



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD
INSTITUTO DE ECOLOGÍA
SISTEMAS ENERGÉTICOS

APLICACIÓN DE DESHIDRATADORES SOLARES PARA LA REDUCCIÓN DE
MERMAS AGRÍCOLAS: EL CASO DE LA ZARZAMORA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD

PRESENTA:
AZUCENA SILVA NORMAN

TUTOR PRINCIPAL
DR. OCTAVIO GARCÍA VALLADARES
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES
COTUTORA
DRA. ANABEL LÓPEZ ORTÍZ
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
DRA. ILSE RUIZ MERCADO
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MÉRIDA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, ENERO 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Coordinación de Estudios de Posgrado
Ciencias de la Sostenibilidad
Oficio: CEP/PCS/683/19
Asunto: Asignación de Jurado

Lic. Ivonne Ramírez Wence
Directora General de Administración Escolar
Universidad Nacional Autónoma de México
Presente

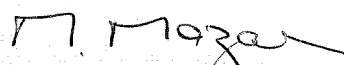
Me permito informar a usted, que el Comité Académico del Programa de Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, en su cuadragésima sesión del 9 de octubre del 2018, aprobó el jurado para la presentación del examen para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD**, de la alumna **SILVA NORMAN AZUCENA** con número de cuenta **301219882** con la tesis titulada "Aplicación de deshidratadores solares para la reducción de mermas agrícolas: el caso de la zarzamora", bajo la dirección del Dr. Octavio García Valladares y de la Dra. Anabel López Ortiz.

PRESIDENTE: DRA. ELENA LAZOS CHAVERO
VOCAL: DR. JOSÉ NÚÑEZ GONZÁLEZ
SECRETARIO: DRA. ILSE RUIZ MERCADO
SUPLENTE 1: DRA. ANABEL LÓPEZ ORTÍZ
SUPLENTE 2: DR. OCTAVIO GARCÍA VALLADARES

Sin más por el momento me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE,

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, Cd. Mx., 7 de enero de 2019.


Dra. Marisa Mazari Hiriart
Coordinadora
Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor el Dr. Octavio García Valladares por brindarme la oportunidad de colaborar con él, por la confianza otorgada, por su apoyo a lo largo de estos dos años, por permitirme tomar mis propias decisiones para el proyecto y siempre respaldarme, gracias por el conocimiento compartido en temas de energía y tecnología solar térmica.

A mi cotutora la Dra. Anabel López Ortiz por ser pieza fundamental desde el inicio del proyecto, por su gran apertura y paciencia en el laboratorio, por compartir su conocimiento de secado y sobre todo muchas gracias por las palabras de aliento.

A mi comité la Dra. Ilse Ruiz Mercado por su compromiso y su guía. Por propiciar la vinculación con los productores y poder realizar la investigación.

A mi jurado la Dra. Elena Lazos Chavero y el Dr. José Núñez González por compartir sus enfoques, sus aportaciones tan enriquecedoras y su tiempo.

Al Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa por permitirme realizar la investigación en el laboratorio de secado solar y por invitarme a participar en el congreso de estudiantes CNEER.

A el Ing. Gustavo Calleros Coloni por permitirme conocer su huerta, por compartir su conocimiento de la zarzamora, por regalarme la materia prima para la investigación, por propiciar el espacio para presentar mi proyecto, sin su ayuda no habría sido posible.

A los productores y comercializadores que me concedieron tiempo para realizar los cuestionarios.

A la coordinación del Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad por su apoyo para cumplir en tiempo y forma todos los procedimientos y trámites académicos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría.

Al Programa de Apoyo a los Estudios de Posgrado por brindarme el recurso para participar en el congreso “Agriculture & Food Chemistry” en Roma.

A mis amigas Ana Laura, Viridiana, Gabriela, Alejandra y Martha hicieron de esta experiencia algo inolvidable.

DEDICATORIA

*Al amor de mi madre y la memoria de mi padre.
A Mariano, Julieta, Jorge Luis, Alondra,
Liam y Lenny infinitas gracias.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	III
ÍNDICE DE TABLAS	V
NOMENCLATURA	VII
1 ANTECEDENTES	2
1.1 SOSTENIBILIDAD Y SISTEMA ALIMENTARIO.....	2
1.1.1 Pérdida y desperdicio de alimentos.....	4
1.1.2 Situación y alcance de desperdicio de alimentos a nivel mundial	5
1.1.3 Situación y alcance de desperdicio de alimentos en México	9
1.2 IMPORTANCIA DE LA ZARZAMORA, DESCRIPCIÓN Y PROPIEDADES	10
1.2.1 Descripción	10
1.2.2 Composición de Nutrientes en la zarzamora.....	11
1.2.2.1 Compuestos Fenólicos.....	12
1.2.2.2 Antocianinas	13
1.2.2.3 Flavonoides	15
1.2.3 La zarzamora en el contexto internacional	15
1.2.4 La zarzamora en el contexto nacional.....	17
1.2.5 La Cadena de Valor de la zarzamora	19
1.2.6 Situación de pérdida y merma de la zarzamora	20
1.3 SECADO	21
1.3.1 Secado solar	22
1.3.2 Tipos de secadores solares	22
1.3.3 Fundamentos del proceso de secado	23
1.3.3.1 Curvas de velocidad de secado.....	25
1.3.3.2 Remoción de la humedad en el periodo de velocidad constante.....	27
1.3.3.3 Remoción de la humedad en el periodo de velocidad decreciente.....	29
2 PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN	31
2.1 OBJETIVOS.....	31
2.1.1 Objetivo general.....	31
2.1.2 Objetivos específicos	31
2.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	31
2.2.1 Pregunta central.....	31
2.2.2 Preguntas adicionales	31
2.3 HIPÓTESIS.....	32
3 DISEÑO METODOLÓGICO.....	33
3.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	33
3.1.1 Muestra y pretratamiento	33
3.1.2 Métodos de secado	33
3.1.2.1 Secado solar directo (SSD)	34
3.1.2.2 Secado solar tipo invernadero (SSI).....	34
3.1.3 Cinética de secado de la zarzamora	36
3.1.4 Caracterización química de la zarzamora	36
3.1.4.1 Actividad Antioxidante	36
3.1.4.2 Fenoles totales	38
3.1.4.3 Flavonoides	39
3.1.4.4 Antocianinas	41

3.2	METODOLOGÍA DE VALORACIÓN ENERGÉTICA DE LA DESHIDRATACIÓN	42
3.2.1	Transferencia de calor en el secado	42
3.2.1.1	Convección forzada.....	42
3.2.1.2	Convección natural.....	45
3.2.2	Comparación de consumo energético con otros combustibles.....	45
3.2.3	Cuantificación de las emisiones de CO ₂ evitadas a la atmósfera.....	47
3.3	POTENCIAL DE ACEPTACIÓN DE LOS DESHIDRATADORES SOLARES	47
3.3.1	Encuesta	47
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
4.1	CONDICIONES TERMODINÁMICAS.....	49
4.1.1	Humedad relativa e irradiancia	49
4.1.2	Temperatura del secado	50
4.1.2.1	Secador solar tipo Invernadero (SSI)	50
4.1.2.2	Secado solar Directo (SSD).....	50
4.2	CINÉTICA DE SECADO DE LA PULPA DE ZARZAMORA	53
4.3	VELOCIDAD DE SECADO.....	55
4.3.1	Secador solar tipo invernadero.....	55
4.3.2	Secador solar directo	56
4.3.3	Secado en estufa (condiciones controladas).....	56
4.3.4	Comparativa de secados	57
4.4	PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS Y ANTIOXIDANTES DE LA ZARZAMORA.....	58
4.4.1	Capacidad antioxidante	58
4.4.2	Fenoles totales	59
4.4.3	Flavonoides	61
4.4.4	Antocianinas.....	62
4.5	TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL SECADO	64
4.5.1	Convección Forzada.....	64
4.5.1.1	Período evaporativo.....	64
4.5.1.2	Período difusivo	66
4.5.2	Convección natural	68
4.5.3	Comparación de costos de secado con gas lp, gas natural y electricidad	70
4.5.4	Emisiones de CO ₂ evitadas	70
4.6	ANÁLISIS DE CUESTIONARIOS	71
4.6.1	Primera sección. General de la producción.....	72
4.6.2	Segunda sección. De las mermas de zarzamora.....	72
4.6.3	Tercera sección. De la tecnología de deshidratación solar	75
4.6.4	Cuarta sección. De los productos obtenidos por deshidratación de la zarzamora	77
5	CONCLUSIONES.....	80
5.1	RECOMENDACIONES	81
	REFERENCIAS.....	83
	ANEXO.	90

RESUMEN

En la presente investigación se propone el uso de deshidratadores solares encaminado a reducir las mermas agrícolas, se planteó la utilización de las tecnologías solar térmica para mejorar la problemática de pérdida de alimentos generadas en los primeros eslabones de la cadena y de esta forma mejorar la eficiencia de los sistemas alimentarios.

El objetivo fue realizar un estudio comparativo del desempeño técnico, económico, ambiental y la evaluación del potencial de aceptación de dos tipos de deshidratadores solares (tipo invernadero y directo) en contraste con uno convencional (estufa eléctrica). Se seleccionó el caso de estudio de la zarzamora, debido a su actual interés por su contenido de antioxidantes, sin embargo, por sus características físicas y morfológicas es altamente perecedera, mermando cerca del 30% de su producción en las etapas de cosecha y poscosecha. El sitio de estudio seleccionado fue el municipio de Los Reyes, Michoacán ya que tiene el primer lugar de producción de zarzamora a nivel nacional.

Para evaluar las tecnologías las variables seleccionadas para el desempeño tecnológico fueron: cinética y velocidad de secado, como referente de calidad se determinaron el contenido de compuestos fenólicos (fenoles totales, flavonoides y antocianinas) y la capacidad antioxidante en las muestras deshidratadas, por ser parámetros de importancia comercial. Adicionalmente se determinó el calor involucrado en los procesos de secado por convección natural y forzada, con los requerimientos energéticos se compararon los desempeños ambiental y económico en términos de emisiones de CO₂ evitadas al ambiente y los ahorros monetarios que representa el secado solar frente al secado con combustibles provenientes de fuentes fósiles. Finalmente, a través de un cuestionario para conocer su posible aceptación, se generó un primer diálogo con los agricultores como posibles usuarios de la tecnología

Los resultados mostraron que el tiempo requerido para el secado fue menor con la tecnología convencional, sin embargo, las tecnologías solares mostraron menor degradación de los compuestos fenólicos. Todos los polifenoles presentaron una sensibilidad térmica y a la luz, siendo los más sensibles las antocianinas presentando una degradación de 87%, seguido de los antioxidantes con 70%, los fenoles totales con 40%, y los que presentaron una mayor resistencia fueron los flavonoides con degradación del 20%.

Los requerimientos del calor para el secado en el periodo evaporativo y difusivo del invernadero fue de 15.34 MJ por kilogramo de producto deshidratado, y para el periodo evaporativo del secador directo de 7.16 MJ. Esta demanda de energía representó ahorros en la comparativa con gas LP de \$9.58 y \$4.47 pesos por kilogramo de producto deshidratado y evitarían en promedio la emisión al ambiente de 2.48 y 0.16 kg de CO₂ por kilogramo de producto seco si se secara con electricidad para el secador tipo invernadero y directo respectivamente. Los cuestionarios aplicados a los productores de zarzamora dejaron entre ver su interés y aceptación hacia la tecnología de deshidratación y los productos obtenidos, no obstante, el tiempo de interacción fue muy breve para poder realizar una conclusión determinante.

Los deshidratadores solares han demostrado ser una alternativa apropiada para la reducción de mermas de zarzamora creando productos con valor nutrimental con mayor vida de anaquel, amigable con el medio ambiente, pero es necesario realizar investigación de carácter social para determinar su grado de aceptación y el potencial de adopción con los usuarios finales.

ABSTRACT

In this research, we propose the use of solar dehydrators aimed at reducing agricultural losses, the use of solar thermal technologies was proposed to improve the problem of food waste generated in the first links of the production chain and thus improve the efficiency of food systems.

The objective was to carry out a comparative study of the technical, economic, environmental performance and the evaluation of the acceptance potential of two types of solar dehydrators (greenhouse and direct) in contrast to a conventional one (electrical stove). The case study of the blackberry was selected, due to its current interest in its antioxidant content, however, due to its physical and morphological characteristics, it is highly perishable, reducing nearly 30% of its production in the harvest and post-harvest stages. The selected study site was the municipality of Los Reyes, Michoacán, because it has the first place of production of blackberry at a national level.

To evaluate the technologies, the variables selected for the technological performance were: kinetics and speed of drying, as a reference of quality the content of phenolic compounds (total phenols, flavonoids and anthocyanins) and the antioxidant capacity in the dehydrated samples were determined, being parameters of commercial importance. Additionally, the heat involved in drying processes by natural and forced convection was determined, with the energy requirements the environmental and economic performances were compared in terms of CO₂ emissions avoided to the environment and the monetary savings represented by solar drying versus drying with fossil fuels. Finally, through a questionnaire to know its possible acceptance, a first dialogue with farmers was generated as possible end users of this technology

The results showed that the time required for drying was less with conventional technology, however, solar technologies showed less degradation of phenolic compounds. All polyphenols showed a thermal and sun light sensitivity, being the most sensitive anthocyanins showing a degradation of 87%, followed by antioxidants with 70%, total phenols with 40%, and those that had a greater resistance were flavonoids with 20% degradation.

The heat requirements for drying in the evaporative and diffusive period of the greenhouse solar dryer was 15.34 MJ per kilogram of dehydrated product, and for the evaporative period of the direct dryer was 7.16 MJ. This energy demand represented savings in the comparison with LP gas of \$ 9.58 and \$ 4.47 pesos per kilogram of dehydrated product and would avoid on average the emission to the environment of 2.48 and 0.16 kg of CO₂ per kilogram of dry product in the comparison of drying with electricity for the greenhouse and direct solar dryer respectively. The questionnaires applied to the blackberry producers stopped between seeing their interest and acceptance towards the dehydration technology and the products obtained, however, the interaction time was very short to be able to make a decisive conclusion.

