediante el secado a 80°C, alcanzando un 43.3% de retención del radical DPPH, mientras que la menor retención de antioxidantes se observó en los arándanos secados a la temperatura de 60°C logrando un 26.8 % de retención del radical. Se menciona en bibliografía la temperatura de secado más adecuada para preservar la CA de los productos estaría en torno a los 60°C, lo que sugiere que los compuestos antioxidantes tienen una mayor resistencia a la degradación por calor a esta temperatura (Garau y col., 2007). En la figura 33 se puede observar diferencia significativa sobre la temperatura de secado de 60 y 80°C de acuerdo con los resultados de porcentaje de inhibición ya mencionados.



*Figura 33. Porcentaje de inhibición del radical DPPH de tratamientos sometidos al proceso de secado convectivo en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a  $p < 0,05$ ) (Fuente propia).*

La actividad antioxidante de los extractos los cuales se determinaron por el ensayo ABTS, como se muestra en la figura 34, donde el aumento de la temperatura de secado produjo un incremento en los valores de actividad antioxidante de los extractos, existiendo diferencias significativas entre todos los valores. El extracto de los frutos secados a 80°C mostró el mayor porcentaje de inhibición del radical ABTS con 80%, mientras que el menor porcentaje de inhibición se observó en los arándanos secados mediante los tratamientos de 60°C. Garau y col. (2007) informaron que la temperatura de secado más adecuada para preservar la capacidad antioxidante de los productos sería alrededor de 60 °C, lo que sugiere que los compuestos antioxidantes tienen una mayor resistencia a la degradación por calor a esta temperatura.



*Figura 34. Porcentaje de inhibición del radical ABTS + de tratamientos sometidos al proceso de secado convectivo en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a  $p < 0,05$ ) (Fuente propia).*

La antocianina es un compuesto bioquímico derivado en pigmento natural y da el color rojo a los frutos de las bayas (Zia y Alibas 2021). Como se aprecia en la figura 35 donde la diferencia significativa entre el rango de pérdida total de antocianina en los arándanos para el secado convectivo se sitúa a la temperatura de 60°C y con la menor pérdida a 80°C. Las diferencias en las mediciones pueden deberse a la diferencia en los métodos analíticos y de extracción utilizados. Martin y col. (2020) demostraron que el proceso de secado provocó un aumento de la concentración de antocianinas, y la magnitud del aumento de la concentración de antocianinas aumentó con la temperatura. Resultados similares al presente trabajo, donde los arándanos secos a 60°C mostraron menor concentración de antocianinas totales a diferencia de los frutos secos a 80°C.

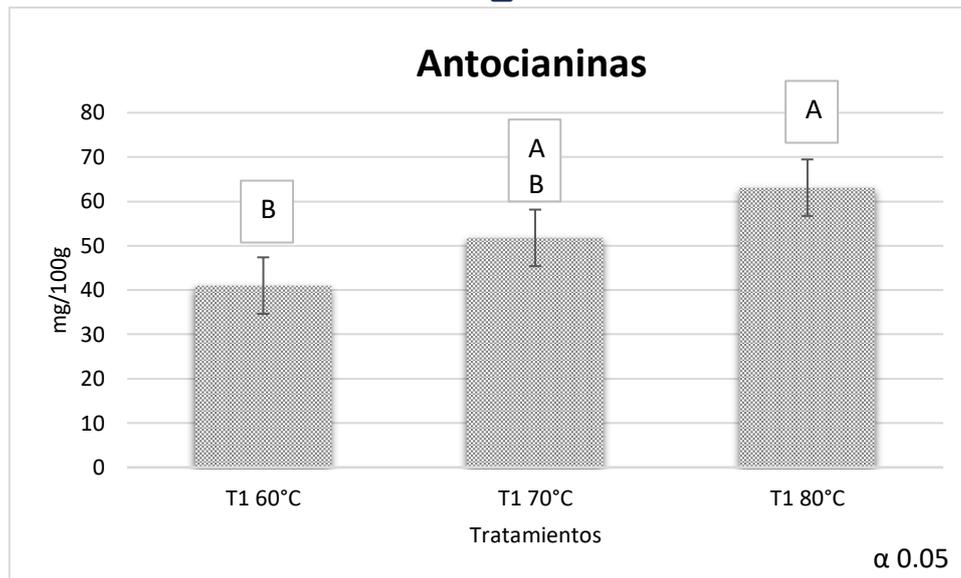


Figura 35. Concentraciones de antocianinas (mg/100g) y grupos homogéneos de secados en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a  $p < 0,05$ ) (Fuente propia).

En los datos de compuestos fenólicos totales de las muestras secadas con las diferentes temperaturas de secado no se obtuvo diferencias significativas. Los resultados se presentan en la figura 36 siendo los largos tiempos de secado asociados a bajas temperaturas de proceso (60°C y 70°C) contribuyen a disminuir el efecto protector contra el daño oxidativo de las células. Además, se observó un aumento importante de la concentración de polifenoles a alta temperatura (80°C), probablemente debido a la generación de diferentes compuestos antioxidantes con un grado variable de actividad antioxidante. Algunos autores sugirieron que no sólo el nivel de antioxidantes, sino también la sinergia que se produce entre ellos y los demás constituyentes de la fruta, podrían influir en las diferencias de la capacidad antioxidante de los extractos alimentarios (Capecka y col., 2005). La razón del alto contenido de compuestos fenólicos podría ser causada por la ocurrencia de reacciones no enzimáticas, como las reacciones de Maillard y la caramelización, cuando hay altas temperaturas.

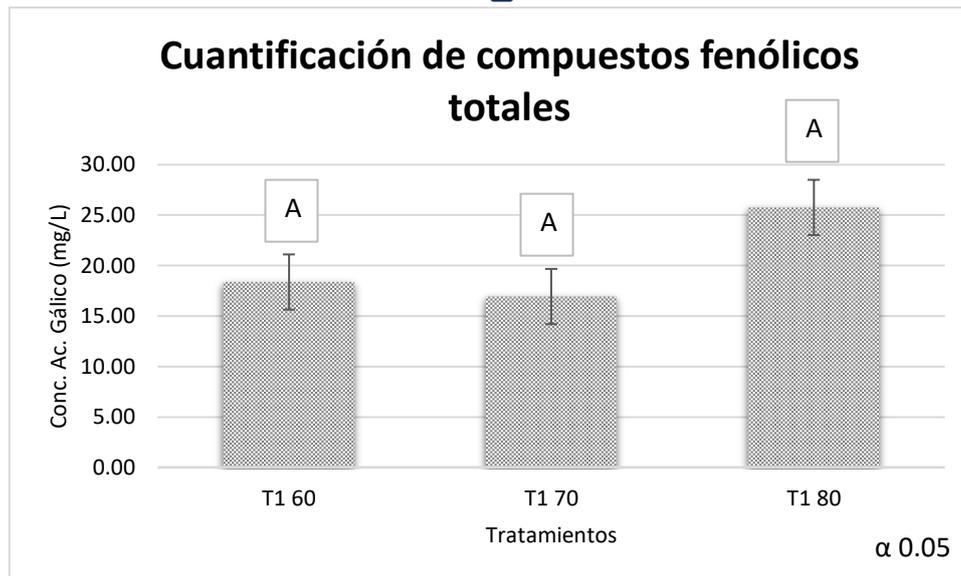


Figura 36. Concentraciones de Ac. Gálico (mg/l) y grupos homogéneos de secados en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a  $p < 0,05$  (Fuente propia).

Respecto a los resultados del color, en la tabla 9 podemos observar los valores obtenidos, siendo el croma ( $C^*$ ) y el tono ( $H^\circ$ ) las variables esenciales para determinar la diferencia de color en los arándanos secos en comparación de las bayas frescas (figura 39), los resultados con mayor acercamiento al tono de arándanos fresco son los tratamientos secados a una temperatura de 80°C donde se aprecian resultados cercanos a al fruto fresco. Los valores de luminosidad ( $L^*$ ), enrojecimiento ( $a^*$ ) y azulado ( $b^*$ ) de los arándanos frescos a temperatura ambiente fueron 13.03, 6.29 y -10.13 respectivamente

El enrojecimiento de los arándanos disminuyo durante el secado ( $a^*$  disminuyo) para, las temperaturas de 70°C y 80 °C caso contrario a temperatura de 60°C, mientras el azulado se aumentó significativamente ( $b^*$  disminuyo) para todas las temperaturas

**Tabla 7. Parámetros del color de los arándanos secados en el secador eléctrico de bandejas.**

Análisis estadístico								
Experimentos	Replica	Temperatura	L* (Luminosidad)	a	b	C* (Croma)	ΔE*	H°
Fresco	1	Ambiente	13.0366667	6.29	-10.1388889	11.9315199	17.6724601	301.814784
1	1	60	17.9744444	5.9088889	-7.0711111	9.2149650	20.1989166	309.883411
4	2	60	19.18	13.8688889	-4.8755556	14.7009225	24.1658751	340.631068
7	3	60	14.6044444	5.1644444	-7.5866667	9.1776357	17.2487331	304.244153
2	1	70	0	0	0	0	0	360
5	2	70	16.3366667	8.49	-6.9744444	10.9874008	19.6878047	320.597261
8	3	70	12.5277778	5.67	-7.27	9.2196420	15.5546461	307.951291
3	1	80	12.03	4.9355556	-6.7655556	8.3745119	14.6578767	306.111209
6	2	80	15.0077778	5.5944444	-7.3255556	9.2174602	17.6123527	307.368566
9	3	80	17.7066667	5.6133333	-8.0355556	9.8020234	20.2387181	304.936685

La mayoría de las temperaturas de secado no disminuyeron significativamente tanto para el parámetro del Croma ( $C^*$ ) y el tono ( $H^\circ$ ) de las muestras, la única excepción fue a la temperatura de  $60^\circ\text{C}$  (figura 40, a y b) el secado a  $80^\circ\text{C}$  (figura 40, f, g y h) produjo arándanos con los valores del parámetro Croma más cercanas a los del arándano fresco como se aprecia en las figuras 37 y 38. Durante el secado a  $60^\circ\text{C}$  se refleja una desviación estándar con significancia esto debido a una nula estandarización del lote de los arándanos secos ya que el fruto se recolecto de diferentes zonas de cosecha.

Para el secado a  $60^\circ\text{C}$ , se observó un aumento significativo de la luminosidad en una fase temprana del secado. El croma de los tratamientos a temperatura de  $70^\circ\text{C}$  (figura 40, c, d y e) fueron los resultados con mejor cercanía a los del fruto fresco. Los arándanos secados a la temperatura de  $60^\circ\text{C}$ ,  $70^\circ\text{C}$  y  $80^\circ\text{C}$  fueron significativamente más azules que las muestras frescas. El secado convectivo no indujo cambios significativos en la saturación del color (Zielinska y Zielinska, 2019).

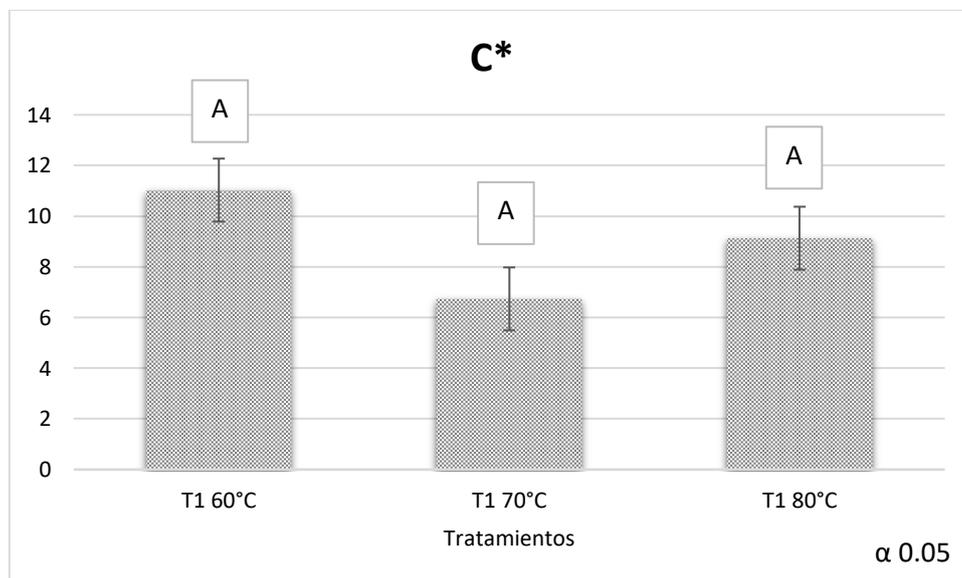


Figura 37. Valores cromáticos y grupos homogéneos de secados en el secador eléctrico de bandejas. ( $60^\circ\text{C}$ ) tiempo de secado de 17 horas; ( $70^\circ\text{C}$ ) tiempo de secado 12 horas y ( $80^\circ\text{C}$ ) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a  $p < 0,05$  (Fuente propia).