Solar dehydrators have proven to be an appropriate alternative for the reduction of blackberry waste by creating products with nutritional value with longer shelf life, friendly to the environment, but it is necessary to conduct social research to determine their degree of acceptance and potential of adoption with the end users.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Marco estratégico FAO.....	3
Figura 1.2. Representación esquemática de la definición de pérdidas y desperdicios de alimentos a lo largo de la cadena alimentaria a nivel mundial.....	5
Figura 1.3. PDA y DA per cápita a lo largo de la cadena alimentaria en las distintas regiones del mundo.....	6
Figura 1.4. PDA por grupo de alimento para el mundo y América Latina. Elaboración propia con información de.....	8
Figura 1.5. Alimentos más desperdiciados en México. Elaboración propia con información de.....	9
Figura 1.6. Clasificación de los compuestos fenólicos.....	13
Figura 1.7. Estructuras químicas de antocianidinas de la zarzamora.....	14
Figura 1.8. Estructuras químicas de flavonoides de la zarzamora.....	15
Figura 1.9. Proporción de producción de Bayas nep por región.....	16
Figura 1.10. Los diez países principales productores de bayas nep.....	17
Figura 1.11. Volumen de producción total nacional, estatal (Michoacán) y municipal (Los Reyes, Michoacán).....	18
Figura 1.12. Cadena de valor de la zarzamora y sus pérdidas.....	19
Figura 1.13. Clasificación de los secadores solares.....	23
Figura 1.14. Transferencia de masa y calor durante el secado en la estructura celular.....	24
Figura 1.15. Cinética de secado.....	26
Figura 1.16. Velocidad de secado en función de la humedad.....	27
Figura 3.1. Esquema de secador solar directo.....	34
Figura 3.2. Esquema de secador solar tipo invernadero.....	35
Figura 3.3. Curvas de calibración de ácido ascórbico.....	38
Figura 3.4. Curvas de calibración de ácido gálico.....	39
Figura 3.5. Curvas de calibración de Quercentina.....	41
Figura 3.6. Descripción de los participantes seleccionados para la aplicación del cuestionario (n=18).....	48
Figura 4.1. Valoración de las condiciones climáticas el Secador Solar Invernadero (SSI).....	51
Figura 4.2. Valoración de las condiciones climáticas, del Secador Solar Directo (SSD).....	52
Figura 4.3. Cinética de Secado Solar tipo Invernadero (SSI) de la pulpa de zarzamora.....	53
Figura 4.4. Cinética de Secado Solar Directo (SSD) de la pulpa de zarzamora.....	54
Figura 4.5. Cinética de secado solar por diferentes métodos: SSI, SSD y referencia de cinética de secado en estufa (SE).....	54
Figura 4.6. Velocidad de secado de la pulpa de zarzamora en el SSI.....	55
Figura 4.7. Velocidad de secado de la pulpa de zarzamora en el SSD.....	56
Figura 4.8. Velocidad de secado de la pulpa de zarzamora en el SE.....	57
Figura 4.9. Comparativa de la velocidad de secado de la pulpa de zarzamora.....	57
Figura 4.10. Concentraciones de la actividad antioxidante de la pulpa de zarzamora fresca y deshidratada por las diferentes tecnologías.....	58
Figura 4.11. Capacidad antioxidante de la pulpa de la zarzamora deshidratada y su efecto con a) irradiancia y b) temperatura.....	59
Figura 4.12. Concentraciones de fenoles totales de la pulpa de zarzamora fresca y deshidratada por las diferentes tecnologías.....	60
Figura 4.13. Fenoles totales de la pulpa de la zarzamora deshidratada y su efecto con.....	60

Figura 4.14. Concentraciones de los flavonoides de la pulpa de zarzamora fresca y deshidratada por las diferentes tecnologías.....	61
Figura 4.15. Flavonoides de la pulpa de la zarzamora y su efecto con a) irradiancia y b) temperatura	62
Figura 4.16. Concentraciones de antocianinas de la pulpa de zarzamora fresca y deshidratada por las diferentes tecnologías.....	63
Figura 4.17. Antocianinas de la pulpa de zarzamora y su efecto con a) irradiancia y b) temperatura	63
Figura 4.18 a) Colector cosechando la zarzamora directamente en clamshell, b) poscosecha: selección, clasificación, pesado empaque de la zarzamora dentro de la huerta, separación de frutillas fuera del estándar de calidad.	73
Figura 4.19. Merma de zarzamora	74
Figura 4.20 Pulpa de zarzamora a) charolas en el Secador Solar tipo Invernadero b) una vez retirada de la charola.....	77
Figura 4.21. Alternativas de productos generados a partir de la pulpa de zarzamora deshidratada.	78
Figura 4.22. Alternativas de productos generados a partir del polvo de zarzamora deshidratada.	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Posibles causas de la pérdida de alimentos en las diferentes etapas de la cadena alimentaria.....	7
Tabla 1.3. Composición química de las zarzamoras del Departamento de Agricultura de EE.UU.....	12
Tabla 1.3. Valores de fenoles totales y antocianinas totales de la zarzamora en diferentes estudios.....	12
Tabla 1.5. Resumen de antocianinas, flavonoides, y elagitaninos identificados en la zarzamora.....	14
Tabla 1.6. Principal Producción Agrícola en Michoacán, año agrícola 2016. Elaboración propia con datos del SIAP,2017 (pesos corrientes).....	18
Tabla 1.7. Aplicaciones para deshidratadores seleccionados.....	22
Tabla 1.8. Tipos de migración de la humedad.....	25
Tabla 3.1. Reactivos utilizados en la determinación de la actividad antioxidante. Todos los reactivos utilizados son grado analítico.....	37
Tabla 3.2. Diluciones de ácido ascórbico para curva estándar.....	37
Tabla 3.3. Reactivos utilizados en la determinación de fenoles totales. Todos los reactivos utilizados son grado analítico.....	38
Tabla 3.4. Diluciones de ácido gálico para curva estándar.....	39
Tabla 3.5. Reactivos utilizados en la determinación de flavonoides. Todos los reactivos utilizados son grado analítico.....	40
Tabla 3.6. Diluciones de quercetina para curva estándar.....	40
Tabla 3.7. Reactivos utilizados en la determinación de antocianinas. Todos los reactivos utilizados son grado analítico.....	41
Tabla 3.8. Valores de la constante bi para cálculo de InPAS en la Ecuación 3-13.....	44
Tabla 3.9. Valores de la constante Ci para cálculo de Tah en la Ecuación 3-14.....	44
Tabla 3.10. Valores del poder calorífico y precios del diferentes combustibles.....	46
Tabla 3.11. Factores de emisión para los combustibles: gas LP, gas natural y electricidad, desarrollados y reportados por.....	47
Tabla 4.1. Condiciones de humedad relativa, irradiancia e irradiación para los tres secados.....	49
Tabla 4.2. Temperatura promedio y máx. para SSD y SSI.....	50
Tabla 4.3. Parámetros considerados para el cálculo del calor en el periodo evaporativo de SE y SSI.....	65
Tabla 4.4. Calor en el periodo evaporativo para las tecnologías SE y SSI.....	65
Tabla 4.5. Calor en el periodo evaporativo, método números adimensionales para el SSI-1.....	66
Tabla 4.6. Calor en el periodo evaporativo, método números adimensionales para el SSI-2.....	66
Tabla 4.7. Calor en el periodo evaporativo, método números adimensionales para el SSI-3.....	66
Tabla 4.8. Calor requerido en el periodo difusivo para el SSI-1.....	67
Tabla 4.9. Calor requerido en el periodo difusivo para el SSI-2.....	67
Tabla 4.10. Calor requerido en el periodo difusivo para el SSI-3.....	68
Tabla 4.11. Calor requerido en el SSI.....	68

Tabla 4.12. Calor en el periodo evaporativo por convección natural, método de números adimensionales para el SSD-1.	69
Tabla 4.13. Calor en el periodo evaporativo por convección natural, método de números adimensionales para el SSD-2.	69
Tabla 4.14. Calor en el periodo evaporativo por convección natural, método de números adimensionales para el SSD-3.	69
Tabla 4.15. Calor requerido en el para el SSI.	70
Tabla 4.16. Comparativa de costos de producción por kilogramo para el SSI Y SSD.....	70
Tabla 4.17. Comparativa de emisiones de CO ₂ por kilogramo para el SSI y SSD.....	71

NOMENCLATURA

ABREVIATURAS

AAE	Ácido ascórbico equivalente
ACS	Ácido ascórbico
AlCl ₃	Cloruro de aluminio
C ₂ H ₃ NaO ₂	Acetato de sodio
C ₇ H ₆ O ₅	Ácido gálico
CARO	Capacidad de Absorción de Radicales de Oxígeno
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CO ₂	Dióxido de carbono
CRE	Comisión Reguladora de Energía
CH ₃ CH ₂ OH	Etanol
CH ₃ OH	Metanol
DA	Desperdicio de alimentos
DPPH	α , α -difeníl- β -picrilhidrazilo
ET	Elagitaninos
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FIRA	Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura
FUMIAT	Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria y Forestal
GAE	Ácido gálico equivalente
GEI	Gas de Efecto Invernadero
H	Hidrógeno
H ₂ O	Agua
HCl	Ácido clorhídrico
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
KCl	Cloruro de potasio
NaNO ₂	Nitrito de sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
ODEPA	Oficina de Estudios y Política Agraria,
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OECD	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
OH	Grupo hidroxilo
OH ⁻	Anión hidróxido
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PDA	Pérdida de Alimentos
PEMEX	Petróleos Mexicanos
pH	Potencial hidrógeno
s.s	Sólido seco
SE	Secado en estufa
SENER	Secretaría de Energía
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
SISPROA	Sistemas Producto Agrícolas
SPZ	Sistema Producto Zanzamora
SSD	Secado solar directo

SSI	Secado solar invernadero
TA	Total de antocianinas
TDPB	Tarifa pequeña demanda baja tensión
UV	Ultra Violeta

UNIDADES

°C	Grados Celsius
A	Absorbancia
cm	Centímetro
g	Gramos
Gton	Giga tonelada
h	Hora
ha	Hectárea
J	Joule
K	Kelvin
kg	Kilogramos
kJ	Kilojoule
km ³	Kilómetros cúbicos
kW	Kilowatt
L	Litros
m	Metro
m ²	Metro cuadrado
mbar	Milibares
mg	Miligramos
min	Minutos
ml	Mililitros
mmHg	Milímetros de mercurio
mol	Mol
MJ	Megajoule
MW	Megawatt
nm	Nanómetros
Pa	Pascales
rpm	Revoluciones por minuto
ton	Tonelada
W	Watt
μl	Microlitros

NÚMEROS ADIMENSIONALES

<i>Gr</i>	Número de Grashof
<i>Nu</i>	Número de Nusselt
<i>Pr</i>	Número de Prandtl
<i>Re</i>	Número de Reynolds
<i>Sc</i>	Número de Schmidt
<i>Sh</i>	Número de Sherwood

VARIABLES

A	Área de transferencia de secado	m^2
A_p	Área del producto	m^2
Cp_a	Capacidad calorífica del aire seco	$Jkg^{-1}K^{-1}$
Cp_{ah}	Capacidad calorífica del aire húmedo	$Jkg^{-1}K^{-1}$
Cp_w	Capacidad calorífica del agua	$Jkg^{-1}K^{-1}$
D_{ab}	Difusividad molecular del vapor de agua en el aire	m^2s^{-1}
g	Aceleración gravitacional	ms^{-2}
H	Humedad absoluta	$kgkg_a^{-1}$
H^*	Humedad volumétrica	kgm^{-3}
h	Diferencia de altura	m
h_H	Coefficiente convectivo de transferencia de calor	$Wm^{-2}K^{-1}$
h_M	Coefficiente convectivo de transferencia de masa	ms^{-1}
h_c	Coefficiente de transferencia de calor convectivo	$Wm^{-2}K^{-1}$
K_a	Coefficiente de conductividad térmica	$Wm^{-1}K^{-1}$
l	Ancho de la placa	m
m_p	Masa del producto	kg
P	Presión del ambiente	Pa
P_{AS}	Presión de vapor del agua	Pa
P_{atm}	Presión atmosférica a nivel del mar	760 mmHg
P_{lugar}	Presión atmosférica del sitio de estudio	$mmHg$
PC_{gas}	Poder calorífico del gas	$MJm^{-3}gas$
q_c	Flujo de calor convectivo	kJ
R	Constante universal de los gases	$N\ m\ mol^{-1}\ K^{-1}$
R_c	Velocidad de secado	$g\ m^{-2}\ s^{-1}$
T	Temperatura	$^{\circ}C$
T_a	Temperatura del aire seco	K
T_{ah}	Temperatura del aire húmedo	K
T_{pro}	Temperatura del aire promedio	K
v	Velocidad característica del fluido	ms^{-1}
V_h	Volumen húmedo	m^3kg^{-1}
W	Humedad normalizada	$g\ H_2O\ g\ s.s^{-1}$
X_t	Humedad al tiempo t	$g\ H_2O\ g\ s.s^{-1}$
y_a	Fracción mol del aire	$kg\ mol$
y_w	Fracción mol del agua	$kg\ mol$
λ_w	Calor latente de vaporización del agua	$kJkg^{-1}$
μ_a	Viscosidad del aire seco	$kgm^{-1}s^{-1}$
μ_{ah}	Viscosidad del aire húmedo	$kgm^{-1}s^{-1}$
μ_w	Viscosidad del agua	$kgm^{-1}s^{-1}$
ρ_a	Densidad del aire seco	kgm^{-3}
ρ_{ah}	Densidad del aire húmedo	kgm^{-3}
ρ_p	Densidad del producto	kgm^{-3}

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo analiza y evalúa desde una perspectiva integral el uso de dos tecnologías de deshidratación solar: tipo invernadero (SSI) y secador directo (SSD) en comparación con un secador convencional: estufa convectiva (SE), encaminadas a reducir mermas agrícolas de zarzamora, para ello se toman en cuenta el análisis de la calidad de los productos obtenidos, la eficiencia de secado por cada una de las tecnologías en conjunto con un análisis energético en términos económicos, emisiones de CO₂ evitadas al implementar los deshidratadores solares y el análisis del potencial de aceptación de los posibles usuarios de la tecnología a través del uso de cuestionarios como instrumento de recogida de datos.

A nivel internacional México es el primer productor de zarzamora con 270 mil toneladas para el año agrícola 2017. En la producción de esta frutilla sobresale el estado de Michoacán donde se produce el 96% de la producción nacional de zarzamora, es decir más de 260 mil toneladas anuales para el mismo ciclo agrícola (SIAP, 2017). La producción y exportación de zarzamora en Michoacán se concentra en una región conocida como el Valle de Los Reyes, donde se genera el 50% del total del estado, con una producción anual de 130 mil toneladas. Por tal motivo, el caso de estudio que se desarrolla es de la zarzamora (*Rhus spp.*) proveniente del Valle de Los Reyes Michoacán.

A pesar de que la cadena de valor de la zarzamora es una de las redes con mayor participación en el valor de la producción agrícola del estado y con presencia a nivel internacional, es una de las más desiguales. Esto se debe en gran proporción al grado de especialización e infraestructura que requiere, donde la cadena en frío es el elemento aglutinante. Por consecuencia los productores primarios tienen una participación en la distribución del ingreso muy por debajo de su aporte

El consumo de la zarzamora ha recibido considerable atención comercial debido a su posicionamiento en el rango de los *superfoods*¹ debido a su contenido de antioxidantes: antocianinas, así como otros compuestos fenólicos cuyos beneficios para la salud han sido bien descritos (Kaume et al., 2012), anticancerígenos, antiinflamatorios, etc., sin embargo, estos frutos son altamente perecederos debido al contenido de humedad que presentan y por sus características morfológicas se establece un porcentaje de desperdicio entre el 20% y el 50% del total de la producción según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2015).

En este contexto la tecnología de deshidratación solar ofrece una alternativa en la conservación de los alimentos, debido a que es un método económico, de bajo mantenimiento, no emite gases a la atmósfera y preserva mejor los nutrientes. Ofrece una opción para mitigar algunas problemáticas asociadas con las mermas. El realizar el desarrollo tecnológico para el manejo poscosecha, creando productos con mayor vida de anaquel y preservando sus nutrientes, beneficiaría a productores y técnicos de la región, dando alternativas para generar valor agregado e incentivar de forma directa al primer eslabón de la cadena de valor.

El trabajo se encuentra contextualizado dentro de las ciencias de la sostenibilidad y tiene como objetivos principales evaluar los factores tecnológicos, económicos y ambientales involucrados en la implementación de deshidratadores solares para su uso en la reducción de mermas agrícolas. Se emplean metodologías de carácter cuantitativo (análisis químico de los

¹ Término de comercialización de alimentos con supuestos beneficios para la salud como resultado de alguna parte de su análisis nutricional o su densidad de nutrientes en general

antioxidantes de la zarzamora, cuantificación energética de las tecnologías, análisis estadístico de datos, para ofrecer una evaluación más completa y facilitar la toma de decisiones.

La tesis está dividida en cinco capítulos, en el capítulo uno se realiza una revisión de los antecedentes en torno al proyecto, desde el entorno de la sostenibilidad y los sistemas alimentarios y la situación y alcance de la pérdida de alimentos a nivel internacional y nacional. La importancia de la zarzamora y su base conceptual química que sustenta a la actividad antioxidante y los compuestos fenólicos. Y al final del capítulo se presenta al secado como método de conservación de alimentos.

En el capítulo dos se describe la propuesta de investigación, es decir, los objetivos, preguntas de investigación e hipótesis. El capítulo tres está conformado por el diseño metodológico, y subdividido en metodología experimental, metodología de valoración energético y el potencial de aceptación de los deshidratadores solares. El capítulo cinco corresponde a los resultados y su discusión y finalmente el capítulo seis son las conclusiones y recomendaciones.

1 ANTECEDENTES

1.1 SOSTENIBILIDAD Y SISTEMA ALIMENTARIO

El desarrollo sostenible se plantea como un modelo o conjunto de principios para que cada país o comunidad modifique su ruta de desarrollo con base en sus propias condiciones sociales, económicas y ambientales, y por lo tanto las ciencias de la sostenibilidad demandan un esfuerzo simultáneo en la construcción de conocimientos teóricos, así como el diseño de aplicaciones prácticas que permitan resolver problemas puntuales en sitios específicos (Ímaz et al., 2015). En un principio se estableció evaluar la sostenibilidad de un producto, un proceso o un sistema de acuerdo con su base triple: ambiental, social y económica, sin embargo, como resultado de este impulso ideológico a nivel mundial para definir un entendimiento complejo y holístico de la sostenibilidad, la Organización de las Naciones Unidas, ONU en 2015 afirmaron lo siguiente:

(...) La base triple de resultados es un ejemplo de cómo la sostenibilidad ecológica y social se aborda en el extremo posterior de un imperativo económico continuo de la rentabilidad. En el contexto actual del cambio climático global, la intensificación de la urbanización, el aumento de las inseguridades transnacionales y la creciente división entre ricos y pobres, existe una urgente necesidad de nuevas formas de encontrar un equilibrio entre los dominios de la sostenibilidad económica, ecológica, política y cultural. (p.8)

En este sentido, la ciencia de la sostenibilidad aspira a vincular el conocimiento con las acciones sociales que promueven visiones de bienestar natural y social (Cash et al., 2003; Clark, 2007; Miller, 2013). Si bien la ciencia y la tecnología sin duda jugarán un papel clave en las transiciones de sostenibilidad, la forma en que las sociedades elijan construir y perseguir visiones de sostenibilidad será un proceso intensamente social, político y cultural (Miller et al., 2009; Norton 2005; Thompson, 2010).

A su vez, un sistema alimentario se define como la suma de los diversos elementos, actividades y actores que, mediante sus interrelaciones, hacen posible la producción, transformación, distribución y consumo de alimentos (FAO, 2017). Para el complejo sistema alimentario los retos de sostenibilidad ocurren en todas las etapas, desde la producción el procesamiento, la distribución el comercio, hasta el consumo y la eliminación de los

desechos. (Betoret et al., 2016; OECD, 2004). El abordaje de la sostenibilidad requiere de un enfoque integral de los sistemas alimentarios, partiendo de la gestión de los recursos naturales, los servicios económicos y sociales y que vincule el manejo de las pérdidas y desperdicios de alimentos, mejorando la eficiencia de los procesos y en especial la participación de todos los actores, generando resultados y beneficios más equitativos (FAO, 2017).

De acuerdo con datos de la FAO (2017) se espera que la población en el año 2050 crezca hasta más de nueve mil millones de habitantes, lo que exigirá un aumento significativo en el requerimiento mundial de alimentos, además de una dieta más rica en nutrientes. Existe una necesidad de los sistemas agrícolas y alimentarios para que no sean exclusivamente más productivos, sino también sostenibles (FAO, 2012; Spiertz, 2010).

Actualmente existen diferentes acciones encaminadas a satisfacer la seguridad alimentaria mundial de manera sostenible; donde las naciones ratifican su compromiso por trabajar por un mundo libre de hambre y malnutrición planteando la necesidad de abordar estos problemas desde el desarrollo de la agricultura sostenible y la alimentación saludable, ya que ambas contribuyen a mejorar la calidad de vida de las personas, especialmente de la población vulnerable. Estos compromisos se ejecutan a través de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, dónde cinco de los ODS están ligados directamente a la sostenibilidad del sistema alimentario:

- ODS 1. Fin de la pobreza.
- ODS 2. Hambre cero.
- ODS 12. Producción y consumo responsable.
- ODS 13. Acción por el clima.
- ODS 14. Vida submarina

En específico la “Meta 3” del objetivo 12 establece: para 2030, reducir a la mitad el desperdicio mundial de alimentos per cápita en la venta al por menor y a nivel de los consumidores, y reducir las pérdidas de alimentos en las cadenas de producción y distribución, incluidas las pérdidas posteriores a las cosechas. Así mismo la FAO desarrolló un marco de acción para operacionalizar y alcanzar esta visión, el cual cuenta a su vez con cinco programas estratégicos, teniendo como ejes transversales de acción: nutrición, cambio climático, género y gobernanza (*Figura 1.1*).

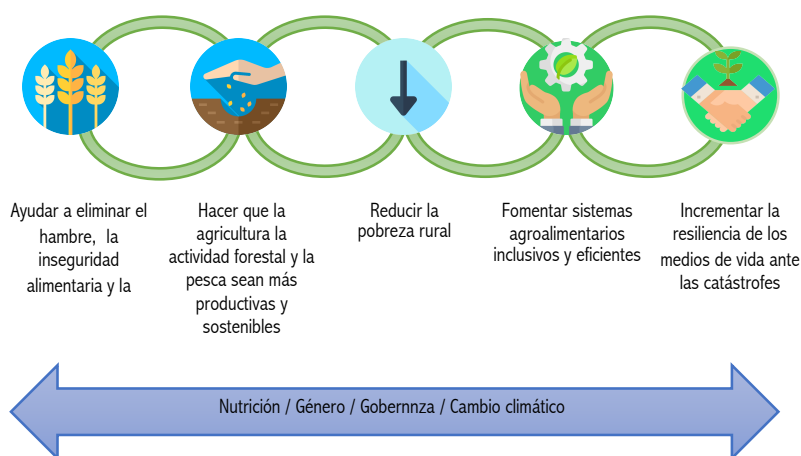


Figura 1.1. Marco estratégico FAO. Elaboración propia con información de (FAO, 2017).

Adicionalmente la energía juega un papel clave en el logro de la seguridad alimentaria y una mejor nutrición (ODS 7, garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos). Los sistemas alimentarios modernos dependen en gran medida de los combustibles fósiles, en ellos se consume alrededor del 30 % de la energía disponible en el mundo y producen más del 20 % de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. (FAO, 2016; Ziesemer, 2007). Para suministrar más alimentos usando menos energía contaminante, los sistemas alimentarios y agrícolas tendrán que separarse gradualmente de la dependencia de los combustibles fósiles y adoptar fuentes de energía renovables que reduzcan los impactos del cambio climático y que al mismo tiempo garanticen la seguridad alimentaria (FAO, 2017).

Se necesitan grandes ajustes en los sistemas alimentarios en general para lograr su sostenibilidad, una de las estrategias que se ha adoptado e incluido dentro de las agendas mundiales es la reducción de las pérdidas y el desperdicio de alimentos, las cuales no solamente mejoraría la eficiencia del sistema alimentario, sino que también disminuiría la presión sobre los recursos naturales y las emisiones de gases de efecto invernadero. Reducir la intensidad de las emisiones a lo largo de toda la cadena alimentaria requiere importantes cambios, desde los tecnológicos, la educación y sensibilización de los consumidores (modificado de FAO, 2017).

1.1.1 PÉRDIDA Y DESPERDICIO DE ALIMENTOS

Conforme a la definición alcanzada durante la Cumbre Mundial de la Alimentación celebrada en 1996 en la FAO, "existe seguridad alimentaria cuando todas las personas tienen en todo momento acceso físico y económico a suficientes alimentos inocuos y nutritivos para satisfacer sus necesidades alimenticias y sus preferencias en cuanto a los alimentos a fin de llevar una vida activa y sana".

Partiendo de la perspectiva de la seguridad alimentaria y la nutrición se define la "pérdidas de alimentos" (PDA) como "la disminución de la masa de alimentos comestibles en la parte de la cadena de suministro que conduce específicamente a los alimentos comestibles para el consumo humano". Las pérdidas de alimentos tienen lugar en las etapas de producción, poscosecha y procesamiento de la cadena de suministro. El "desperdicio de alimentos (DA)" ocurren al final de la cadena alimentaria (venta minorista y consumo final) más relacionado con "el comportamiento de los vendedores y las preferencias de los consumidores" (FAO, 2012; Parfitt et al., 2010) representados en la *Figura 1.2*.

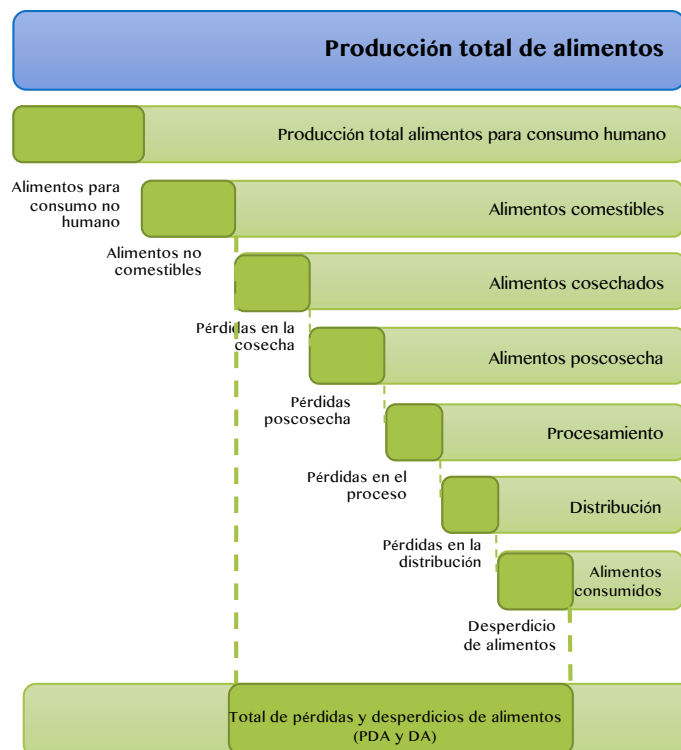


Figura 1.2. Representación esquemática de la definición de pérdidas y desperdicios de alimentos a lo largo de la cadena alimentaria a nivel mundial (HLPE, 2014).

Los análisis actuales coinciden en que una reducción de las PDA haría que los sistemas alimentarios fueran más sostenibles, con resultados económicos, sociales y ambientales positivos. Sin embargo, es necesario actuar con cautela al ser demasiado simplista en la asociación de las PDA con la inseguridad alimentaria mundial (HLPE, 2014; FAO, 2017). Las PDA indican la existencia de un desequilibrio en las dimensiones de disponibilidad y accesibilidad en el sistema alimentario mundial, con repercusiones en:

- La disponibilidad mundial y local de alimentos.
- Acceso debido a la subida de los precios de los alimentos, en el caso de los consumidores, o a pérdidas económicas, en el caso de los actores de las cadenas alimentarias.
- Efecto sobre los recursos naturales de los que depende la producción futura de alimentos, debido a su utilización insostenible.
- Pérdida de calidad y nutrientes.
- Estabilidad, es decir disponer de mecanismos amortiguadores adecuados para hacer frente a la variabilidad de la producción y el consumo

1.1.2 SITUACIÓN Y ALCANCE DE DESPERDICIO DE ALIMENTOS A NIVEL MUNDIAL

De acuerdo con el informe de la FAO (2012), aproximadamente una tercera parte de la masa de los alimentos producidos para el consumo humano se pierde o desperdicia, lo que representa alrededor de 1, (ODEPA, Oficina de Estudios y Política Agraria, 2017) (ONU, Organización Naciones Unidas, 2015)300 millones de toneladas al año suficientes para alimentar a 2,000 millones de personas, estas cifras contrastan con el déficit alimentario el

cual en el año 2017 alcanzó a 821 millones de personas subalimentadas en todo el mundo (FAO, 2017).

Como se muestra en la *Figura 1.3*, la distribución de las PDA a lo largo de la cadena alimentaria varía considerablemente en función de la región y del producto. Las pérdidas y desperdicios pueden ser intencionales o accidentales, sin embargo, ambas llevan a una menor disponibilidad de alimentos para el consumo humano.

En los países de ingresos medios y altos la mayor parte de las PDA tienen lugar en la producción agrícola y el consumo, mientras que, en los países de bajos ingresos, las mermas se producen en las primeras fases de la cadena: poscosecha, procesamiento, distribución y (HLPE, 2014). De lograrse una reducción significativa de pérdidas post-cosecha y desperdicios, la oferta de alimentos podría aumentar alrededor de 25% sin necesidad de una mayor producción, y se reducirían los costos desde la producción y procesamiento hasta la distribución (SAGARPA, 2012).