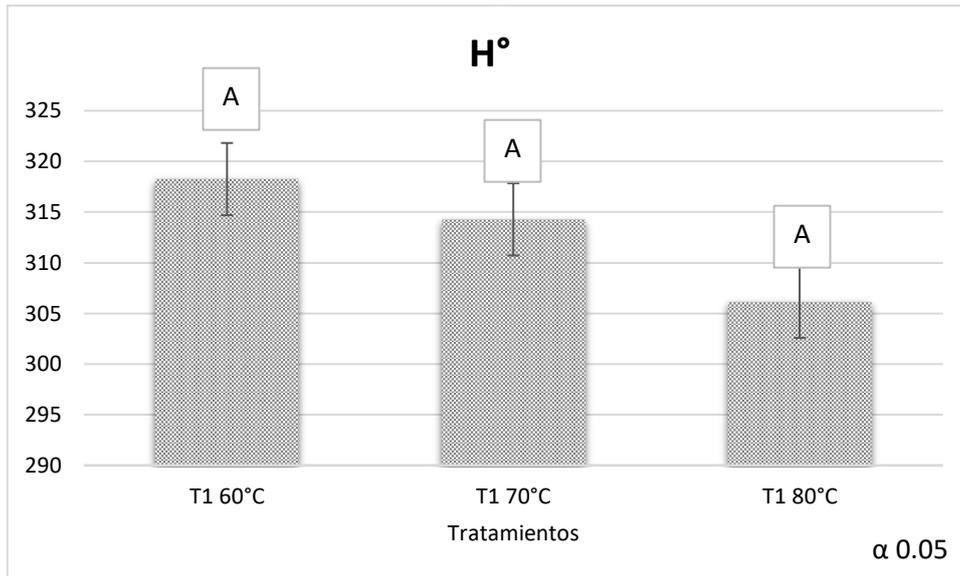


Figura 38. Valores de tonalidades y grupos homogéneos de secados en el secador eléctrico de bandejas. (60°C) tiempo de secado de 17 horas; (70°C) tiempo de secado 12 horas y (80°C) tiempo de secado 7 horas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las diferentes condiciones de secado para el mismo tiempo a  $p < 0,05$  (Fuente propia).

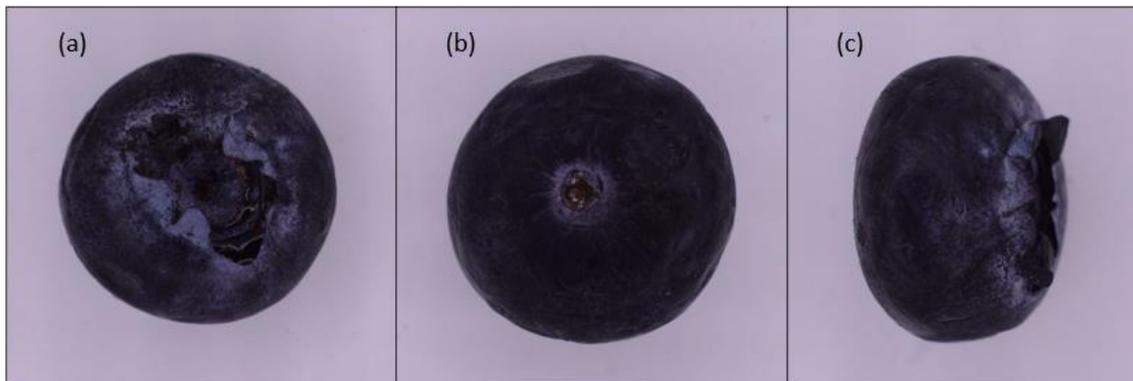


Figura 39 Fotografías digitales para estimación de color en coordenadas CIEL \*a\*b de las superficies de arándano fresco. (a), (b) y (c) lado superior, inferior y lateral de arándano fresco (Fuente propia).

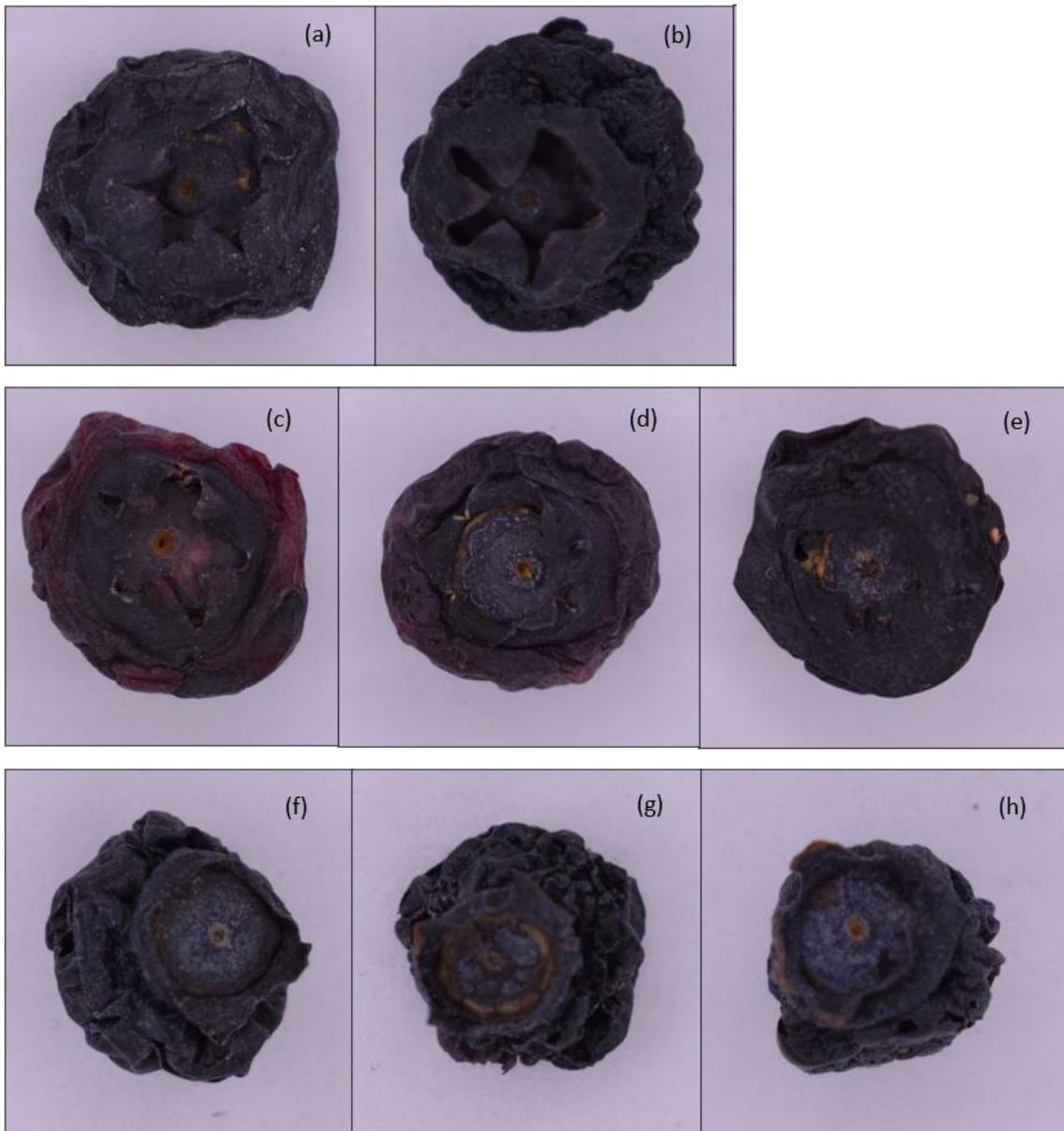


Figura 40. Fotografías digitales para estimación de color en coordenadas CIEL \*a\*b de las superficies de arad no seco. Protocolos experimentales: (a), (b) lado superior de arándano secado con temperatura de 60°C y un tiempo de secado de 17 hora; (c), (d) y (e) lado superior de arándano secado con temperatura de 70°C y un tiempo de secado de 12 horas, (f), (g) y (h) lado superior de arándano secado con temperatura de 80°C y un tiempo de secado de 17 horas (Fuente propia).

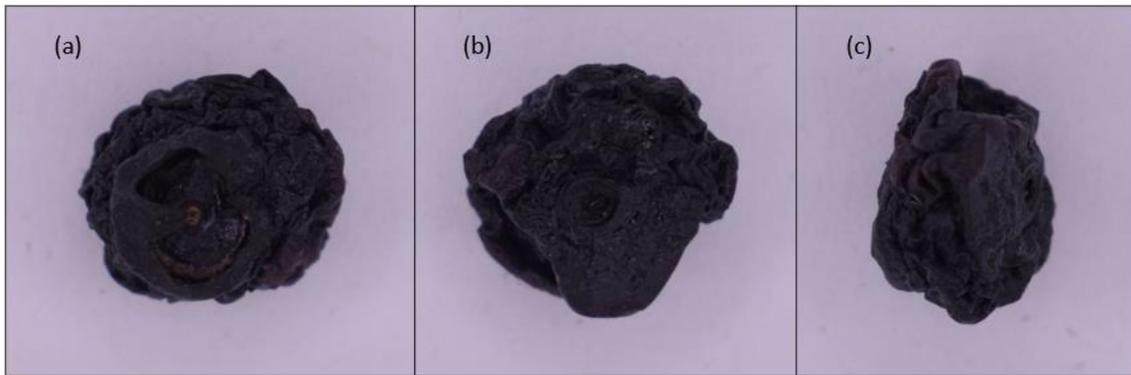


Figura 41. Fotografías digitales para estimación de color en coordenadas CIEL \*a\*b de las superficies de arándano seco en secador solar a 70°C. (a), (b) y (c) lado superior, inferior y lateral de arándano seco (Fuente propia).

En general, la prueba de preferencia evaluada por consumidores coincidió con las puntuaciones de mayoría de cada uno de los atributos que se evaluaron; determinando que el tratamiento secado a temperatura de 70°C fue favorecido por sus características organolépticas en cuanto a color, sabor y textura, como se aprecia en las figuras 42, 43 y 44 derivando diferencia significativa entre las diferentes temperaturas. Considerando el tratamiento apto1 para llevarse a cabo la experimentación en el secador solar híbrido, con un lapso de tiempo de secado de 12 horas.