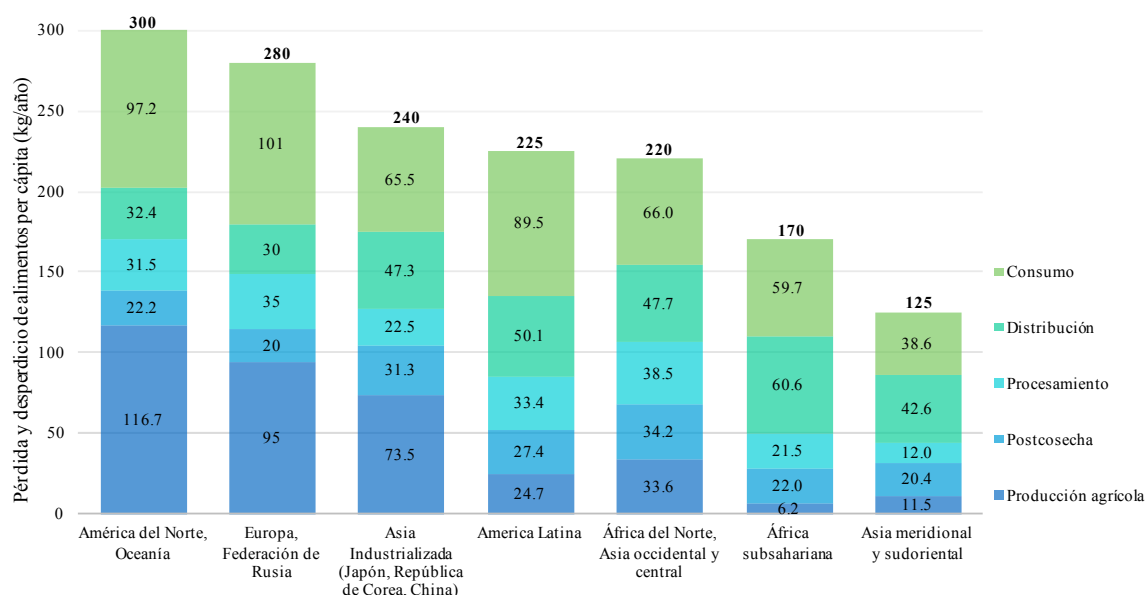


Figura 1.3. PDA y DA per cápita a lo largo de la cadena alimentaria en las distintas regiones del mundo, modificado de HLPE, 2014; FAO, 2012.

De acuerdo a la figura anterior las pérdidas y desperdicio de alimentos *per cápita* para América del Norte y Europa es de 300 y 280 kg al año respectivamente. Esto se debe a la alta sobreproducción alimentaria, a las estrategias de marketing de las grandes industrias que promueven las compras excesivas, a los elevados niveles estéticos del mercado, entre otros. Mientras que en Asia subsahariana y América Latina corresponden a 170 y 225 kg al año respectivamente.

Las causas que originan la pérdida y desperdicio de alimentos son variadas y se presentan en todas las etapas de la cadena, entre las cuales se encuentran los problemas durante la cosecha, recolección, almacenamiento, embalaje, transformación, transporte, o a los mecanismos de comercialización y mercado, oferta y demanda, reglas de etiquetado y caducidad o vencimiento, precios, compras inadecuadas, así como a marcos institucionales y legales existentes o inexistentes (ODEPA, 2017). En la siguiente tabla se resumen algunas de las posibles causas que propician la pérdida y desperdicio de alimentos a lo largo de toda la cadena alimentaria:

Etapa de la cadena alimentaria	Posibles causas de las pérdidas
Producción	Daños mecánicos durante la cosecha. Pérdidas por productos que no se cosechan debido a exigencias de mercado (tamaño, color, forma, aroma). Malos rendimientos debido a la presión por producir frutas y hortalizas en cualquier época del año. Condiciones climáticas desfavorables. Crisis medioambientales y sanitarias. Sobreproducción
Manejo poscosecha y almacenamiento	Deterioro de los productos durante la manipulación, el manejo, almacenamiento y transporte y distribución. Inadecuada refrigeración de frutas y verduras que puede favorecer la aparición de hongos, bacterias, insectos y ácaros; descartes durante la clasificación por demandas estéticas de los consumidores. Inadecuados métodos de conservación.
Procesamiento	Deterioro de productos durante las etapas de procesamiento industrial o doméstico. Productos no apropiados para el procesamiento durante las etapas de lavado, pelado, troceado, deshidratado, congelado y cocción. Interrupción de procesos (cortes de electricidad, agua). Contaminación de productos.
Distribución	Fallas en el sistema de mercado y comercialización por alimentos vencidos, mal etiquetados, mal envasados, daños físicos y químicos sufridos durante el transporte. Falta de coordinación entre la oferta de los productores y la demanda de los consumidores, puede generar excesos de productos aptos para el consumo humano que se desperdician.
Consumo	Compras inadecuadas, ofertas y promociones que impulsan a comprar más cantidad de la necesaria (estrategias de mercadotecnia) Etiquetados confusos, entre la fecha de consumo preferente y la de caducidad. Envases inadecuados en forma y/o tamaño, Productos con un margen de vida útil demasiado estrecho, Falta de venta a granel para determinados productos. Estándares de calidad cuestionables. La publicidad, los patrones culturales y falta de planificación de acuerdo a las necesidades del tamaño de las familias. Escaso valor asociado a la comida.

Tabla 1.1. Posibles causas de la pérdida de alimentos en las diferentes etapas de la cadena alimentaria (Hudson & Messa, 2016).

No obstante, pocas veces se habla dentro de las causas del papel de las grandes multinacionales que controlan los mercados y su aportación a la globalización alimentaria. Han promovido la cultura del consumo de productos procesados y provocando que consumidores, productores e intermediarios se basen en el mecanismo de desperdicio y la producción excesiva, de la eliminación rápida de las reservas para producir nuevos productos en el mercado y no detener el ciclo producción-consumo-eliminación-producción.

Otro aspecto importante en las pérdidas y el desperdicio de alimentos es la variación entre productos y regiones, por ejemplo, los productos agrícolas pueden alcanzar valores que van del 10 al 30% de la cosecha para los cereales y hasta de un 50 a 70% para las frutas en el mundo (Casp, 1998). En la *Figura 1.4*, se muestra la comparación de PDA por grupos de alimentos

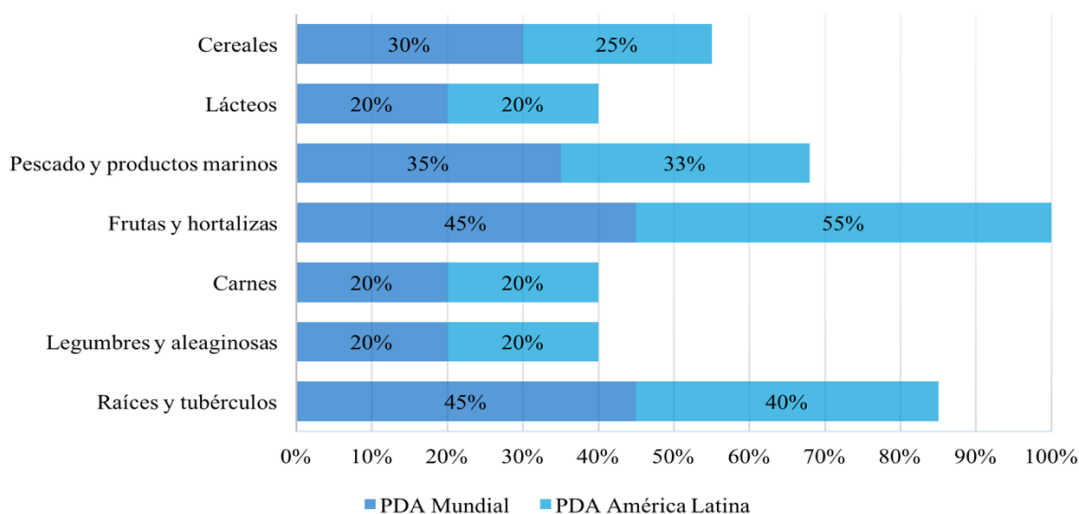


Figura 1.4. PDA por grupo de alimento para el mundo y América Latina. Elaboración propia con información de (FAO, 2012; FAO, 2015).

Los porcentajes de PDA presentados para el mundo en comparación con América Latina, no representa diferencias significativas, este resultado es alarmante considerando el rol que desempeña la región como productor de alimentos.

De acuerdo a lo descrito en la sección 1.1.1, “un sistema alimentario que genera tan elevadas cantidades de desperdicios y, a su vez, no está en condiciones de nutrir a todos los habitantes del planeta, es insostenible. La cantidad de desperdicios alimentarios tiene un caro costo, en términos ecológicos, económicos, éticos y culturales” (Hudson & Messa, 2016). En la siguiente tabla se resumen los impactos e implicaciones que tienen las PDA a nivel global.

Impacto de PDA	Descripción	Comparación
Calórico	Una de cada cuatro calorías cultivadas para alimentar a las personas no es consumida por humanos.	Representan el 15% de los alimentos disponibles en el mundo
Huella de carbono	Las emisiones de GEI se estiman en 4.4 Gton de CO ₂ equivalente.	Representan el 8% de las emisiones antropogénicas. Si las PDA fueran un país, serían el tercer gran emisor después de China y Estados Unidos.
Huella hídrica	La huella global de agua dulce para los PDA fue de 250km ³ .	Equivale a 3.6 veces la huella hídrica del consumo total de Estados Unidos, o el 21 % del agua dulce.
Tierra cultivada	Las PDA representan 1, 400 millones de hectárea de tierra que se utilizaron para producir alimentos no consumidos.	Es equiparable al área superficial de Canadá e India juntos, o el 18% de las tierras cultivables en el mundo.
Energético	El 38% de la energía total consumida por los sistemas alimentarios se utiliza para producir alimentos que en última instancia nunca serán consumidos.	Si el 50% de los desperdicios de alimentos generados cada año en Estados Unidos, se digiriera anaeróbicamente, se generaría electricidad suficiente para alimentar a más de 2.5 millones de hogares durante un año
Económico	A nivel global el costo económico directo del desperdicio alimentario de productos agrícolas (con la exclusión de pescados y crustáceos), a partir solo de los precios del productor, asciende a unos 750 mil millones de dólares.	El equivalente al PIB de Suiza

Tabla 1.2. Impactos de las PDA. Elaboración propia con información de (FAO, 2015; FAO, 2016)

Adicionalmente los impactos que pocas veces son mencionados son el cultural y ético, los cuales reflejan un profundo desequilibrio en la sociedad, así como lo expresaron Hudson & Messa (2016):

Tratar a los alimentos como una simple mercancía significa privarlo de su valor social y cultural. Sin embargo, la producción y el consumo de alimentos gozan de profundas raíces culturales. La comida está indisolublemente vinculada a nuestras culturas, a nuestra historia personal y colectiva, a nuestra identidad. Porta consigo valiosos saberes, desde el campo hasta la cocina, transmitidos durante siglos. (p.9)

1.1.3 SITUACIÓN Y ALCANCE DE DESPERDICIO DE ALIMENTOS EN MÉXICO

En el contexto nacional, la Cruzada Nacional Contra el Hambre que tiene por objetivo “minimizar las pérdidas poscosecha de alimentos durante el almacenamiento, transporte, comercialización y distribución”, y conforme al Índice de Desperdicio de Alimentos (2013), calculó que se desperdicia el 37% de los alimentos que se producen en México es decir 20.4 millones de toneladas de alimentos al año. Alimentos que servirían para evitar el hambre de 7.4 millones de personas² (FAO, 2015). No todos los alimentos se desperdician en la misma proporción en el país, la *Figura 1.5* muestra los diez productos agroalimentarios con mayor porcentaje de desperdicio. Alrededor del 72% de la pérdida y desperdicio de alimentos se da en los primeros eslabones de la cadena productiva, desde la pre-cosecha hasta su distribución; y el 28% sucede en la venta al menudeo y como resultado de los hábitos de los consumidores finales.

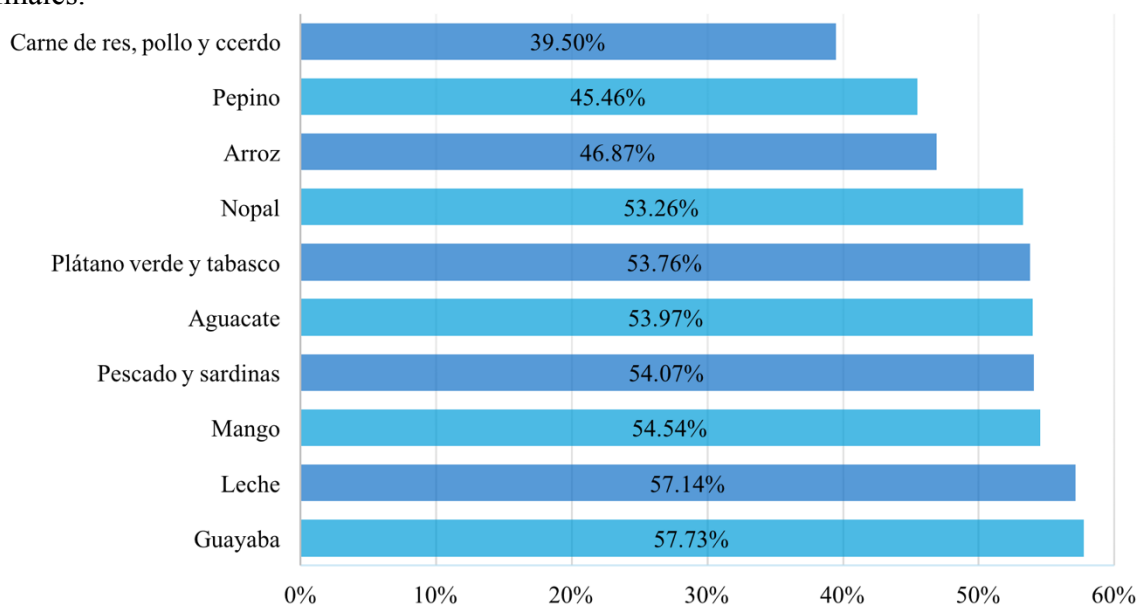


Figura 1.5. Alimentos más desperdiciados en México. Elaboración propia con información de (FAO, 2015).

Dentro de las principales causas asociadas a la PDA en México dentro de la cadena son la falta de certificaciones, la falta de estándares de calidad, administración

² 16 litros de leche, 3.6 kg de papa, 2.6 kg de cebolla, 3.5 kg de carne de cerdo y 4.2 kg de carne de res cada semana.

ineficiente de insumos y productos, sistemas inadecuados de transporte, distribución y almacenaje, la falta de infraestructura adecuada, el uso de empaques y embalajes inadecuados, personal sin la capacitación necesaria, la sobre madurez de los productos, compras excesivas, manejo inadecuado de la mercancía, producto maltratado o en mal estado y mezcla de productos en buen estado con productos no aptos para el consumo (FAO, 2015). Algunos de los impactos que tiene la PDA en México se describen en la *Tabla 1.*

Impacto de PDA en México	Descripción	Comparación
Huella de carbono	Las emisiones de GEI se estiman en 36 millones CO ₂ equivalente.	Representan un volumen similar a las emisiones generadas por 15.7 millones de vehículos anualmente.
Huella hídrica	El agua que se utiliza para la producción de alimentos que no se consumirán asciende a 40 billones de litros.	Es similar al agua utilizada por todos los mexicanos en 2.4 años.

Tabla 1.3. Impactos de las PDA en México. Elaboración propia con información de Banco Mundial (2017).

1.2 IMPORTANCIA DE LA ZARZAMORA, DESCRIPCIÓN Y PROPIEDADES

Hasta aquí, se ha hablado de la sostenibilidad de los sistemas alimentarios y su relación con las pérdidas y desperdicios de alimentos. Como se describió en la sección anterior el porcentaje de desperdicio de frutas hablando del contexto nacional puede llegar hasta el 50% de su volumen. México es el primer productor de zarzamora a nivel internacional, sin embargo, debido a sus características físicas y morfológicas es uno de los alimentos más perecederos presentando un elevado porcentaje de pérdida. Por lo que se seleccionó como caso de estudio debido a su presencia a nivel mundial, así como su alto valor nutritivo, por lo que en el presente capítulo se hace una descripción de su valor e importancia.

1.2.1 DESCRIPCIÓN

La zarzamora pertenece al género *Rubus* de la familia de las Rosáceas. El género *Rubus* comprende alrededor de 700 especies nativas de Asia, Europa y Norte América. Su nombre científico deriva del latín “ruber” (rojo), por el color de sus frutos. La zarzamora ha sido usada en Europa por 2,000 años o más, como alimento, usos medicinales principalmente. Es una planta invasora de crecimiento rápido que también puede multiplicarse vegetativamente generando raíces desde sus ramas. La fruta comestible se asemeja a una baya carnosa llamada mora o zarzamora, sin embargo, desde el punto de vista botánico no es una baya, sino que está formada por muchas pequeñas drupas arracimadas y unidas entre sí, de color rojo tornándose negro al madurar. Es popular en las artes culinarias para la preparación de postres, mermeladas y jaleas y a veces vinos (Rodríguez, 2008).

Las variedades que actualmente se cultivan comercialmente se han originado de las cruces entre varias especies que presentan características morfológicas diferentes. En general, hay tres clasificaciones de moras, basadas en la arquitectura de caña: erectas, semierectas o rastreras (Strik & Finn, 2012). Otra clasificación es otorgada por la presencia o ausencia de espinas, característica otorgada por la hibridación. De la combinación de estas dos características morfológicas se han obtenido numerosas variedades que se agruparían en

la siguiente clasificación: erectas espinosas, semierectas sin espinas, trepadora del Oeste, dewberries o híbrido entre zarzamoras y frambuesas. Las moras que se arrastran y semierectas son frutos bienales, mientras que las moras erectas pueden ser frutos bienales o anuales. La variedad "Tupy" es el cultivar³ más común en México, como un tipo erecto, a pesar de que su origen incluye los tipos erecto y rastrero. Los híbridos entre la frambuesa roja y la mora que se cultivan comercialmente (por ejemplo, "Boysen", "Logan") se consideran tipos de mora rastrera debido a su hábito de crecimiento (Gallardo & Cuadra, 1999).

La zarzamora es una fruta de interés debido a su alto contenido de antocianinas y elagitaninos (ET), así como otros compuestos fenólicos que contribuyen a su alta capacidad antioxidante. Existen estudios que documentan la alta actividad antioxidante de las zarzamoras con base en su capacidad de absorción de radicales de oxígeno (en español: CARO; en inglés: oxygen radical absorbance capacity: ORAC) en comparación con otras frutas (Cho et al., 2004). De hecho, las cualidades medicinales de las zarzamoras se conocen desde el siglo XVI en Europa, donde se utilizaron para tratar las infecciones de la boca y los ojos (Dai et al., 2007).

Los estudios epidemiológicos y clínicos sugieren que el consumo de antocianinas y otros flavonoides que se encuentran en la mayoría de las frutas y vegetales puede disminuir el riesgo de obesidad, enfermedad coronaria, afecciones degenerativas y varios tipos de cáncer. Estos beneficios para la salud y los mecanismos por los cuales las antocianinas les confieren han sido explorados in vitro y en modelos animales (Jensen et al., 2008).

1.2.2 COMPOSICIÓN DE NUTRIENTES EN LA ZARZAMORA

La composición química de la zarzamora varía dependiendo de las condiciones de crecimiento, el estado de madurez y las condiciones de cosecha y almacenamiento. Además de valiosos compuestos polifenólicos, las moras contienen carbohidratos y varias vitaminas y minerales esenciales, como α -tocoferol, vitamina A, calcio, potasio, magnesio, *Tabla 1.2* (Talcott, 2007). Los azúcares principales en las moras son glucosa, fructosa y sacarosa, y sus relaciones difieren entre los cultivares. Los niveles de glucosa, fructosa, azúcares totales y sólidos solubles totales aumentan notablemente a medida que la fruta madura desde el rojo claro hasta el púrpura oscuro azulado (Wrolstad et al., 1980).

Las moras contienen ácido málico como ácido orgánico primario, aunque se han detectado diferentes ácidos, incluido ácido ascórbico en la fruta. Estos ácidos orgánicos en las moras son importantes para estabilizar las antocianinas, el ácido ascórbico y extender la vida útil de las bayas frescas y procesadas (Kafkas et al., 2006). El equilibrio en proporción de ácidos orgánicos y fenólicos en las bayas se evalúa el índice general de calidad de la fruta, mientras que el pH bajo se considera un indicador de mala calidad. Otro índice de calidad importante para las bayas es la relación entre los sólidos solubles totales y la acidez total valorable. Esta proporción aumenta en las moras a medida que la fruta madura desde el morado hasta las etapas moradas azuladas oscuras, lo que refleja el gran aumento de los azúcares y la disminución de los ácidos orgánicos (Talcott, 2007).

³ Neologismo artificial originado de la lengua inglesa, por la aglutinación de parte de las expresiones cultivated variety - culti-var = cultivar. El clásico Diccionario Webster (1965), define cultivar como una variedad o raza que se originó por medio de técnicas agronómicas.

Carbohidratos y otros		Contenido de vitaminas		Contenido de minerales	
Agua (g)	88.20	Ácido ascórbico total (mg)	21.00	Calcio (mg)	29.00
Energía (kcal)	43.00	Tiamina (mg)	0.02	Hierro (mg)	0.62
Proteínas (g)	1.39	Riboflavina (mg)	0.03	Magnesio (mg)	20.00
Lípidos totales (g)	0.49	Niacina (mg)	0.65	Fósforo (mg)	22.00
Cenizas (g)	0.37	Ácido pantoténico (mg)	0.28	Potasio (mg)	162.00
Carbohidratos (g)	9.61	Vitamina B6 (mg)	0.03	Sodio (mg)	1.00
Fibra total (g)	5.30	Folato total (µg)	25.00	Zinc (mg)	0.53
Azúcares totales (g)	4.88	Vitamina B12 (µg)	ND	Cobre (mg)	0.17
Sacarosa (g)	0.07	Vitamina A (UI)	214.00	Manganeso (mg)	0.65
Glucosa (g)	2.31	α – tocoferol (mg)	1.17	Selenio (mg)	0.40
Fructuosa (g)	2.40	β – tocoferol (mg)	0.04		
Maltosa (g)	0.07	γ – tocoferol (mg)	1.34		
Galactosa (g)	0.03	Δ – tocoferol (mg)	0.90		
Almidón (g)	ND	Vitamina K (µg)	19.80		

^aND, no disponible

Tabla 1.2. Composición química de las zarzamoros del Departamento de Agricultura de EE.UU. Base de Datos de Nutrientes (2010).

1.2.2.1 COMPUESTOS FENÓLICOS

Las moras son fuente de polifenoles (*Figura 1.6*). que incluyen antocianinas, elagitaninos, flavonoles, flavan-3-oles y procianidinas. Las bayas también contienen niveles apreciables de ácidos fenólicos y bajos niveles de lignanos. En la *Tabla 1.3* se muestran los valores de fenoles totales y antocianinas que se han reportado en diferentes estudios y presentado por Kaume et al., 2012. Los factores que afectan los niveles de compuestos fenólicos totales en las moras son la genética y la madurez de la fruta, es decir, los valores fluctúan a medida que la fruta madura de una etapa rojo claro, pasando a él púrpura azul y finalmente el púrpura azulado oscuro (Acosta-Montoya et al., 2010).

Fenoles totales (mg GAE ^a / 100g bh ^b)	Antocianinas totales (mg / 100g bh) ^b	No. De cultivares evaluados
114 - 178	31 – 118 ^c	4
221 – 342	38 – 72 ^c	5
418 – 555	111 – 123 ^c	2
682 – 1056	131- 256 ^c	11
822 – 844	154 – 225 ^d	2
ND ^e	58 – 219 ^c	12

^aCalculado como ácido gálico equivalente, ^bbh, base húmeda. ^c Calculado como cianidin-3-glucósido equivalente. ^d Calculado como cianidin-3-galactosa equivalente. ^eND, no disponible.

Tabla 1.3. Valores de fenoles totales y antocianinas totales de la zarzamora en diferentes estudios y presentados por Kaume et al., 2012; Ch, et al., 2004;Gu et al., 2004.

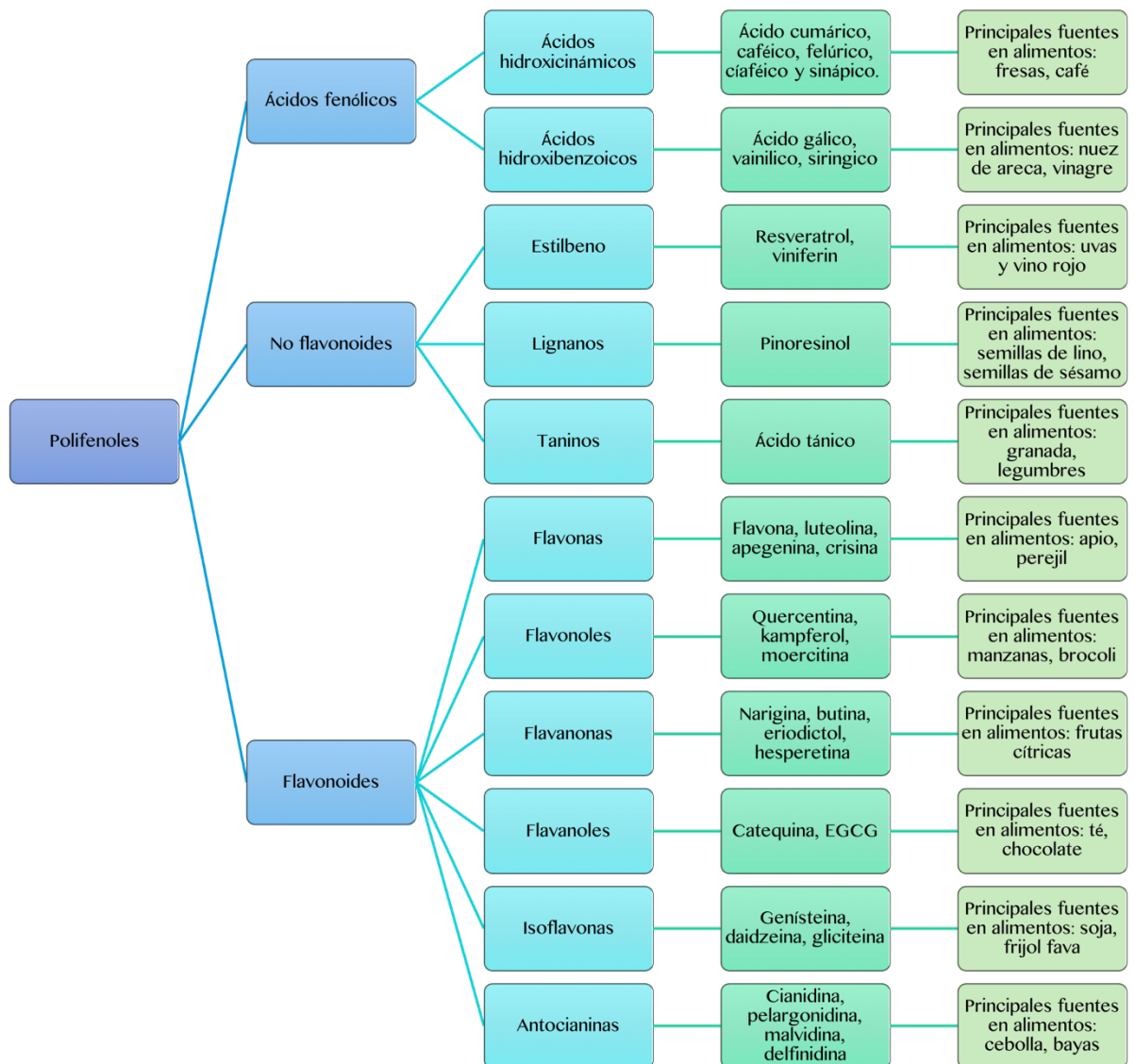


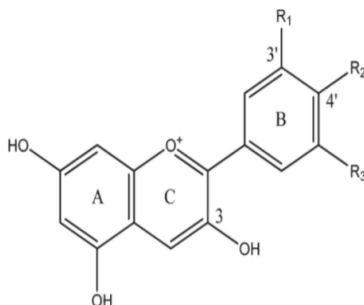
Figura 1.6. Clasificación de los compuestos fenólicos. Modificado de Basheer and Kerem, 2014, Téllez 2010

1.2.2.2 ANTOCIANINAS

Las antocianinas se acumulan en mayor concentración, en flores y frutas, pero también están presentes en hojas, tallos y granos. A diferencia de otras frutas *Rubus* de color oscuro (frambuesa negra y frambuesa roja), los pigmentos de zarzamora son principalmente antocianinas basadas en cianidina (Lee et al., 2012). Aunque el color negro característico de la zarzamora fresca es en realidad su concentración y tipos de antocianinas (pigmentos rojos naturales). El color de la antocianina depende del pH, por lo tanto, un ligero cambio en el pH hace que la antocianina roja dentro de las moras cambie de un color morado oscuro a negro (Lee, 2017).

Las antocianinas son flavonoides por clasificación y se encuentran predominantemente en bayas y uvas rojas. Son antocianinas glucosiladas con uno o más

restos de azúcar en la posición C3 de la estructura del flavan (*Figura 1.7.7*). Aproximadamente el 94% de las antocianinas de mora se encuentran en forma no acilada, y el 90% de estos existen como monoglucósidos, mientras que 10% se encuentran como diglicósidos. Las antocianinas de la zarzamora son principalmente derivados de cianidina con restos de glucosa, rutinosa, xilosa y arabinosa unidos a C3 (Kaume et al., 2012).



Antocianidina	R ₁	R ₂	R ₃
Cianidina	OH	OH	H
Pelargonidina	H	OH	H
Malvidina	OCH ₃	OH	OCH ₃

Figura 1.7. Estructuras químicas de antocianidinas de la zarzamora.

Las principales antocianinas que se han reportado en la zarzamora (*Tabla 1.5*) son cianidina-glucósido, cianidina-rutinósido, cianidina-xilósido, cianidin-malonilglucósido (Conner et al., 2005; Fan-Chiang & Wrolstad, 2005).