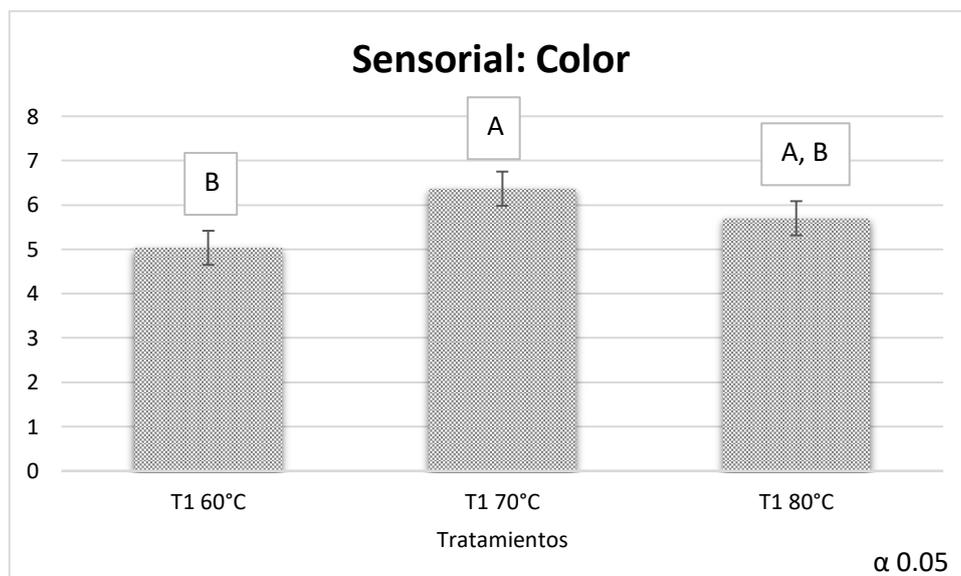


Figura 42. Prueba Hedónica (escala de nueve puntos) para el parámetro del color del arándano seco en el secador eléctrico de bandejas. Se marco las categorías en la escala, que va desde "me gusta extremadamente" equivale numérico a 9, hasta "me disgusta extremadamente" equivalente numérico a 1 (Fuente propia).

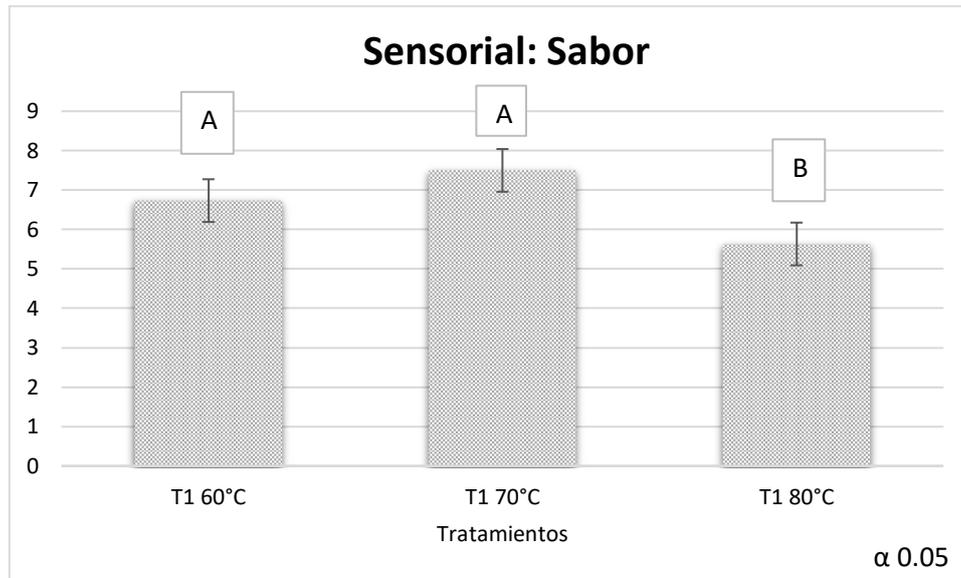


Figura 43. Prueba Hedónica (escala de nueve puntos) para el parámetro del sabor del arándano seco en el secador eléctrico de bandejas. Se marco las categorías en la escala, que va desde "me gusta extremadamente" equivale numérico a 9, hasta "me disgusta extremadamente" equivalente numérico a 1 (Fuente propia).

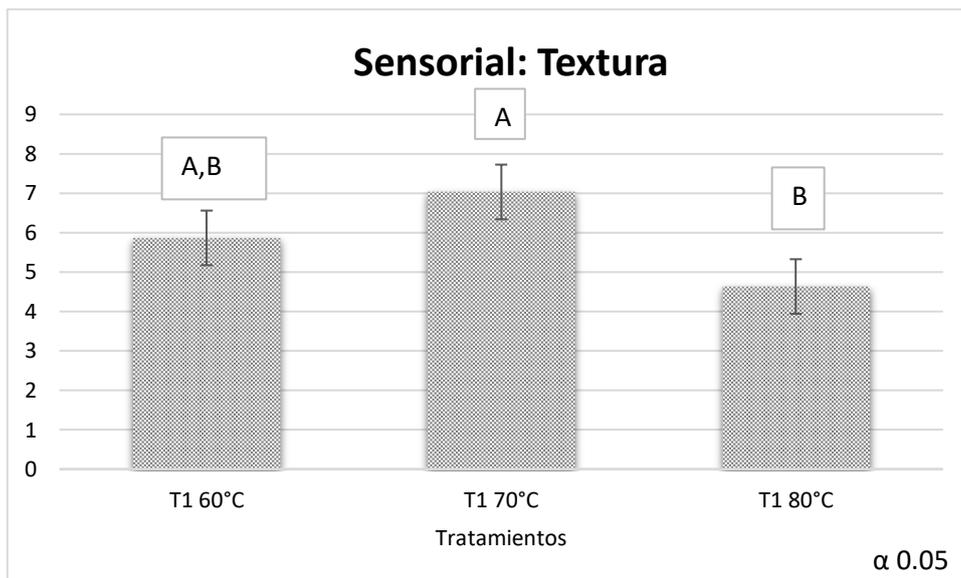


Figura 44. Prueba Hedónica (escala de nueve puntos) para el parámetro de la textura del arándano seco en el secador eléctrico de bandejas. Se marco las categorías en la escala, que va desde "me gusta extremadamente" equivale numérico a 9, hasta "me disgusta extremadamente" equivalente numérico a 1 (Fuente propia).

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

### 8.4.1. Análisis fisicoquímicos

De acuerdo con el parámetro de humedad como se aprecia en la figura 45 no se observó diferencias significativas debido que el secado se llevó hasta peso constante resultando parámetros de humedad similares para los tratamientos llevados a cabo en los dos tipos de secadores en los cuales se trabajó.

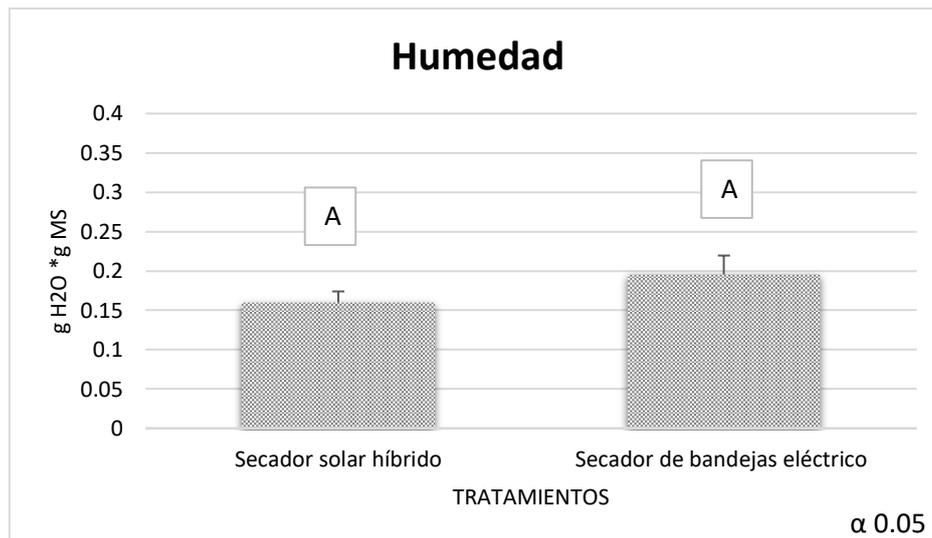


Figura 45. ANOVA de humedad del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

El resultado de actividad de agua del arándano fresco fue alrededor de  $0.85 \pm 0.20$  y para las muestras secas de los dos secadores se obtuvieron resultados de  $0.36 \pm 0.01$  para el secador solar híbrido y  $0.226 \pm 0.066$  para el secador de bandejas; como se observa en la figura 46 no se presentó diferencia significativa respecto a los tratamientos ya que se pretendió cumplir con estos parámetros reportados en bibliografía para alimentos secos.

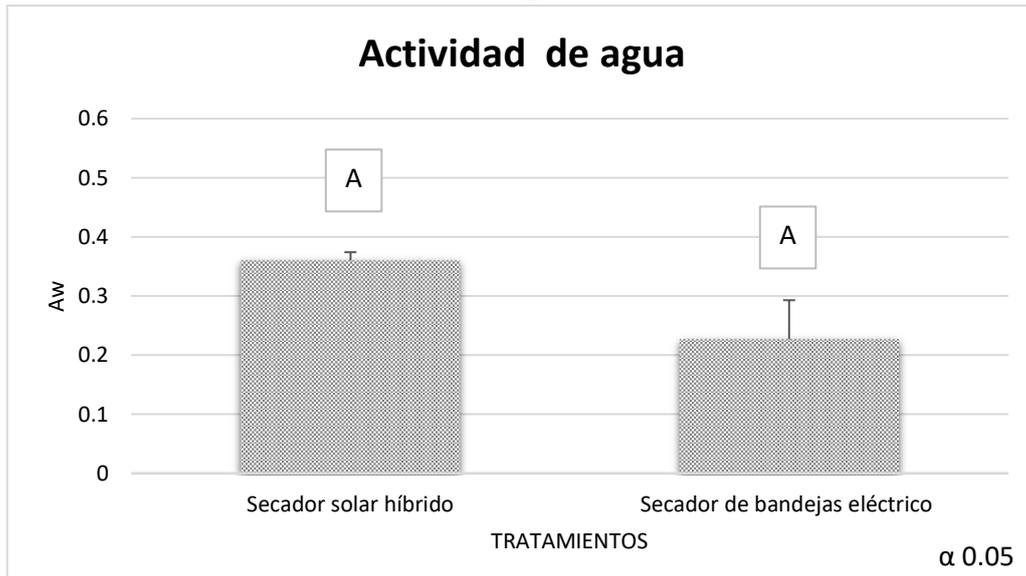


Figura 46. ANOVA de actividad de agua ( $A_w$ ) del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

Como se observa en la figura 47 los resultados del índice de higroscopicidad no se observó diferencias significativas ya que los valores obtenidos fueron de  $0.2088 \pm 0.011$  g  $H_2O/100$  g seco para el secador eléctrico y  $0.2168 \pm 0.004$  g  $H_2O/100$  g seco; los resultados se relacionan con el porcentaje de sólidos solubles totales debido que a mayor contenido de sólidos solubles y mayor índice de higroscopicidad aumenta la retención de agua del producto seco.

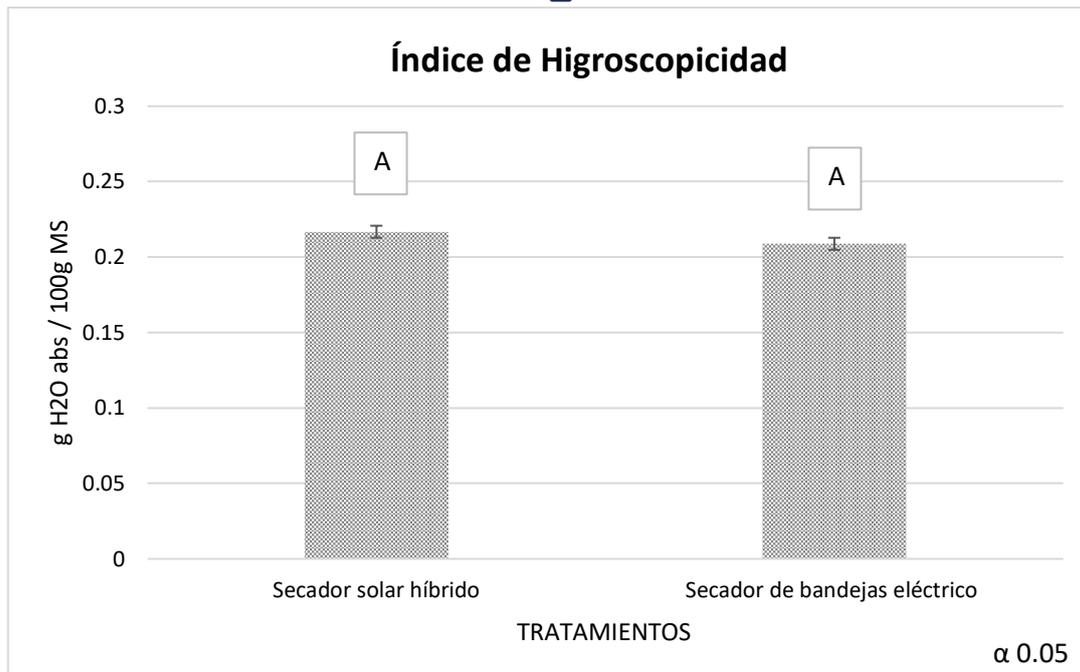


Figura 47. ANOVA de índice de higroscopicidad del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

Se tuvo diferencia significativa respecto al efecto de la temperatura sobre el pH de los tratamientos de los arándanos entre el proceso de secado de los secadores; para el secador de bandejas eléctrico se obtuvo el valor de  $3.18 \pm 0.064$  y para el secador solar híbrido fue de  $3.65 \pm 0.062$ , como se puede observar en la figura 48, los valores de pH bajos ( $<6$ ) son beneficiosos para la estabilidad de los compuestos de las antocianinas de los arándanos (Liu y col., 2018) coincidiendo nuestros resultados con la bibliografía para la estabilidad de las antocianinas de los frutos.