Antocianinas	Flavonoides	Elagitaninos
cianidina 3-galactósido	quercetina 3-galactósido	sanguiin H-6
cianidina 3-glucósido	quercetina 3-glucósido	lambertianin C
cianidina 3-arabinósido	quercetina 3-rutinósido	pedunculagin
cianidina 3-xilosa	quercetina 3-xilosil-glucurónido	lambertianin D
malvidina 3-arabinósido	quercetina 3-glucosilpetosida	galloyl-bis-HHDP glucosa
perlargonidin 3-glucósido	quercetina 3- glucurónido	isómero sanguiin H-10 (2)
cianidina 3-rutinósido	kaempferol 3-glucurónido	sanguiin H-6 menos fracción de ácido gálico lambertianina C menos fracción de ácido elágico (4) galloyl-HHDP glucosa
cianidina 3-soforosa	kaempferol 3-glucósido	sanguiin H-2
cianidina 3-glucosilrutinosida	kaempferol 3-galactósido	sanguinina H-6 más resto de ácido gálico castalagin / vescalagin
cianidina 3- (3-malonil) glucósido	kaempferol 3-xilosil-glucurónido	ácido elágico
cianidina 3- (6-malonil) glucósido	kaempferol 3-glucurónido	conjugado de pentosa ácida metil elágica (2)
	quercetina 3-O- [6- (3-hidroxi-3-metil-glutaroil) -β-D-galactósido miricetina	
	quercetina 3-metil hexósido	
	quercetina 3-oxalilpentosida	

Tabla 1.4. Resumen de antocianinas, flavonoides, y elagitaninos identificados en la zarzamora (Kaume et al., 2012).

1.2.2.3 FLAVONOIDES

Las zarzamoras contienen cantidades apreciables de flavonoides que se encuentran exclusivamente en la parte carnosa de la drupa (Kaume et al., 2012), y se presentan principalmente en forma glucosilada. Cumplen diversas funciones en las plantas, tales como la asimilación de nutrientes, la síntesis proteica, la actividad enzimática, la fotosíntesis, la alelopatía y la protección contra los patógenos y radiación UV. Asimismo, son considerados como benéficos a la salud humana, debido a que se ha encontrado que los flavonoides ayudan a reducir las enfermedades cardíacas, cerebrovasculares y disminución de la tasa de mortalidad por cáncer.

La estructura de los flavonoles implica un doble enlace en C2 y C3, un grupo hidroxilo en C3 y un grupo cetona en C4 del anillo C del núcleo flavan (*Figura 1.8*). Quercetina, myricetina, y kaempferol son los flavonoles más comúnmente identificados en las bayas; su principal diferencia es el número y la posición de los grupos OH⁻ en C3 y C5. Los azúcares comúnmente unidos en la posición C3 son glucosa y galactosa, pero también se pueden encontrar arabinosa, ramnosa, rutinosa y xilosa. (Seeram et al., 2006)

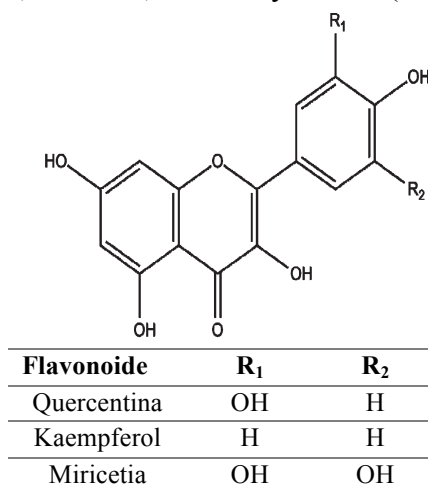


Figura 1.8. Estructuras químicas de flavonoides de la zarzamora.

Las zarzamoras tienen un perfil de flavonoides complejo debido a la presencia de nueve quercetinas y tres derivados de kaempferol, así como dos compuestos acilados derivados de quercetina (*Tabla 1.5*). Se ha reportado que los niveles de flavonoides totales en las zarzamoras disminuyen a medida que la fruta madura de rojo claro (30 mg / 100 g peso fresco) a púrpura oscuro azulado (14 mg / 100 g peso fresco) (Acosta-Montoya et al., 2010).

1.2.3 LA ZARZAMORA EN EL CONTEXTO INTERNACIONAL

La evolución reciente del mercado mundial de las *berries*⁴ o bayas muestra un incremento en la producción y en el comercio internacional de magnitud considerable. Uno de los factores que ha impulsado este mercado es la demanda mundial y los precios atractivos para los productores, que hacen rentable la inversión en tecnología y mejoras en la calidad (FIRA,

⁴ Los frutos denominados *berries*, también llamadas frutas finas, frutillas o frutos del bosque, se caracterizan por su tamaño pequeño y por sus colores brillantes. Este grupo incluye a las fresas, los arándanos, las zarzamoras y las moras azules (cada una con subvariedades).

2016). Existen escasos datos actuales sobre la producción mundial específica de la zarzamora, sin embargo, existe una clasificación dentro de los datos estadísticos de producción agrícola de la FAO donde se engloba a diferentes especies de bayas, el término de clasificación es *Bayas nep*, incluye entre otras: zarzamora, zarza-frambuesa, mora blanca, mora roja y arándanos. La producción mundial de bayas nep en el año agrícola 2016 se estimó en 984,116 toneladas y un área cosechada de 123,049 ha (FAO, 2017), lo que representó un aumento del 14.2 % anual con respecto al año anterior. Las principales regiones de producción de bayas nep son de acuerdo a la Figura 1.9.

En la Figura 1.10 se puede observar el desglose de los diez principales países productores de *bayas nep*. México aportó el 25% del total de la producción correspondiente a 248,512 ton, Vietnam aportó el 14% con 135,425 ton, Papúa Nueva Guinea e Italia corresponden al 11% con una producción de 108,810 y 107,479 ton todos para el año agrícola 2016. En general las bayas han venido registrando un incremento sostenido del cultivo

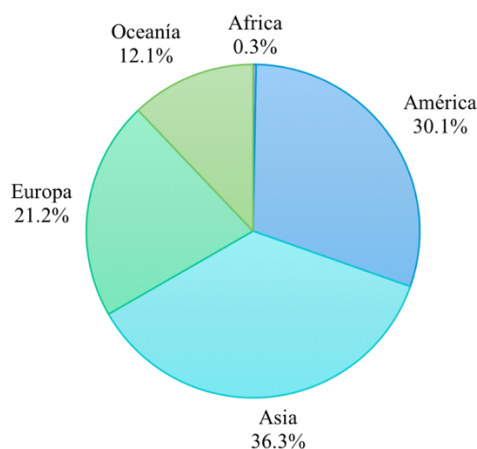


Figura 1.9. Proporción de producción de Bayas nep por región. Elaboración propia con datos de FAO (2017).

Por su parte la zarzamora ha presentado una rentabilidad superior siendo una opción para productores y agroindustriales, al generar un rápido retorno de la inversión. El interés por el cultivo de las especies de zarzamora ha crecido sustancialmente en los últimos años, específicamente por las especies comercializables para su consumo en fresco, autores como Merchand (2013) lo atribuyen a factores como: 1) La elevada rentabilidad del cultivo, 2) Rápido retorno de inversión, 3) El uso intensivo de mano de obra, 4) Versatilidad de los frutos para su consumo y 5) Grandes posibilidades de exportación del producto (Morales & Castillo, 2017).

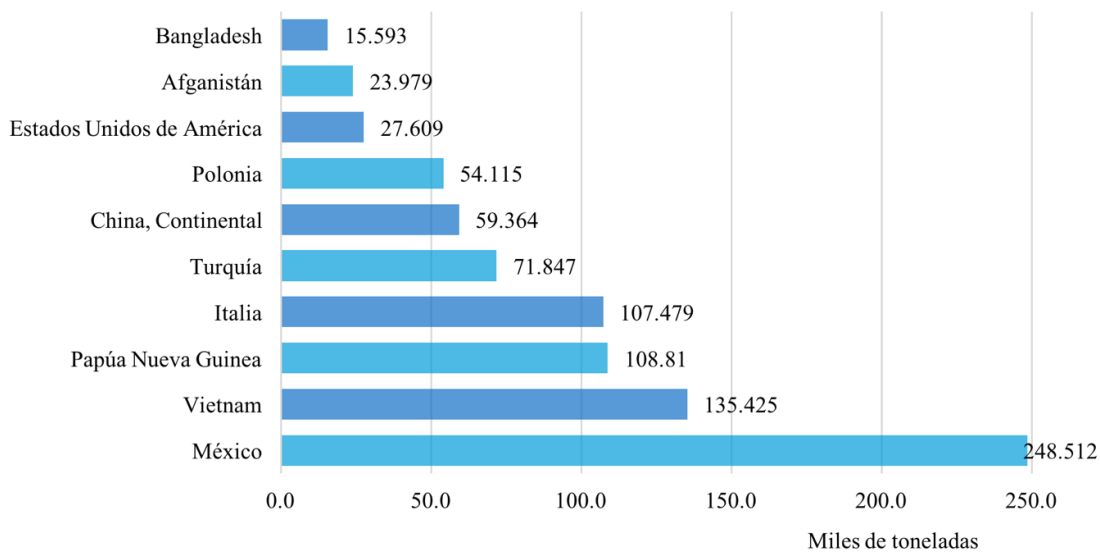


Figura 1.10. Los diez países principales productores de bayas nep. Elaboración propia con dato de FAO (2017).

1.2.4 LA ZARZAMORA EN EL CONTEXTO NACIONAL

La zarzamora es un cultivo relativamente nuevo en México, introducido a finales de la década de 1990 para producción como monocultivo. Sin embargo, en pocos años México ha tomado la delantera en cuanto a la producción de zarzamora de contratemporada⁵ en los últimos años. Para el año agrícola 2017 logró una producción de 270,399 toneladas, 12,800 ha sembradas y un valor de producción de \$ 10,558,069.37 pesos, de las cuales el 96% de la producción corresponde al estado de Michoacán (SIAP, 2017). La producción y exportación de zarzamora en Michoacán se concentra en una región conocida como el Valle de Los Reyes, dónde se genera el 50%, con una producción anual es decir 131,465 toneladas (para el mismo año agrícola).

Históricamente la economía del Valle de Los Reyes estaba sujeta al cultivo de azúcar, pero a partir de principios del año 2000 diversificaron su desarrollo y comprometieron parte de su futuro en el cultivo de la zarzamora (Rodríguez, 2008). Bajo esta reconversión se identifican diversidad de acciones individuales y colectivas donde se fueron construyendo ventajas competitivas, entre las que se incluyen a la especialización regional, eficiente articulación comercial, así como el desarrollo de servicios relacionados y de soporte que contribuyeron a la reducción de costos y agregar valor a toda la Cadena (FIRA, 2016).

De acuerdo con la *Tabla 1.5* los cultivos que impulsan la competitividad de Michoacán (año agrícola 2016) es el aguacate con la primera posición en cuanto al valor de producción de 23,065.24 millones de pesos y una superficie sembrada de 141,248.83 ha. Seguido de la zarzamora con un valor de producción de 8,444.83 millones de pesos, equivalentes al 13% del valor total de la producción del estado de Michoacán y con una

⁵ Contratemporada significa que son producidas fuera de la temporada normal de crecimiento. En Estados Unidos y Europa la producción de bayas es durante los meses de verano, por lo que la producción y oferta fuera de esta época se considera de contratemporada.

superficie de 11,726 ha. Es importante resaltar la rentabilidad de la zarzamora mayor que la del aguacate, 19.19 ton/ha; mientras que la del aguacate corresponde a 10.82 ton/ha (SIAP, 2017). Esto se debe a que la superficie requerida para la zarzamora representa únicamente el 9% de la extensión de superficie requerida para el cultivo del aguacate.

Cultivo	Sup. Sembrada	Sup. Cosechada	Producción	Valor Producción
	(Ha)	(Ha)	(Ton)	(Millones de Pesos)
Aguacate	141,248.83	129,985.83	1,407,439.56	23,065.24
Zarzamora	11,839.25	11,726.25	225,077.53	8,444.83
Maíz grano	471,892.00	465,179.00	1,815,124.20	6,305.01
Fresa	4,683.63	4,683.63	244,989.57	4,136.38
Limón	47,080.00	38,299.50	607,214.54	2,567.04

Tabla 1.5. Principal Producción Agrícola en Michoacán, año agrícola 2016. Elaboración propia con datos del SIAP, 2017 (pesos corrientes)

La base de la competitividad, y por lo consiguiente de la rentabilidad de la producción de *berries* en Michoacán, está sustentada en la capacidad de producir y explotar durante la ventana de invierno cuando otros países exportadores no cuentan con producto adecuado para el mercado internacional (SISPROA, 2015).

Los volúmenes de producción nacional, para el estado de Michoacán y para el municipio de Los Reyes están reflejados en la *Figura 1.11*. En 2016 y 2017 la producción de zarzamora se duplicó con respecto al periodo del 2010-2014. México siendo el referente en la producción de la zarzamora aporta una cuarta parte de volumen cosechado de la frutilla. En el comercio exterior 2010-2017 la creciente demanda internacional de *berries* ha incentivado la producción mexicana de zarzamora para su venta externa. En 2017, los volúmenes exportados exceden a los flujos del año previo en 1,720 toneladas y 5.8 millones de dólares. Cada vez son más los destinos de venta internacional de la frutilla mexicana; en 2012 se exportó a 25 países, y en 2017 se amplió hasta 31. Estados Unidos adquirió 65,248 toneladas; cantidad que representó 93.1% del total exportado (SIAP, 2018).

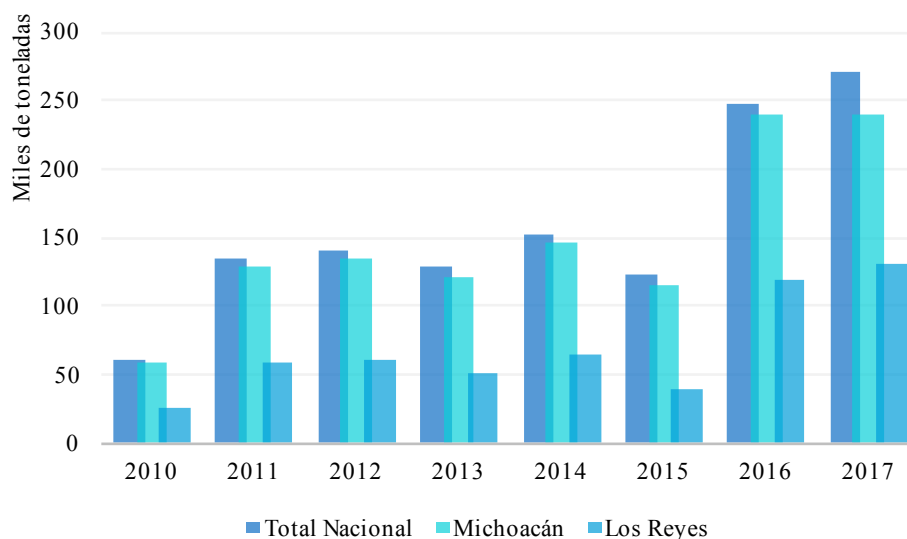


Figura 1.11. Volumen de producción total nacional, estatal (Michoacán) y municipal (Los Reyes, Michoacán). Elaboración propia con datos de SIAP (2017)

1.2.5 LA CADENA DE VALOR DE LA ZARZAMORA

La fragilidad de la zarzamora (y en general de las bayas) ha condicionado la estructuración de su Cadena de Valor. Son frutas consideradas no climatéricas, lo que significa que no tienen la capacidad de madurar después de la cosecha, por lo que deben de ser cosechadas junto en el momento en el que han adquirido su madurez de consumo y características de color, sabor, cantidad de azúcar y sólidos (Rodríguez, 2008).

La zarzamora es uno de los productos frutícolas más sensibles y perecederos que existen. No toleran la exposición al sol después de su cosecha, se deshidratan muy rápidamente si se almacenan en condiciones no adecuadas, por su alta humedad (80 a 90% base húmeda, %H_{bh}) son susceptibles a daños mecánicos y con esto al ataque de hongos. Por tal motivo la cadena de frío es el elemento aglutinador entre los diferentes agentes económicos que intervienen en la cadena de valor, Figura 1.1.

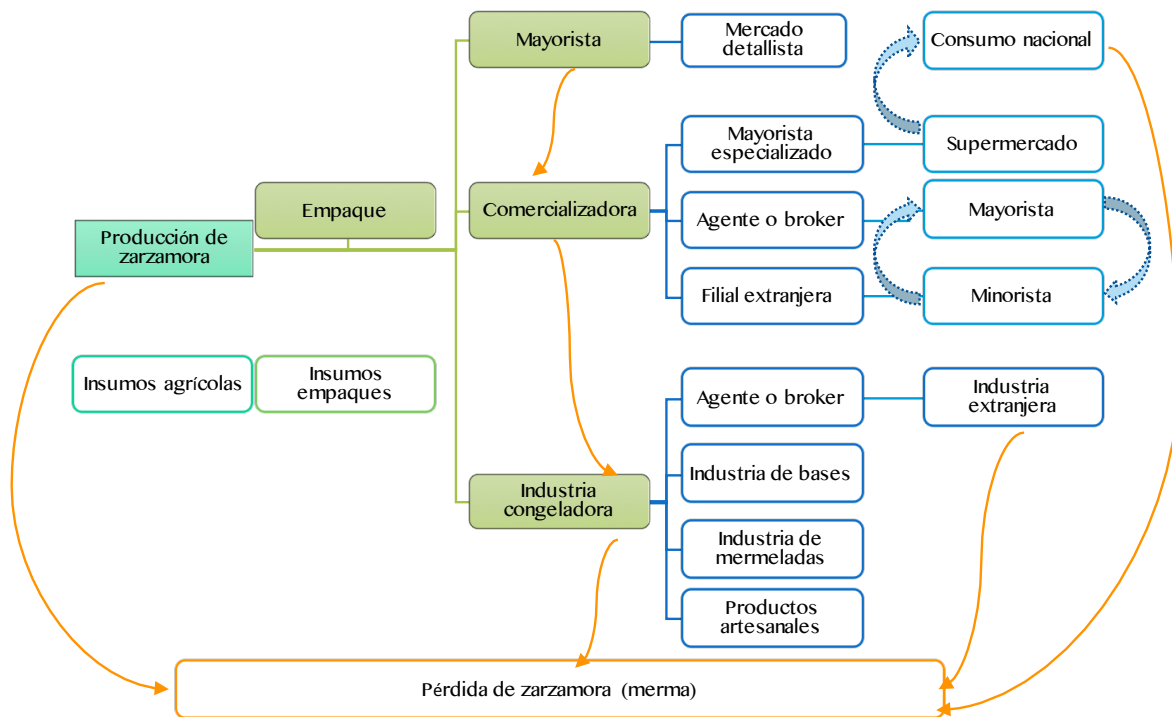


Figura 1.12. Cadena de valor de la zarzamora y sus pérdidas. Elaboración propia adaptado de Rodríguez (2008).

El grado de especialización de la infraestructura, logística y los altos costos asociados a las de las cadenas de suministro en frío y el transporte, permiten casi exclusivamente la participación de grandes comercializadoras (importadoras mayoristas especializados de *brokers*⁶ o de grandes cadenas de supermercados en su mayoría de Estados Unidos, que son quienes rigen los canales comerciales). Su comercialización en fresco (generalmente destinada a mercado nacional) es casi nula, debido a la falta de infraestructura

⁶ Individuo o institución que organiza las transacciones entre un comprador y un vendedor en ciertos sectores a cambio de una comisión cuando se ejecute la operación.

en frío se obliga a que la fruta tenga que venderse el mismo día. Siendo un canal altamente ineficiente (Rodríguez, 2008).

Desde la producción primaria hasta finalizar la cadena de valor tanto en frío como fresco, existen altos niveles de mermas de la fruta. Esto se debe a que la alta sensibilidad de la fruta aunado a que en México las exigencias relativas a calidad comercial y fitosanitaria son de responsabilidad exclusiva de la empresa privada, ya que no existe control de calidad obligatorio, ni tampoco existe aún una norma oficial de calidad. De hecho, las empresas exportadoras emplean directamente las normas o estándares vigentes en los países compradores, y han desarrollado algunas pautas de calidad propias (FUMIAT, 2005). Así mismo, es inexistente el desarrollo de nuevas tecnologías para el manejo poscosecha e incrementar la vida de anaquel de las frutas.

La zarzamora representa un mercado potencial ya que las frutillas presentan condiciones nutricionales apropiadas para el mercado de alimentos de la salud, así como para alimentos gourmet; el potencial en el consumo procesado sigue siendo un área de oportunidad ya que solventaría el reto de la fragilidad y vida de anaquel del producto, debido a que actualmente se requieren canales de comercialización con un alto grado de tecnología para su conservación en fresco (SISPROA, 2015).

1.2.6 SITUACIÓN DE PÉRDIDA Y MERMA DE LA ZARZAMORA.

Como es mencionado en el apartado 1.1.3 y 1.1.4 la situación de pérdida de alimentos a nivel internacional y nacional es crítica. Para el caso de las frutas y de acuerdo al PDA se desperdicia más del 50% de la producción (FAO, 2012). En el caso de la zarzamora son diversos los factores que propician su pérdida y merma, dentro de los cuales se encuentran:

- Alta sensibilidad.
- Alto contenido de humedad.
- Problemas fitosanitarios.
- Falta de inocuidad.
- Falta de adopción de buenas prácticas en el manejo cosecha y poscosecha: recomendaciones y medidas preventivas desde el corte mismo de la zarzamora, considerando los factores de recolección, selección, clasificación, pesado, empaque y transporte.
- Exigencias de los estándares internacionales.
- Rechazos debido a daños (mecánicos o ataques de hongos) provocados por el mal manejo de la frutilla.
- Falta de investigación y desarrollo en tecnologías poscosecha.
- Cadena de valor casi exclusivamente del producto fresco.
- Poca o nula participación de la industria de transformación y procesamiento.

Existen muy pocas investigaciones al respecto de las pérdidas de zarzamora, sin embargo, se han estimado pérdidas de hasta el 30% de la producción obtenida (SISPROA, 2015). Es importante señalar que actualmente no se está realizando ninguna acción encaminada a mitigar la problemática.

1.3 SECADO

Como se describió en las secciones 1.1 y 1.2 la pérdida de alimentos y la situación de mermas de la zarzamora es una problemática apremiante, bajo este contexto se introduce al secado como método de conservación de alimentos.

El secado es uno de los métodos más antiguos en la preservación de alimentos, es una operación unitaria bien estudiada en ingeniería de procesos para reducir el contenido de humedad en la matriz de alimentos a un nivel que sea seguro para almacenamiento y transporte, ralentizar o inactivar la actividad microbiana y el deterioro asociado de la calidad del producto. Los microorganismos que provocan la descomposición de los alimentos no pueden crecer y multiplicarse en ausencia de agua. Además, muchas de las enzimas que causan los cambios químicos en alimentos y otros materiales biológicos no pueden funcionar sin agua. Los microorganismos dejan de ser activos cuando el contenido de agua se reduce por debajo del 10% en peso. Sin embargo, generalmente es necesario reducir este contenido de humedad por debajo del 5% en peso en los alimentos, para preservar su sabor y su valor nutritivo. Los alimentos secos pueden almacenarse durante periodos largos de un año o más (Geankoplis, 1998).

El secado implica la eliminación del agua de una materia prima húmeda induciendo cambios de fase de agua de sólido o líquido en una fase de vapor mediante la aplicación de calor (Betoret et al., 2016).

Los principales objetivos del proceso de secado son los siguientes:

- Reducir el deterioro de los alimentos.
- Disponibilidad de los productos deshidratados durante todas las temporadas del año.
- Incrementar la vida de anaquel.
- Uso prolongado del producto evitando su descomposición debido a ataques microbianos.
- El secado reducirá el peso y facilitará el transporte.
- El producto seco de alta calidad tendrá un buen valor de mercado y por lo tanto tendrá un mayor beneficio para los productores.

Como se mencionó el principal objetivo de la deshidratación de los alimentos es eliminar el agua a un nivel en el que se minimice el deterioro microbiano, sin embargo, durante el secado, los materiales alimenticios sufren cambios físicos, químicos y biológicos que pueden afectar algunos atributos naturales como la textura, el color, el sabor y el valor nutricional. Por lo tanto, un segundo objetivo principal del secado debe ser producir alimentos secos de buena calidad desde un punto de vista nutricional y organoléptico (Rotstein et al., 1997).

Los secadores se pueden clasificar en función del método de suministro de calor, el tipo de equipo de secado, el método de transporte del producto, la naturaleza y el estado de la alimentación, las condiciones de operación y el tiempo de residencia. Debido a la gran variedad de características del material y la diversidad de alimentos secos, se utilizan muchos tipos de secadores en la industria alimentaria. Los secadores típicos y las aplicaciones representativas en el procesamiento de alimentos se resumen en la *Tabla 1.6*.

Tipo de secador	Aplicaciones
Charolas, bandejas o armario	Fruta, verduras, carnes, confitería
Túnel	Frutas, verduras
Banda transportadora	Granos, verduras, frutas, cereales, nueces
Rotatorio	Semillas, granos, almidón, cristales de azúcar
Neumático o flash	Almidón, pulpas, diversos cultivos, gránulos, polvos
Lecho fluidizado	Verduras, gránulos, granos, guisantes
Aspersión	Leche, crema, café, té, jugos, huevos, extractos, jarabes
Tambor	Sopas, cereales, cereales para bebés, jugos, purés
Alfombra de espuma	Fruta, jugos, purés
Congelamiento	Hojuelas, jugos, carne, camarón, café, vegetales, extractos

Tabla 1.6. Aplicaciones para deshidratadores seleccionados (Rotstein et al., 1997).

Una alternativa a los problemas de preservación de productos agrícolas, es el uso de secadores solares, de los cuales existe una gran variedad de diseños, y materiales de acuerdo a la aplicación a la que se vayan a destinar.

1.3.1 SECADO SOLAR

El secado solar al aire libre se ha utilizado desde tiempos inmemoriales para secar plantas, semillas, frutas, carne, pescado, madera y otros productos forestales agrícolas. Sin embargo, pese a que es un método económico y simple sus limitaciones son bien conocidas. Entre estos se encuentran el gran requerimiento de área, la falta de capacidad para controlar el proceso de secado presentando un secado heterogéneo, existe la posible degradación y deterioros debida a reacciones bioquímicas o microbiológicas, la infestación de insectos, polvo, bacterias, etc. El tiempo de secado requerido para un producto dado puede ser bastante largo y provocar pérdidas adicionales (Lik et al., 2012; Desai et al., 2009).

Para beneficiarse de la fuente de energía gratuita y renovable proporcionada por el sol, en los últimos años se han desarrollado diferentes equipos para el secado solar, principalmente para la preservación de los productos agrícolas y forestales. El secado solar de productos agrícolas en estructuras cerradas por convección forzada es una forma atractiva de reducir las pérdidas poscosecha y la baja calidad de los productos secos asociados con los métodos tradicionales de secado al sol abierto (Jain & Tiwari, 2003).

Otro de los métodos convencionales de secado en la industria de alimentos son aquellos que utilizan combustibles fósiles para el suministro de gas o electricidad. Al utilizar gas o diésel para el secado, se incurre en la contaminación del producto por azufre y químicos, en los que existe desprendimiento de dióxido de carbono que en algunos casos afecta el sabor, color, olor y propicia la pérdida de nutrientes (Desai et al., 2009).

En el caso de energía eléctrica es importante considerar que, en muchos lugares rurales en la mayoría de los países en desarrollo, la electricidad conectada a la red y los suministros de otras fuentes de energía no renovables no están disponibles, no son confiables o son demasiado costosos. En tales condiciones, los secadores solares parecen cada vez más atractivos como propuestas comerciales (Mekhilef et al., 2011; Zhang et al., 2012).

1.3.2 TIPOS DE SECADORES SOLARES

Diferentes tipos de secadores solares están disponibles en varios tamaños y diseños según los requisitos. En general, los secadores solares se clasifican en función del modo de movimiento

del aire, las contribuciones solares, el tipo de producto a secar y el aislamiento del conjunto. Los secadores solares se clasifican ampliamente en tres categorías, como se muestra en la Fig. 1.13.

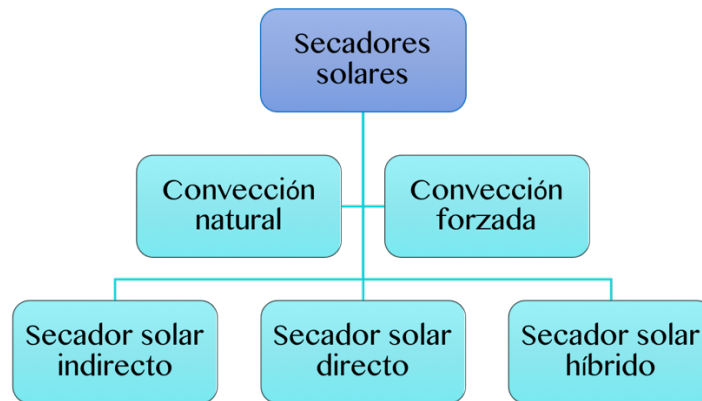


Figura 1.13. Clasificación de los secadores solares. Elaboración propia con información de (Kumar et al., 2015)

En los secadores solares de convección forzada (o secadores solares activos), el aire requerido para el secado del producto es forzado a través del colector solar a la cámara del secador usando un ventilador o un soplador. En los secadores solares de convección natural (o secadores solares pasivos), el flujo de aire requerido para el secado del producto se debe a la acción de la fuerza natural o de flotación (Basunia & Abe, 2001; Ekechukwu & Norton, 1999).

Los secadores solares de convección natural juegan un papel vital en el sector de secado debido a su bajo costo. También se ha hecho popular debido a su simple mantenimiento y operación (Mustayen et al., 2014).

Para el caso del secador con convección forzada se necesita electricidad para operar los ventiladores. Sin embargo, una de las limitantes es que en muchas áreas rurales no tienen electricidad o tienen que incurrir en altos costos para generar la electricidad utilizada para operar este tipo de secador (Midili, 2001). Estos tipos de secadores aún son ampliamente aplicables en muchos países en desarrollo.