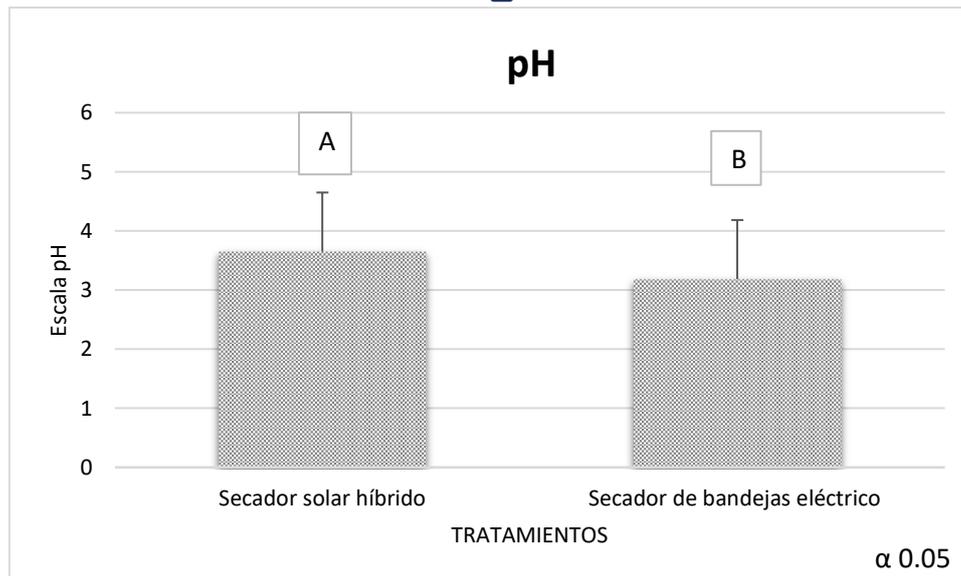


Figura 48. ANOVA de pH del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

Los sólidos solubles totales demostraron diferencia significativa durante el proceso de secado entre los tratamientos, obteniendo valores de  $65.44 \pm 0.1$  °Brix del secador de bandejas eléctrico y  $52.5 \pm 0.707$  °Brix del secador solar híbrido. La figura 49 nos muestra el comportamiento de dicho análisis. La diferencia puede deberse a la variación en los lotes de fruta que se utilizó para los tratamientos (Vuarant, 2014).

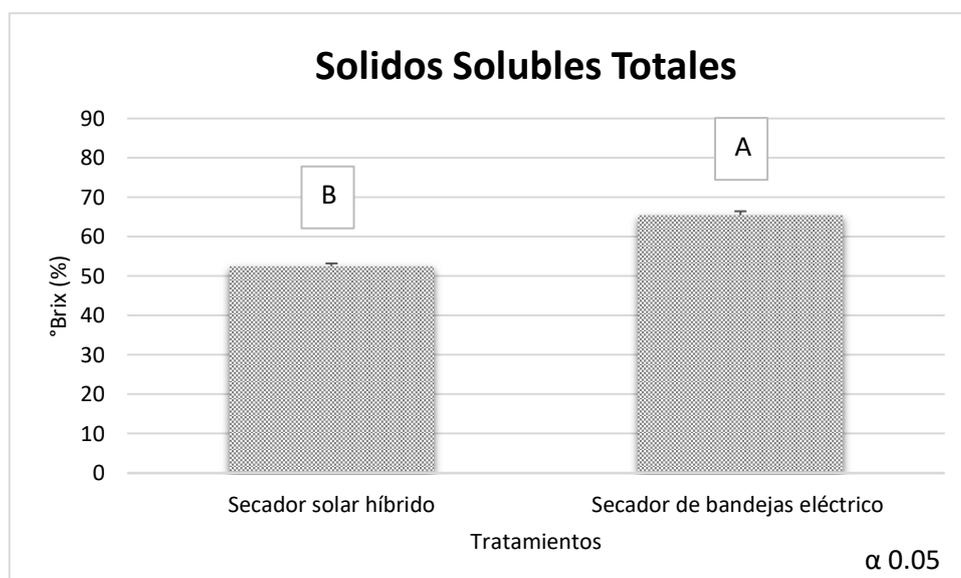


Figura 49. ANOVA de sólidos solubles totales del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

De igual manera el contenido de azúcares reductores de los tratamientos nos muestra diferencia significativa como se observa en la figura 50, siendo los mismos parámetros de secado. La diferencia puede deberse a la variabilidad de lote de arándano utilizado para los tratamientos.

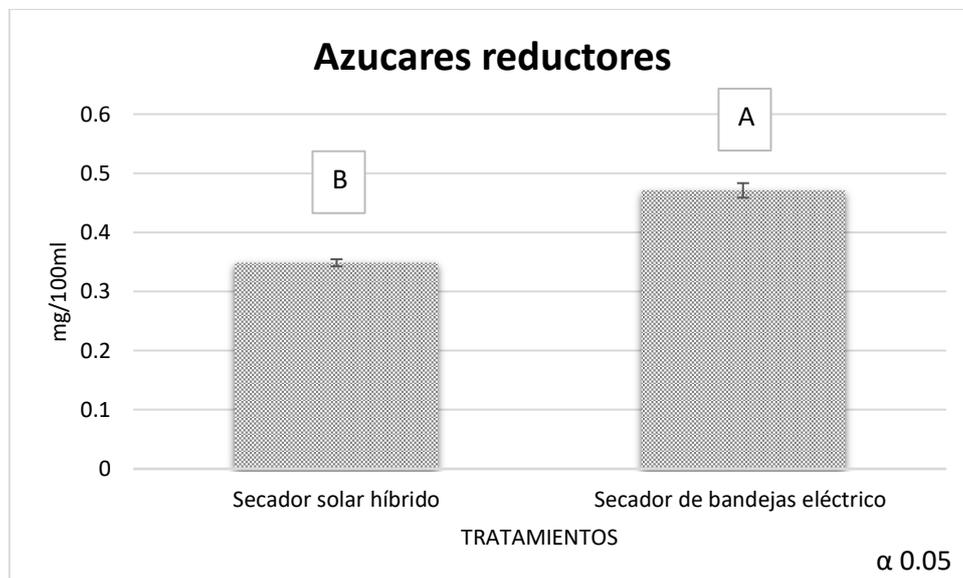


Figura 50. ANOVA de azúcares reductores del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

Uno de los fitoquímicos más abundantes e importantes por su capacidad antioxidante dentro de la alimentación humana de los arándanos son las antocianinas; componentes distintivos del fruto; en el presente trabajo encontramos diferencia significativa con valores de  $43.13 \pm 0.39$  mg/100g resultado del secador solar híbrido y  $51.76 \pm 1.47$  mg/100g respectivamente del secador eléctrico; como se puede observar en la figura 51

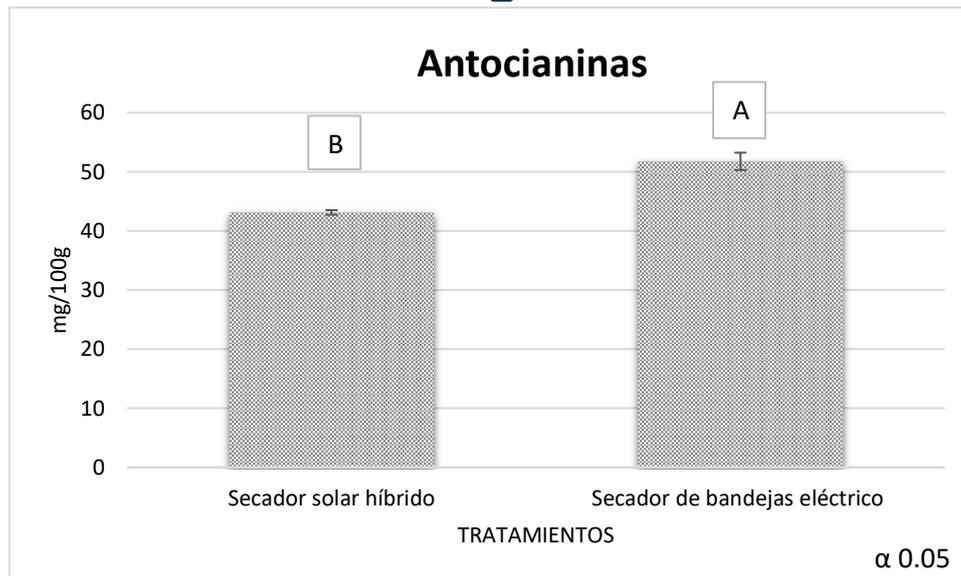


Figura 51. ANOVA de antocianinas del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

Los resultados se expresaron en términos de porcentaje de inhibición de la capacidad antioxidante. Donde mostraron un patrón similar para ambos ensayos. Las muestras procesadas presentaron diferencia significativa de capacidad antioxidante, teniendo mayor inhibición del radical DPPH· con 35% para el secador eléctrico y 15 % del secador solar; de igual manera coincide el ensayo ABST+ con 69% del secador eléctrico y 55% para el secador solar híbrido. La figura 52 nos muestra el comportamiento entre los dos secadores de acuerdo al porcentaje de inhibición del radical DPPH·, así como la figura 53 para el ensayo ABTS+ donde se observa claramente diferencia significativa entre los secadores. Para un mejor porcentaje de inhibición de la capacidad antioxidante Garau y col. (2007) informaron que la temperatura eficiente de secado para el arándano debe ser menor a 60°C.

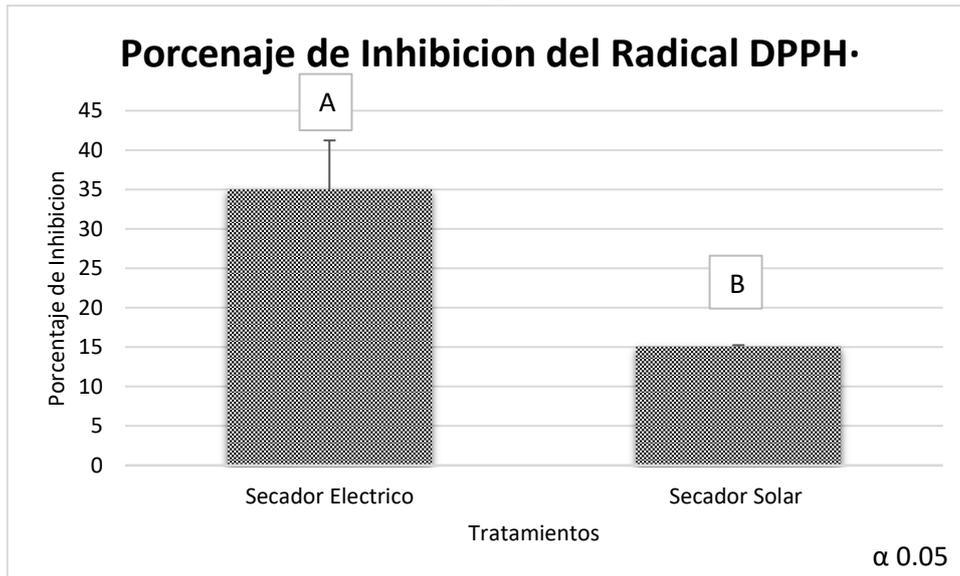


Figura 52. ANOVA del % de inhibición del radical DPPH del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

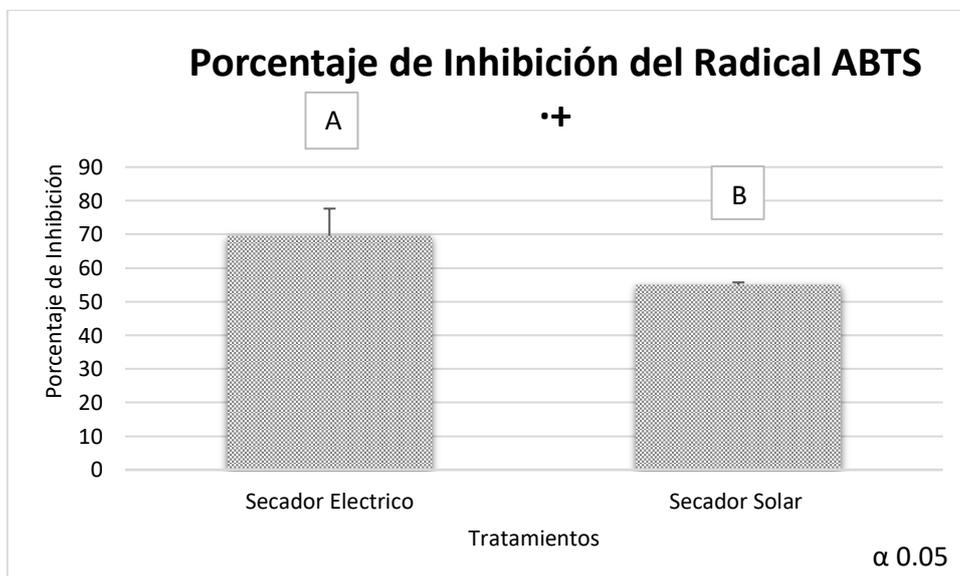


Figura 53. ANOVA del % de inhibición del radical ABTS + del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

De acuerdo al ANOVA la figura 54 se pueden observar valores de  $16.93 \pm 0.19$  mg/L ac gálico para el secador eléctrico y de  $21.09 \pm 0.35$  mg/L ac gálico donde no se muestra diferencia significativa sobre los dos secadores, se sabe que durante el proceso de secado, pueden ocurrir varios mecanismos que afectan a la concentración de compuestos fenólicos, como la liberación de compuestos

fenólicos ligados y la degradación parcial de la lignina, lo que lleva a la liberación de derivados fenólicos y a la degradación térmica (Maillard y Berset, 1995).

Estas reacciones, que disminuyen la concentración de compuestos fenólicos, junto con el proceso de concentración debido a la evaporación del agua, dan lugar a un equilibrio entre los mecanismos que aumentan y los que disminuyen la concentración de los compuestos fenólicos (Martín-Gómez y col., 2020).

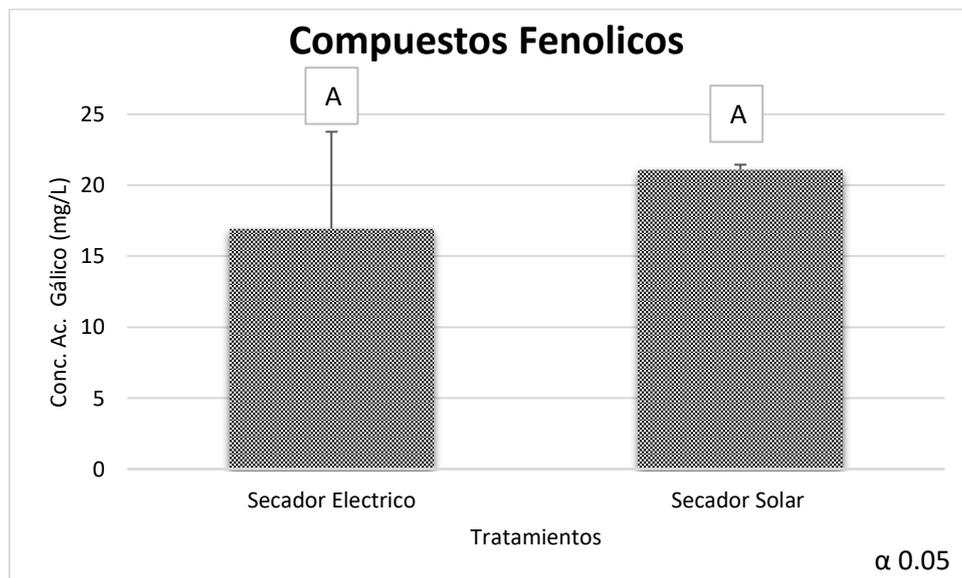


Figura 54. ANOVA de concentración de ácido gálico del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

El análisis estadístico de la comparación del croma ( $C^*$ ) y el tono ( $H^\circ$ ) de los dos secadores nos arrojó resultados con diferencia significativa, dichos resultados pudieron ser afectados por la diferencia de lotes con los cuales se llevaron a cabo los experimentos tratados con la temperatura a  $70^\circ\text{C}$ . La figura 55 nos muestra cómo se relaciona estadísticamente los dos secadores dando diferencia significativa. En la figura 56 está dada por el parámetro del color del tono o matiz donde también se muestra diferencia significativa para este tipo de análisis.

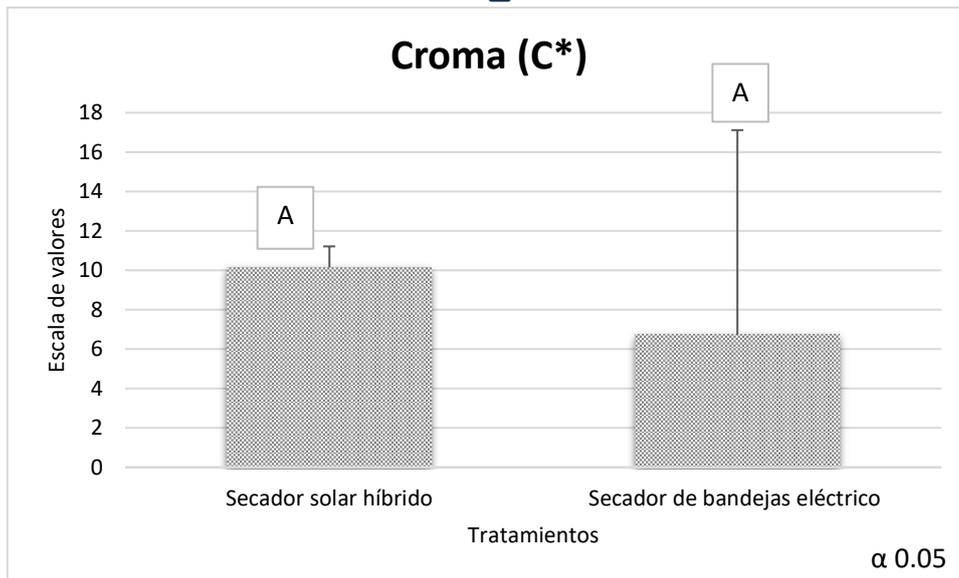


Figura 55. ANOVA del croma del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

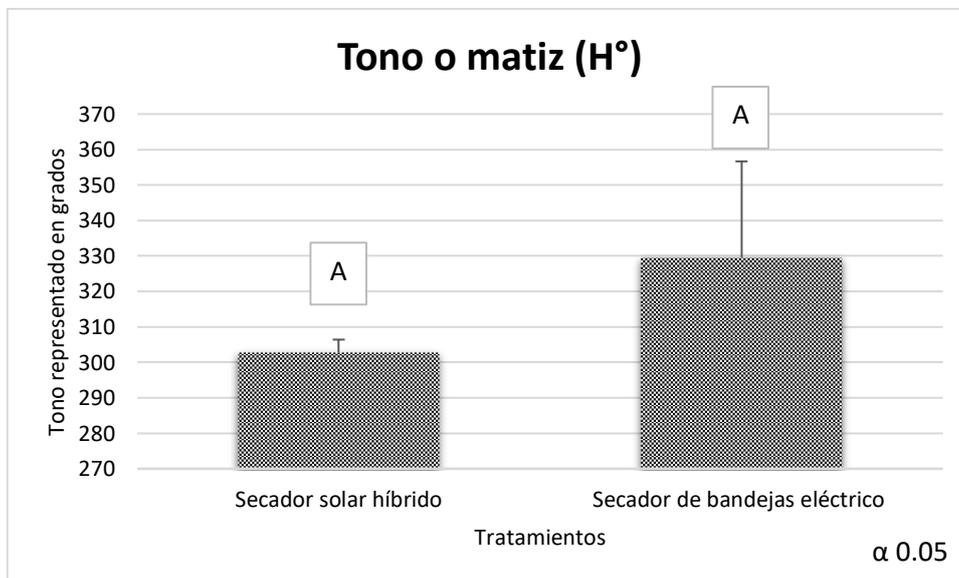


Figura 56. ANOVA del croma del arándano secado en el secador de bandejas a diferentes temperaturas (Fuente propia).

#### 8.4.2. Evaluación energética

Dentro de la evaluación energética el precalentamiento del secador de bandejas eléctrico fue en un tiempo de  $15.52 \pm 2.38$  minutos y de  $72.15 \pm 10.03$  minutos para el secador solar híbrido, donde se observa una gran diferencia en cuestión de la variable de tiempo de calentamiento; es importante mencionar que al momento de iniciar el precalentamiento la temperatura ambiental del secador eléctrico fue

de 13.8°C así como de la cabina con 11°C además se encuentra dentro de las instalaciones de la planta piloto de procesos agroindustriales del Tecnológico de Tlajomulco y el secador solar híbrido al comenzar el precalentamiento arrojó el resultado de temperatura de 6.8°C y en la cabina de 3.7°C, debido a que el secador se encuentra a la intemperie donde el tiempo de precalentamiento se ve afectado por comenzar con temperaturas menores al secador eléctrico de bandejas; además, el tiempo de trabajo un factor importante, se obtuvieron resultados de 21% como se observa en la figura 57 para el secador eléctrico y 55% del secador solar híbrido como se aprecia en la figura 58 donde se observa una gran diferencia; este parámetro puede estar afectado por dos aspectos importantes, como primer punto el flujo de trabajo ya que el secador eléctrico trabajo durante los experimento con un flujo de  $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  y el secador solar híbrido con un flujo de  $5.1 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  a lo que se concluyó que el secador solar híbrido calentó mayor cantidad de aire, por lo cual está relacionado con el porcentaje de trabajo; como segundo punto; el tipo de controlador de temperatura, para el secador eléctrico es un con control PID y para el secador solar híbrido es un ON-OFF que revisando bibliografía el controlador PID tiene una respuesta en menor tiempo, mejorando al eficiencia de los equipos.(Moreano y col., 2019).

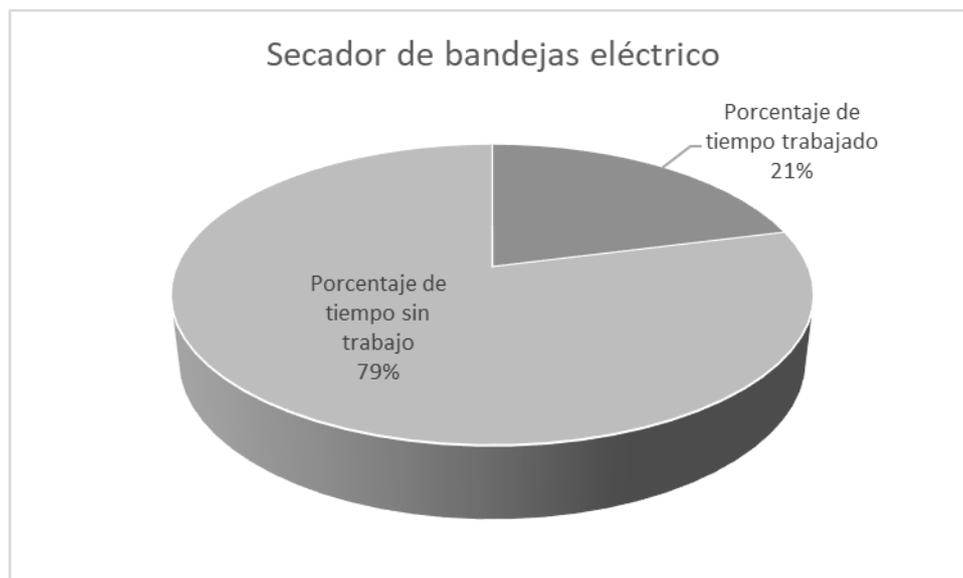
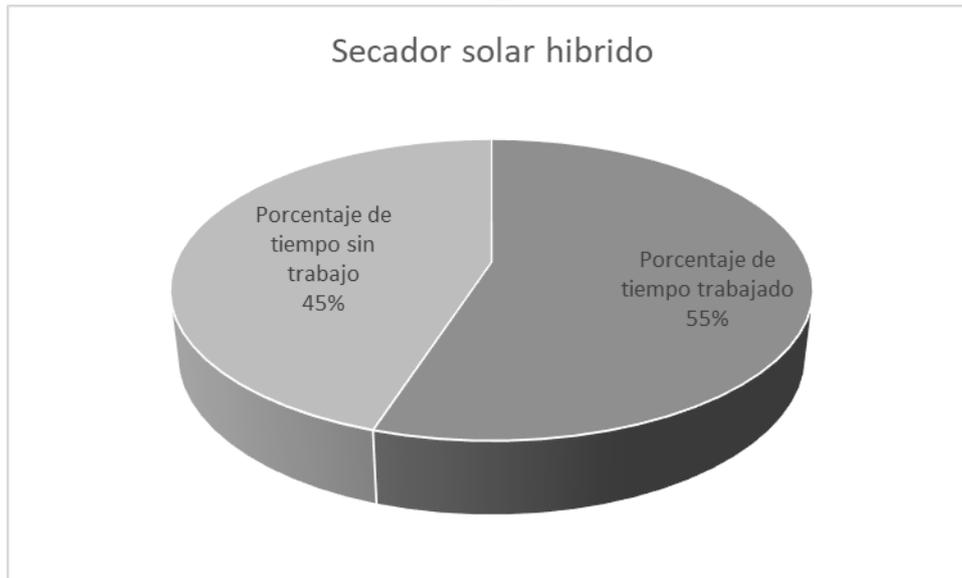


Figura 57. Diagrama de relación de trabajo (uso de energía eléctrica) del secador de bandejas eléctrico (Fuente propia).



*Figura 58. Diagrama de relación de trabajo (uso de energía eléctrica) del secador solar híbrido (Fuente propia).*

En relación al 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 horas., teniendo una diferencia de \$ 35.01 pesos (MXN) (tabla 7); 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 que se encontraba en la etapa de invierno una de las más desfavorables para el secado solar debido a las bajas temperaturas y las pocas horas con presencia de luz solar durante todo el día, por lo que se puede esperar que en las demás estaciones se reduzca el consumo energético

**Tabla 8. Gasto energético de secador solar híbrido y secador eléctrico**

Costo de energía eléctrica										
	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 / h	Corriente (A)	Radiación Solar (W/m <sup>2</sup> )	Temperatura Ambiente (°C)	Mayo 2021: \$3.612 por kwh
Secador eléctrico de bandejas	79%	21%	\$ 8.65	\$ 103.84	\$ 112.49	9583.09	20.7634783	847.65	20.24	
Secador solar híbrido	45%	55%	\$ 22.68	\$ 124.82	\$ 147.50	5236	16.95	847.65	20.24	



## IX. CONCLUSIONES

Los arándanos con abundante valor nutricional y económico son populares por su sabor único y su atractivo aspecto. Sin embargo, el contenido de agua de los frutos es alto, y es fácil que se pudran y deterioren. El secado de los arándanos no sólo resuelve el problema del difícil almacenamiento y transporte, sino que también mantiene en gran medida el sabor original, el aroma y los nutrientes de las bayas, lo que constituye un medio eficaz de procesamiento profundo de los arándanos.

El secado por aire caliente, es uno de los métodos de secado más comunes en el proceso de secado de frutos ricos en antioxidantes, sin embargo, es un proceso intensivo en energía. Mediante el estudio de la correlación entre los parámetros de operación y la calidad nutricional, las propiedades fisicoquímicas y los cambios de estructura-actividad de las sustancias bioactivas, se optimizaron las condiciones tecnológicas con el fin de determinar el comportamiento del secado reduciendo el tiempo de secado y los costes de energía primaria. El contenido inicial de humedad del arándano se redujo al 15%+- 0.2 (base humedad), en cada uno de los tratamientos realizados

Se ha desarrollado un secador solar híbrido el cual se evaluó con arándano, analizando el gasto energético, así como las características fisicoquímicas y sensoriales del arándano seco. El análisis comparativo entre el secador eléctrico y el secador solar híbrido indicó que el consumo total de energía del secador solar es mayor para el secador solar resultando ineficiente para el trabajo exhaustivo de extensas horas de trabajo durante la estación de invierno debido a las bajas temperaturas del medio ambiente. La evaluación fisicoquímica entre el arándano secado en el secador eléctrico y el solar híbrido nos dio análisis estadísticos con pocas diferencias significativas de acuerdo a las características que componen el arándano seco.



## X. BIBLIOGRAFÍA

- (SIGER) Sistema de Información Geográfica para Energías Renovables, Gerencia de Energías No Convencionales, Instituto de Investigaciones Eléctricas, México.  
<http://genc.iie.org.mx/genc/index2.html>
- Aguilera, J. M. (2003). Drying and dried products under the microscope. *Food Science and Technology International*, 9(3), 137-143.
- Aguirre, O. E. R., Barreiro, W. A. A., & López, F. E. D. (2015). Actividad antioxidante de extractos de hojas de *Bocconia frutescens* L.(Papaveraceae). *Revista de tecnología*, 14(2), 21-36.io
- Ahmed, J., Sinha, N., & Hui, Y. (2011). Drying of vegetables: principles and dryer design. *Handbook of vegetables and vegetable processing*, 279-298.
- Akpinar, E. K. (2006). Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of food engineering*, 73(1), 75-84.
- Ameri, B., Hanini, S., Benhamou, A., & Chibane, D. (2018). Comparative approach to the performance of direct and indirect solar drying of sludge from sewage plants, experimental and theoretical evaluation. *Solar Energy*, 159, 722-732.
- AOAC. 2002. Official Methods of Analysis. Association of Analytical Chemists. 920.151. Total, solids in fruit and fruit products.
- AOAC. Oficial methods of analysis William Horwitz. Washington D.C: Association of Analytical Chemists; 1990.
- Arabhosseini, A., Samimi-Akhijahani, H., & Motahayyer, M. (2019). Increasing the energy and exergy efficiencies of a collector using porous and recycling system. *Renewable energy*, 132, 308-325.
- Arenas, M. A., Padilla, I., Robla, J. I., Vázquez, A. J., & López-Delgado, A. (2019). The use of concentrated solar energy for the reduction of CuO in H<sub>2</sub>. *Solar Energy*, 180, 640-647.
- Arévalo-Pinedo, A., & Murr, F. E. (2006). Kinetics of vacuum drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*): Modeling with shrinkage. *Journal of Food Engineering*, 76(4), 562-567.
- Arnao, M. B. (2000). Some methodological problems in the determination of antioxidant activity using chromogen radicals: a practical case. *Trends in Food Science & Technology*, 11(11), 419-421.



- Arun, K. R., Srinivas, M., Saleel, C. A., & Jayaraj, S. (2019). Active drying of unripened bananas (Musa Nendra) in a multi-tray mixed-mode solar cabinet dryer with backup energy storage. *Solar Energy*, 188, 1002-1012.
- Arunsandeep, G., Lingayat, A., Chandramohan, V. P., Raju, V. R. K., & Reddy, K. S. (2018). A numerical model for drying of spherical object in an indirect type 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., & Cankurtaran, E. (2021). Energy, exergy, exergoeconomic and exergo-environmental analyses of a large scale solar dryer with PCM energy storage medium. *Energy*, 216, 119221.
- Avella, D. M. G., García, C. A. O., & Cisneros, A. M. (2008). Medición de fenoles y actividad antioxidante en malezas usadas para alimentación animal. In *Memorias del Simposio de Metrología. Universidad Autónoma de Querétaro. Centro Nacional de Querétaro*.
- Avila Núñez, R., Rivas Pérez, B., Hernández Motzezak, R., & Chirinos, M. (2012). Contenido de azúcares totales, reductores y no reductores en Agave cocui Trelease. *Multiciencias*, 12(2), 129-135.
- Bala, B. K., & Janjai, S. (2012). Solar drying technology: potentials and developments. In *Energy, environment and sustainable development* (pp. 69-98). Springer, Vienna.
- Banout, J., Ehl, P., Havlik, J., Lojka, B., Polesny, Z., & Verner, V. (2011). Design and performance evaluation of a Double-pass solar drier for drying of red chilli (*Capsicum annum* L.). *Solar energy*, 85(3), 506-515.
- Barbosa-Cánovas, G. V., & Vega-Mercado, H. (2000). *Deshidratación de alimentos* (No. 664.80204 B3).
- Barreto, M. A., Cánoves, A. F., & Más, M. J. E. (2016). Determinación de polifenoles totales en arándanos y productos derivados. *UCV-Scientia*, 8(1), 13-21.
- Ben Lagha, A., Dudonné, S., Desjardins, Y., & 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.



- Beuchat, L. R., Komitopoulou, E., Beckers, H., Betts, R. P., Bourdichon, F., Fanning, S., ... & Ter Kuile, B. H. (2013). Low-water activity foods: increased concern as vehicles of foodborne pathogens. *Journal of food protection*, 76(1), 150-172.
- Cao, X., Huang, R., & Chen, H. (2017). Evaluation of pulsed light treatments on inactivation of Salmonella on blueberries and its impact on shelf-life and quality attributes. *International journal of food microbiology*, 260, 17-26.
- Capecka, E., Mareczek, A., & Leja, M. (2005). Antioxidant activity of fresh and dry herbs of some Lamiaceae species. *Food chemistry*, 93(2), 223-226.
- Castañeda-Ovando, A., Galán-Vidal, C. A., Pacheco-Hernandez, M. D. L., Rodríguez, J. A., & Páez-Hernández, M. E. (2009). Metal content evaluation and its effect on the stability of anthocyanins. *CyTA-Journal of Food*, 7(3), 225-232.
- Clark, S., Costello, M., Drake, M. Y BodyfelT, F.W.. (2009). The sensory evaluation of dairy products. 2nd ed. New York, NY Springer, 15, 573.
- Clemente, E., Afonso, M. R. A., Souza, A. P., Correia, J. M., Pires, R. G., & Maia, G. A. (2011). Application of mathematical models for the prediction of adsorption isotherms in solid mixture for mango powder refreshment. *Food Science and Technology*, 31, 614-622.
- Contreras, C., Martín, M. E., Martínez-Navarrete, N., & Chiralt, A. (2005). Effect of vacuum impregnation and microwave application on structural changes which occurred during air-drying of apple. *LWT-Food Science and Technology*, 38(5), 471-477.
- Cruz, O. A. P. (2018). Análisis de la cadena productiva del arándano en México y Chile. *PORTES, revista mexicana de estudios sobre la Cuenca del Pacífico*, 12(23), 31-62.
- Cui, Z. W., Xu, S. Y., & Sun, D. W. (2003). Dehydration of garlic slices by combined microwave-vacuum and air drying. *Drying technology*, 21(7), 1173-1184.
- Chen, F., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Guo, C., & Yu, D. (2021). Comparative analysis of composition and hygroscopic properties of infrared freeze-dried blueberries, cranberries and raspberries. *Drying Technology*, 1-16.)
- Chiabrando, V., Giacalone, G., & Rolle, L. (2009). Mechanical behaviour and quality traits of highbush blueberry during postharvest storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(6), 989-992.



- Dergal, S. B., Rodriguez, H. B., & Morales, A. A. (2006). *Química de los alimentos* (No. 04; TX354 B3 2006.). Pearson educación.
- Devahastin, S. (2000). Mujumdar's practical guide to industrial drying. *Exergex Corporation*.
- Drake, M. A. (2007). Invited review: Sensory analysis of dairy foods. *Journal of dairy science*, 90(11), 4925-4937.
- Durst, R. W., & Wrolstad, R. E. (2001). Separation and characterization of anthocyanins by HPLC. *Current protocols in food analytical chemistry*, (1), F1-3.
- Dvořák, P., Doležalová, J., & Suchý, P. (2009). Photocolorimetric determination of yolk colour in relation to selected quality parameters of eggs. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(11), 1886-1889.
- El-Sebaii, A. A., & Shalaby, S. M. (2012). Solar drying of agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 37-43.
- Emadi, B., Kosse, V., & Yarlagadda, P. K. (2005). Mechanical properties of pumpkin. *International Journal of Food Properties*, 8(2), 277-287.
- FAOSTAT [http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries\\_by\\_commodity\\_exports](http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity_exports)
- Farahat, S., Sarhaddi, F., & Ajam, H. (2009). Exergetic optimization of flat plate solar collectors. *Renewable energy*, 34(4), 1169-1174.
- Farakos, S. S., Frank, J. F., & Schaffner, D. W. (2013). Modeling the influence of temperature, water activity and water mobility on the persistence of Salmonella in low-moisture foods. *International journal of food microbiology*, 166(2), 280-293.
- Fernandes, F. A., Rodrigues, S., Cárcel, J. A., & García-Pérez, J. V. (2015). Ultrasound-assisted air-drying of apple (*Malus domestica* L.) and its effects on the vitamin of the dried product. *Food and Bioprocess Technology*, 8(7), 1503-1511.
- Fito Maupoey, P. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*.
- Fritzen-Freire, C. B., Prudêncio, E. S., Amboni, R. D., Pinto, S. S., Negrão-Murakami, A. N., & Murakami, F. S. (2012). Microencapsulation of bifidobacteria by spray drying in the presence of prebiotics. *Food Research International*, 45(1), 306-312.
- Fudholi, A., Sopian, K., Bakhtyar, B., Gabbasa, M., Othman, M. Y., & Ruslan, M. H. (2015). Review of solar drying systems with air based solar collectors in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1191-1204.



- Fudholi, A., Sopian, K., Gabbasa, M., Bakhtyar, B., Yahya, M., Ruslan, M. H., & Mat, S. (2015). Techno-economic of solar drying systems with water based solar collectors in Malaysia: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 809-820.
- Gallo, R. T., Lugo, P. J. M., & Padilla, K. A. M. (2017). Diseño y construcción de un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar, utilizando PCM como fuente de almacenamiento térmico, para secado de yuca. *TecnoLógicas*, 20(39), 5.
- Garau, M. C., Simal, S., Rossello, C., & Femenia, A. (2007). Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties of dietary fibre and antioxidant capacity of orange (*Citrus aurantium* v. *Canoneta*) by-products. *Food chemistry*, 104(3), 1014-1024.
- Garau, M. C., Simal, S., Rossello, C., & Femenia, A. (2007). Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties of dietary fibre and antioxidant capacity of orange (*Citrus aurantium* v. *Canoneta*) by-products. *Food chemistry*, 104(3), 1014-1024.
- García Valladares, O., & Pilatowsky Figueroa, I. (2017). Aplicaciones termicas de la energia solar en los sectores residencial, servicio e industrial.
- García, L. E., Mejía, M. F., Mejía, D. J., & Valencia, C. A. (2012). Diseño y construcción de un deshidratador solar de frutos tropicales. *Avances: Investigación en Ingeniería*, 9(2), 09-19.
- GARZÓN, G. A. (2008). Anthocyanins as natural colorants and bioactive compounds: A review. *Acta Biológica Colombiana*, 13(3), 27-36.
- Gulcimen, F., Karakaya, H., & Durmus, A. (2016). Drying of sweet basil with solar air collectors. *Renewable energy*, 93, 77-86.
- Gutierrez, A. G., Acevedo, J. A., Ballarte, L. N., Teixeira, B. J., Llajaruna, H. P., Aquise, I. S., ... & Jacobo, F. Q. (2009). Antocianinas, fenoles totales y actividad antioxidante de las corontas del maíz morado (*Zea mays* L.): Método de extracción. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 8(6), 509-518.
- Gutiérrez, J. B. (2000). *Ciencia bromatológica: principios generales de los alimentos*. Ediciones Díaz de Santos.
- Hancock, J. F., Lyrene, P., Finn, C. E., Vorsa, N., & Lobos, G. A. (2008). Blueberries and cranberries. In *Temperate fruit crop breeding* (pp. 115-150). Springer, Dordrecht.



- Hangun-Balkir, Y., & McKenney, M. L. (2012). Determination of antioxidant activities of berries and resveratrol. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 5(2), 147-153.
- Hidalgo, G. I., & Almajano, M. P. (2017). Red fruits: extraction of antioxidants, phenolic content, and radical scavenging determination: a review. *Antioxidants*, 6(1), 7.
- Hidalgo, G. I., & Almajano, M. P. (2017). Red fruits: extraction of antioxidants, phenolic content, and radical scavenging determination: a review. *Antioxidants*, 6(1), 7.
- Hii, C. L., Ong, S. P., Yap, J. Y., Putranto, A., & Mangindaan, D. (2021). Hybrid drying of food and bioproducts: a review. *Drying Technology*, 1-23.
- Hnin, K. K., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Zhu, Y. (2018). Emerging food drying technologies with energy-saving characteristics: A review. *Drying Technology*.
- Huang, D., Yang, P., Tang, X., Luo, L., & Sunden, B. (2021). Application of infrared radiation in the drying of food products. *Trends in Food Science & Technology*.
- Huang, X., Li, J., Shang, H., & Meng, X. (2015). Effect of methyl jasmonate on the anthocyanin content and antioxidant activity of blueberries during cold storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(2), 337-343.
- Jangde, P. K., Singh, A., & Arjunan, T. V. (2021). Efficient solar drying techniques: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-14.
- Janjai, S., Lamlert, N., Intawee, P., Mahayothee, B., Bala, B. K., Nagle, M., & Müller, J. (2009). Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana. *Solar energy*, 83(9), 1550-1565.
- Jayaraman, K. S., & Gupta, D. D. (2006). Drying of fruits and vegetables. In *Handbook of industrial drying* (pp. 630-659). CRC Press.
- Jones, L. V., Peryam, D. R., & Thurstone, L. L. (1955). Development of a scale for measuring soldiers' food preferences. *Food research*, 20, 512-520.
- Juraev, E. T., & Akhatov, J. S. (2009). Study of mixed-mode forced convection solar drier. *Applied Solar Energy*, 45(1), 61-64.
- Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K. H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 894-900.
- Kasaeian, A., & Sarrafha, H. (2021). Solar energy systems: An approach to zero energy buildings. In *Advances in Clean Energy Technologies* (pp. 89-170). Academic Press.



- Khanlari, A., Sözen, A., Şirin, C., Tuncer, A. D., & Gungor, A. (2020). Performance enhancement of a greenhouse dryer: Analysis of a cost-effective alternative solar air heater. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119672.
- Konica Minolta Sensing (2014, septiembre 29). *Entendiendo El Espacio de Color CIE L\*A\*B*. <https://sensing.konicaminolta.us/mx/blog/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/>
- Koulibaly, A., & Bayón, J. J. G. (2015). Modelación de un colector solar para calentamiento de aire. *Ingeniería Energética*, 36(3), 282-293.
- Kowalski, S. J., Rajewska, K., & Rybicki, A. (2005). Stresses generated during convective and microwave drying. *Drying Technology*, 23(9-11), 1875-1893.
- Kudra, T., & Mujumdar, A. S. (2009). *Advanced drying technologies*. CRC press.
- Kumar, M., Sansaniwal, S. K., & Khatak, P. (2016). Progress in solar dryers for drying various commodities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 346-360.
- Kumar, Y., Singh, L., Sharanagat, V. S., Mani, S., Kumar, S., & Kumar, A. (2021). Quality attributes of convective hot air dried spine gourd (*Momordica dioica* Roxb. Ex Willd) slices. *Food Chemistry*, 347, 129041.
- Lakshmi, D. V. N., Muthukumar, P., Layek, A., & Nayak, P. K. (2018). Drying kinetics and quality analysis of black turmeric (*Curcuma caesia*) drying in a mixed mode forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage. *Renewable Energy*, 120, 23-34.
- Li, L., Zhang, M., Chitrakar, B., & Jiang, H. (2020). Effect of combined drying method on phytochemical componentes, antioxidant capacity and hygroscopicity of Huyou (*Citrus changshanensis*) fruit. *Lwt*, 123, 109102.
- Lingayat, A. B., Chandramohan, V. P., Raju, V. R. K., & Meda, V. (2020). A review on indirect type solar dryers for agricultural crops—Dryer setup, its performance, energy storage and important highlights. *Applied Energy*, 258, 114005.
- López, J., Uribe, E., Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., González, E. y Di Scala, K. (2010). Efecto de la temperatura del aire sobre la cinética de secado, vitamina C, actividad antioxidante, contenido fenólico total, pardeamiento no enzimático y firmeza de los arándanos variedad O Neil. *Tecnología de alimentos y bioprocesos*, 3 (5), 772-777.



- López-Vidaña, E. C., Méndez-Lagunas, L. L., & Rodríguez-Ramírez, J. (2013). Efficiency of a hybrid solar–gas dryer. *Solar energy*, 93, 23-31.
- Llumiquinga Moromenacho, P. A., & Suquillo Pulupa, B. S. (2015). *Diseño y construcción de un prototipo de deshidratador de frutas de capacidad de 12 kg. con circulación de aire forzado utilizando resistencias eléctricas* (Bachelor's thesis).
- M'hiri, N., Ioannou, I., Ghoul, M., & Boudhrioua, N. M. (2015). Proximate chemical composition of orange peel and variation of phenols and antioxidant activity during convective air drying. *Journal of New Sciences*.
- Maillard, M. N., & Berset, C. (1995). Evolution of antioxidant activity during kilning: role of insoluble bound phenolic acids of barley and malt. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 43(7), 1789-1793.
- Marinova, G., & Batchvarov, V. (2011). Evaluation of the methods for determination of the free radical scavenging activity by DPPH. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 17(1), 11-24.
- Martín Gómez, J., Varo, M. Á., Mérida, J., & Serratos, M. P. (2020). Influence of drying processes on anthocyanin profiles, total phenolic compounds and antioxidant activities of blueberry (*Vaccinium corymbosum*). *LWT*, 120, 108931.
- Martín-Gómez, J., Varo, M. Á., Mérida, J., & Serratos, M. P. (2020). Influence of drying processes on anthocyanin profiles, total phenolic compounds and antioxidant activities of blueberry (*Vaccinium corymbosum*). *LWT*, 120, 108931.
- Mathias-Rettig, K., & Ah-Hen, K. (2014). El color en los alimentos un criterio de calidad medible. *Agro sur*, 42(2), 57-66.)
- Mathias-Rettig, K., & Ah-Hen, K. (2014). El color en los alimentos un criterio de calidad medible. *Agro sur*, 42(2), 57-66.
- Mazza, G., & Brouillard, R. (1987). Recent developments in the stabilization of anthocyanins in food products. *Food chemistry*, 25(3), 207-225.
- McMinn, W. A. M., McLoughlin, C. M., & Magee, T. R. A. (2005). Thin-layer modeling of microwave, microwave-convective, and microwave-vacuum drying of pharmaceutical powders. *Drying Technology*, 23(3), 513-532.



- Mehra, L. K., MacLean, D. D., Shewfelt, R. L., Smith, K. C., & Scherm, H. (2013). Effect of postharvest biofumigation on fungal decay, sensory quality, and antioxidant levels of blueberry fruit. *Postharvest biology and technology*, 85, 109-115.
- Mezhrab, A., Elfarh, L., Naji, H., & Lemonnier, D. (2010). Computation of Surface Radiation and Natural Convection in a Heated Horticulture Greenhouse. *Appl. Energy*, 87, 894-900.
- Mezquitillo Bocanegra, C., Ruiz Camacho, B., & 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.
- Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical chemistry*, 31(3), 426-428.
- Mohana, Y., Mohanapriya, R., Anukiruthika, T., Yoha, K. S., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances. *Solar Energy*, 208, 321-344.
- Moreno, D. C., Sierra, H. M., & Moreno, C. D. (2014). Evaluación de parámetros de calidad físico-química, microbiológica y sensorial en tomate deshidratado comercial (*Lycopersicum esculentum*). *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 17(1), 131-138.
- Moyano, M. B., Galvan, J., Rios De Gonzalez, L., & Paz, C. (2019). *Comercialización y competitividad del arándano argentino*. Ediciones INTA.
- Naidu, M. M., Vedashree, M., Satapathy, P., Khanum, H., Ramsamy, R., & Hebbar, H. U. (2016). Effect of drying methods on the quality characteristics of dill (*Anethum graveolens*) greens. *Food chemistry*, 192, 849-856.
- Nakabeppu, Y., Sakumi, K., Sakamoto, K., Tsuchimoto, D., Tsuzuki, T., & Nakatsu, Y. (2006). Mutagenesis and carcinogenesis caused by the oxidation of nucleic acids.
- Nambeesan, S. U., Doyle, J. W., Capps, H. D., Starns, C., & Scherm, H. (2018). Effect of electronic cold-pasteurization<sup>TM</sup> (ECPTM) on fruit quality and postharvest diseases during blueberry storage. *Horticulturae*, 4(3), 25.
- Obajemih, O. I., Olaoye, J. O., Cheng, J. H., Ojediran, J. O., & Sun, D. W. (2021). Optimization of process conditions for moisture ratio and effective moisture diffusivity of tomato during



- convective hot-air drying using response surface methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(4), e15287.
- Ofori, J., Tortoe, C., & Agbenorhevi, J. K. (2020). Physicochemical and functional properties of dried okra (*Abelmoschus esculentus* L.) seed flour. *Food Science & Nutrition*, 8(8), 4291-4296.
- Oko, C. O. C., & Nnamchi, S. N. (2012). Heat transfer in a low latitude flat-plate solar collector. *Thermal science*, 16(2), 583-591.
- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2016). Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 15(3), 599-618.
- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R., Abdan, K., Chen, G., & Oladejo, A. O. (2017). Non-thermal hybrid drying of fruits and vegetables: A review of current technologies. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 43, 223-238.
- Oueslati, H., Mabrouk, SB y Marni, A. (2014, marzo). Diseño e instalación de un túnel secador solar-gas: Estudio experimental comparativo de dos escenarios de secado. En *2014 V Congreso Internacional de Energías Renovables (IREC)* (págs. 1-6). IEEE.
- Pallas, L. A., Pegg, R. B., & Kerr, W. L. (2013). Quality factors, antioxidant activity, and sensory properties of jet-tube dried rabbiteye blueberries. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(8), 1887-1897.
- Paniagua, A. C., East, A. R., & 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.
- Pazmiño-Durán, E. A., Giusti, M. M., Wrolstad, R. E., & Glória, M. B. A. (2001). Anthocyanins from *Oxalis triangularis* as potential food colorants. *Food Chemistry*, 75(2), 211-216.
- Perera, CO (2005). Atributos de calidad seleccionados de los alimentos secos. *Tecnología de secado*, 23 (4), 717-730.
- Perez, N. E., & Schmalko, M. E. (2009). Convective drying of pumpkin: influence of pretreatment and drying temperature. *Journal of food process engineering*, 32(1), 88-103.



- Peryam, D. R., & Haynes, J. G. (1957). Prediction of soldiers' food preferences by laboratory methods. *Journal of Applied Psychology*, 41(1), 2.
- Phuon, V., Ramos, I. N., Brandão, T. R., & Silva, C. L. (2021). Assessment of the impact of drying processes on orange peel quality characteristics. *Journal of Food Process Engineering*, e13794.
- Pobiega, K., Igielska, M., Włodarczyk, P., & 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 & Technology*, 56(2), 1013-1020.
- Prakash, O., & Kumar, A. (Eds.). (2017). *Solar drying technology: concept, design, testing, modeling, economics, and environment*. Springer.
- Ramírez-Navas, J. S. (2012). *Análisis sensorial: pruebas orientadas al consumidor*. Revista ReCiTeIA.
- Ramos, C., Ramirez, R., & Beltran, J. (2014). Potential assessment in Mexico for solar process heat applications in food and textile industries. *Energy Procedia*, 49, 1879-1884.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free radical biology and medicine*, 26(9-10), 1231-1237.
- Reque, P. M., Steckert, E. V., dos Santos, F. T., Danelli, D., Jablonski, A., Flôres, S. H., ... & 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., & 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.
- Reyes, A., Mahn, A., & Vásquez, F. (2014). Mushrooms dehydration in a hybrid-solar dryer, using a phase change material. *Energy Conversion and management*, 83, 241-248.
- Rodwell, V. W. B., David, A., Botham, K. M., Kennelly, P. J., & Weil, P. A. (2016). *Harper. Bioquímica ilustrada*. McGraw-Hill.



- Romano, G., Nagle, M., Argyropoulos, D., & 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.
- Saftner, R., Polashock, J., Ehlenfeldt, M., & Vinyard, B. (2008). Instrumental and sensory quality characteristics of blueberry fruit from twelve cultivars. *Postharvest Biology and Technology*, 49(1), 19-26.
- Sarsavadia, P. N. (2007). Development of a solar-assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion. *Renewable energy*, 32(15), 2529-2547.
- Schutz, H. G., & Cardello, A. V. (2001). A labeled affective magnitude (lam) scale for assessing food liking/disliking 1. *Journal of Sensory Studies*, 16(2), 117-159.
- Schwartz, S.J., Von Elbe, J.H. and Giusti, M. 2008. Colorants. In Fennema's Food Chemistry (S. Damodaran, K.L. Parkin and O.R. Fennema, eds.) pp. 571–638, CRC Press, Boca Raton, FL
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(2), 318-345.
- Sharma, G. P., & Prasad, S. (2004). Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying. *Journal of Food Engineering*, 65, 609-617.
- Sheng, L., Tsai, H. C., Zhu, H., & Zhu, M. J. (2019). Survival of *Listeria monocytogenes* on blueberries post-sanitizer treatments and subsequent cold storages. *Food Control*, 100, 138-143.
- Singh, P. L. (2011). Silk cocoon drying in forced convection type solar dryer. *Applied energy*, 88(5), 1720-1726.
- Skrede, G., Wrolstad, R. E., & 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.
- Slama, R. B., & Combarous, M. (2011). Study of orange peels dryings kinetics and development of a solar dryer by forced convection. *Solar energy*, 85(3), 570-578.
- Stadtman, E. R. (1992). Protein oxidation and aging. *Science*, 257(5074), 1220-1224.



- Staniszewska, I., Liu, Z. L., Zhou, Y., Zielinska, D., Xiao, H. W., Pan, Z., & Zielinska, M. (2020). Microwave-assisted hot air convective drying of whole cranberries subjected to various initial treatments. *LWT*, 133, 109906.
- Stone, H., & Sidel, J. L. (2004). Introduction to sensory evaluation. *Sensory Evaluation Practices (Third Edition)*. Academic Press, San Diego, 1-19.
- 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).
- 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).
- Sukhatme, S. P., & Nayak, J. K. (2008). Principles of thermal collection and storage. *Solar Energy, 3rd Edition*, Tata Mc-Graw Hill Publishing company, New Delhi.
- Sun, Y., Zhang, M., & Mujumdar, A. (2019). Berry drying: Mechanism, pretreatment, drying technology, nutrient preservation, and mathematical models. *Food Engineering Reviews*, 1-17.
- Sundari, A. U., Neelamegam, P., & Subramanian, C. V. (2013). Performance of evacuated tube collector solar dryer with and without heat sources. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 4(4), 336-342.
- Tedesco, F. C., Bühler, A. J., & Wortmann, S. (2019). Design, construction, and analysis of a passive indirect solar dryer with chimney. *Journal of Solar Energy Engineering*, 141(3), 031015.
- Ulloa, H., García, M., Pérez, A., Meulenert, A., & Ávila, D. (2011). Clima y radiación solar en las grandes ciudades: Zona Metropolitana de Guadalajara (Estado de Jalisco, México). *Investigaciones Geográficas (Esp)*, (56), 165-175.
- Valko, M., Leibfritz, D., Moncol, J., Cronin, M. T., Mazur, M., & Telser, J. (2007). Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease. *The international journal of biochemistry & cell biology*, 39(1), 44-84.
- Vega-Mercado, H., Góngora-Nieto, M. M., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2001). Advances in dehydration of foods. *Journal of food engineering*, 49(4), 271-289.



- Watts, B. M., Ylimaki, G. L., Jeffery, L. E., & Elias, L. G. (1989). *Basic sensory methods for food evaluation*. IDRC, Ottawa, ON, CA.
- Wei, Y., Yu, N., Zhu, Y., Hao, J., Shi, J., Lei, Y., ... & Sun, A. (2020). Exploring the biochemical properties of three polyphenol oxidases from Blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). *Food Chemistry*, 128678.
- Xu, R., Takeda, F., Krewer, G., & 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.
- Yu, B. P. (1994). Cellular defenses against damage from reactive oxygen species. *Physiological reviews*, 74(1), 139-162.
- Zarezade, M., & Mostafaeipour, A. (2016). Identifying the effective factors on implementing the solar dryers for Yazd province, Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 765-775.
- Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A. S., & Wang, S. (2006). Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 17(10), 524-534.
- Zhou, Q., Zhang, C., Cheng, S., Wei, B., Liu, X., & Ji, S. (2014). Changes in energy metabolism accompanying pitting in blueberries stored at low temperature. *Food chemistry*, 164, 493-501.
- Zia, M. P., & Alibas, I. (2021). Influence of the drying methods on color, vitamin C, anthocyanin, phenolic compounds, antioxidant activity, and in vitro bioaccessibility of blueberry fruits. *Food Bioscience*, 42, 101179.
- Zielinska, M., & 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., & 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.



## Anexos

*Tabla 9. Análisis proximal de arándano secado en secador eléctrico.*

Tratamiento	Humedad gr H <sub>2</sub> O*gr MS	Aw	Índice higroscop icidad	pH	Sólidos solubles totales	Azúcares reductores mg/100
T1-60	0.3958	0.277 5	0.22	3.2	6.2	0.531192779



<b>T2-60</b>	0.2548	0.196	0.21	3.2	5.33333333 3	0.492526113
<b>T3-60</b>	0.2199	0.270 5	.0.20	3.6	3.16666666 7	0.514526113
<b>T1-70</b>	0.2859	0.303	0.19	3.1	6.43333333 3	0.507859446
<b>T2-70</b>	0.1979	0.184	0.19	3.2	6.63333333 3	0.484192779
<b>T3-70</b>	0.1931	0.193 5	0.23	3.2	6.56666666 7	0.502192779
<b>T1-80</b>	0.1958	0.356	0.20	3.8	4.03333333 3	0.629859446
<b>T2-80</b>	0.2035	0.214 5	0.20	3.9	4.03333333 3	0.626192779
<b>T3-80</b>	0.1786	0.209 5	0.21	3.7	4.26666666 7	0.607192779