1.3.3 FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE SECADO

El secado consiste básicamente en dos procesos fundamentales y simultáneos: (i) el calor se transfiere para evaporar el líquido, y (ii) la masa se transfiere como un líquido o vapor dentro del sólido y como un vapor de la superficie. Los factores que rigen las tasas de estos procesos determinan la velocidad de secado. Los diferentes secadores pueden utilizar transferencia de calor por convección, conducción, radiación o una combinación de estos. Sin embargo, en casi todos los secadores solares y otros secadores convencionales, el calor debe fluir primero a la superficie externa y luego al interior del sólido, con excepción del secado dieléctrico y de microondas (Strumillo & Kudra, 1986).

Dependiendo del producto alimenticio y las condiciones de secado, la vaporización puede ocurrir en la superficie o dentro del producto. La energía se transfiere al material de secado por (Rotstein et al., 1997):

- Convección, cuando la energía para la evaporación es suministrada por una corriente de aire caliente que fluye sobre o a través del material. En la mayoría de los tipos de procesos comerciales de secado se realiza en bandeja, cinta transportadora, flash, lecho fluido y secado por pulverización, el calor se transfiere principalmente por convección.
- Conducción, cuando el material está en contacto con una superficie caliente, como es el caso en la bandeja, el tambor o los secadores giratorios.
- Radiación, cuando el material sólido recibe calor cedido del gas y de la pared al sólido.

Varios mecanismos de transferencia presentes en el secado son mostrados en el modelo físico de la *Figura 1.14* (Stanley & Aguilera, 1999).

La transmisión de calor dentro del producto ocurre por conducción debido a un gradiente interno de temperatura y, en menor medida, por convección debido a la migración de humedad. Las fuentes de energía volumétrica y superficial resultantes del cambio de fase (es decir, evaporación para agua libre, desorción del agua adherida o sublimación en liofilización y absorción de energía, particularmente en el secado dieléctrico o en microondas), deben tenerse en cuenta al modelar el proceso.

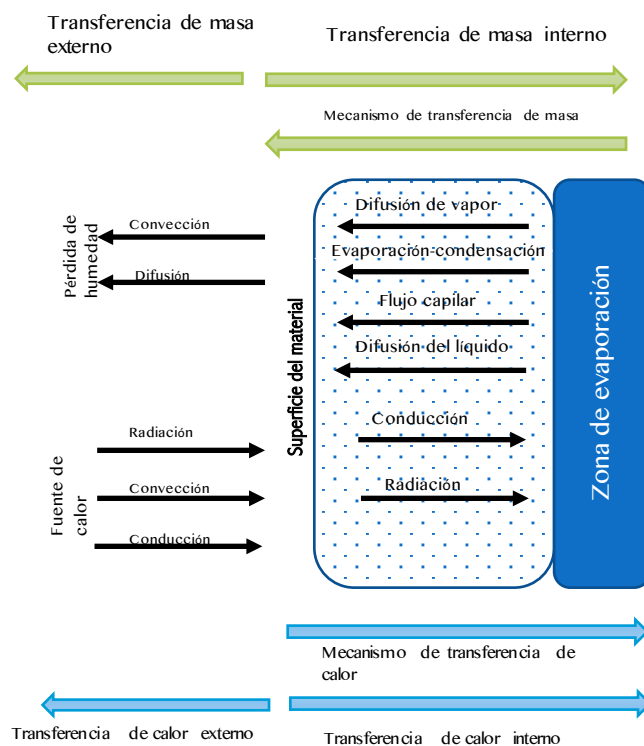


Figura 1.14. Transferencia de masa y calor durante el secado en la estructura celular. Elaboración propia, modificado de Aguilera y Stanley (1992).

El movimiento de la humedad dentro del sólido resulta de un gradiente de concentración que depende de las características del sólido, que puede ser poroso o no poroso. Por lo tanto, la estructura del sólido determina el mecanismo por el cual puede ocurrir el flujo interno de líquido y estos mecanismos pueden incluir (Lik et al., 2012):

Tipo de migración	Descripción
Transporte por <i>difusión líquida</i>	La noción de difusión líquida fue introducida por Lewis. De acuerdo con su proposición, se supone que la tasa de transferencia de humedad del líquido es proporcional al gradiente de concentración de humedad dentro del material,
Transporte por <i>difusión de vapor</i> .	Este es el principal mecanismo de transferencia de humedad por vapor en el material. Se lleva a cabo en materiales en los que el diámetro característico de los espacios de aire libre es superior a 10^{-7} m.
Transporte por <i>efusión</i> (o difusión de tipo K nudsén)	Tiene lugar cuando una dimensión característica del espacio de aire en un material capilar-poroso es inferior a 10^{-7} m.
Transporte por <i>termodifusión</i>	Es la transferencia de humedad debido al cambio de temperatura en una dirección tomando en cuenta el coeficiente de termodifusión.
Transporte por <i>fuerzas capilares</i>	Si un número de capilares con varios radios forman canales interconectados, se produce una diferencia de presión capilar, que provoca la redistribución continua de la humedad desde los capilares grandes a los pequeños mediante succión capilar.
Transporte por <i>presión osmótica</i>	La presión osmótica es una función del contenido de humedad en el material. La transferencia de humedad osmótica puede describirse entonces sobre la base de la difusión de líquido.
Transporte debido al <i>gradiente de presión</i>	Es el resultado de la diferencia de presión interna debida a la evaporación local de condensación líquida o local de vapor. El movimiento de humedad iguala la presión de acuerdo con la ley de Darcy.

Tabla 1.7. Tipos de migración de la humedad (Strumillo & Kudra, 1986).

Además de estos tipos de movimiento de la humedad, en casos determinados también puede tener lugar el transporte de masa debido a la gravedad, la presión interna y el transporte causado por la contracción o la presión externa.

1.3.3.1 CURVAS DE VELOCIDAD DE SECADO

En los procesos de secado convectivos donde el medio secante se encuentra en contacto con el aire, las curvas de secado dependen del material y las condiciones de los alrededores: velocidad del aire, temperatura y humedad. Se define a la velocidad de secado como la pérdida de humedad (X) del sólido húmedo en una unidad de tiempo, operando en condiciones constantes de secado. De manera diferencial la velocidad de secado se representa:

$$R_c = \left(-\frac{dX}{dt} \right)$$

o su forma normalizada

$$R_c = \left(-\frac{dW}{dt} \right)$$

Ecuación 1-1

Para determinar experimentalmente la cinética de secado y la velocidad de secado se procede a colocar una muestra en una bandeja. Si se trata de material sólido se debe llenar por completo la base de la bandeja, de manera que sólo quede expuesta a la corriente de aire de secado la superficie de dicho sólido. Una curva típica de secado se muestra en el a *Figura 1.15*.

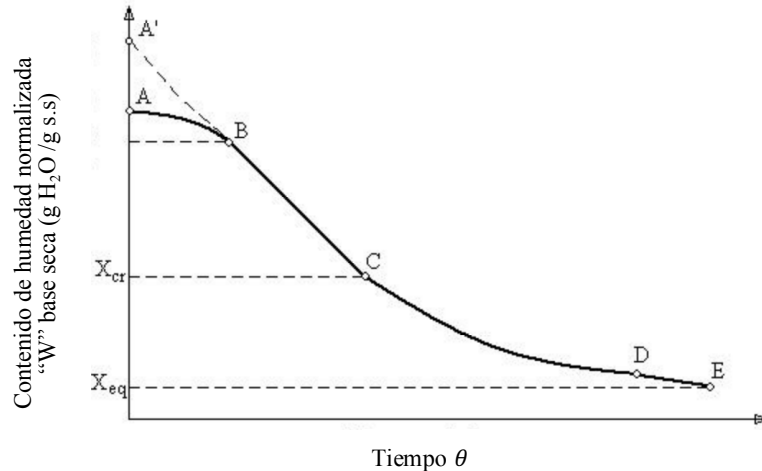


Figura 1.15. Cinética de secado

La pérdida en peso de humedad durante el secado puede determinarse a diferentes intervalos sin interrumpir la operación utilizando una balanza (Geankoplis, 1998). Los datos que se obtienen de un experimento de secado por lotes, generalmente se expresan como peso total w del sólido húmedo (sólido seco más humedad) a diferentes tiempos de t horas en el periodo de secado.

$$X_t = \left(\frac{w - w_s}{w_s} \right) \frac{\text{kg totales de agua}}{\text{kg de sólido seco}}$$

Ecuación 1-2

Y en su forma normalizada W , que se determina a través de la siguiente fórmula:

$$W = \left(\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \right) \frac{\text{kg totales de agua}}{\text{kg de sólido seco}}$$

Ecuación 1-3

Dónde la humedad en equilibrio X_e es la humedad del sólido cuando su presión de vapor se iguala a la presión del gas de secado (aire), y X_0 se refiere a la humedad inicial de mi muestra.

Las curvas de velocidad de secado (ver *Figura 1.16*) consisten de los siguientes periodos descritos por (*Sandoval, 1998*): Periodo \overline{AB} , durante el cual la velocidad de secado aumenta o disminuye rápidamente desde su valor inicial. Su duración es relativamente corta y en algunos experimentos puede o no observarse. Se define como periodo de calentamiento de los sólidos o periodo de acondicionamiento de la muestra.

El periodo \overline{BC} , corresponde al periodo de velocidad constante cuando la velocidad de difusión de la humedad no cambia con el tiempo. Esta condición estacionaria persiste cuando las fuerzas capilares son suficientemente poderosas para transportar la cantidad requerida de humedad que está siendo evaporada en la superficie. La superficie del sólido está completamente mojada y sobre ella hay una película de agua continua (monocapa).

El punto C, donde termina la velocidad constante y la velocidad de secado comienza a caer, se denomina contenido de humedad crítica. Durante el periodo \overline{CD} , la velocidad de

secado es controlada por difusión de humedad del interior a la superficie. Se conoce como periodo de velocidad decreciente. La superficie del sólido ya no está totalmente mojada y la porción mojada comienza a disminuir hasta que la superficie queda seca en su totalidad. Dependiendo del material a secar pueden ocurrir uno o dos periodos decrecientes.

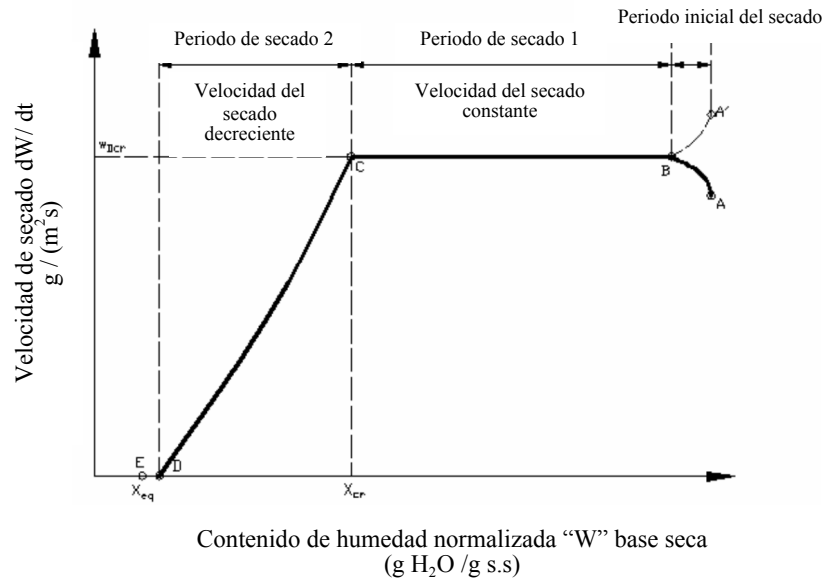


Figura 1.16. Velocidad de secado en función de la humedad

1.3.3.2 REMOCIÓN DE LA HUMEDAD EN EL PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE

En el periodo de secado de velocidad constante, las superficies de los granos del sólido en contacto con el flujo de aire de secado permanecen completamente húmedas. Como se dijo antes, la velocidad de evaporación de la humedad bajo ciertas condiciones del aire, es independiente del tipo de sólido, y de hecho, casi igual a la velocidad de evaporación de una superficie de líquido puro bajo idénticas condiciones. Sin embargo, las irregularidades de la superficie pueden aumentar la velocidad de evaporación (Geankoplis, 1998).

Durante este periodo de velocidad constante el sólido está tan mojado, que el agua actúa como si el sólido no existiera. El agua que se evapora de la superficie proviene del interior del sólido. La velocidad de evaporación en un material poroso se verifica por medio del mismo mecanismo que en un termómetro de bulbo húmedo, el cual opera esencialmente con secado de velocidad constante. Bajo secado convectivo, las condiciones de frontera para el flujo de calor, q_c , debe ser de la siguiente forma (Rotstein et al., 1997):

$$q_c = h_c * A (T - T_w)$$

Ecuación 1-4

Dónde h_c representa el coeficiente de transferencia de calor, A área de secado expuesta, T es la temperatura de bulbo seco, T_w es la temperatura de bulbo húmedo, y p_v es la presión parcial del vapor de agua.

En ausencia de transferencia de calor por conducción o radiación durante el periodo de velocidad constante la temperatura del sólido está a la temperatura del aire. Es posible calcular la velocidad de secado R_c con la ecuación de transferencia de calor:

$$Rc \frac{kg H_2O}{h * m^2} = \frac{h}{\lambda_w} (T - T_w \text{ } ^\circ C)$$

Ecuación 1-5

Dónde el coeficiente de transferencia de calor se determina (Geankoplis, 1998):

$$h = 0.0204 G^{0.8}$$

Ecuación 1-6

Es posible utilizar la *ecuación 1-6* cuando existe flujo turbulento, a una temperatura del aire de 45 a 150 °C y una velocidad de masa (G) de 2450 - 29300 $kg\ h^{-1}\ m^{-2}$ o una velocidad del aire de 0.61 a 7.6 ms^{-1} .

Sin embargo, también es posible realizar el cálculo de los coeficientes convectivos de transferencia de calor y masa bajo convección natural y forzada que generalmente están representados por los números adimensionales. Los coeficientes convectivos de transferencia de calor y masa se expresan de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$h_H = \frac{K_a * Nu}{l}$$

Ecuación 1-7

$$h_M = \frac{D_{ab} * Sh}{l}$$

Ecuación 1-8

El h_H se refiere al coeficiente convectivo de transferencia de calor y h_M al coeficiente convectivo de transferencia de masa. En el coeficiente de transferencia de calor K_a es la conductividad térmica ($Wm^{-1}K^{-1}$), Nu es el número de Nusselt y l es el ancho de la placa o el diámetro de la tubería. Para el coeficiente de transferencia de masa D_{ab} es la difusividad molecular del vapor de agua en el aire (m^2s^{-1}), Sh es el número de Sherwood.

Para convección forzada en una placa plana el número de Nusselt promedio está dado por la ecuación de Pohlhausen, 1921:

$$\overline{Nu} \frac{h_H l}{K_a} = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3}$$

$$0.6 < Pr < 10$$

Ecuación 1-9

El número de Reynolds (Re) a su vez se calcula:

$$Re = \frac{l * v * \rho_{ah}}{\mu_{ah}}$$

Ecuación 1-10

El ancho de la placa o el diámetro de la tubería está representado por l , la velocidad característica del fluido v (ms^{-1}), la viscosidad del aire húmedo μ_{ah} ($kgm^{-1}s^{-1}$) y la densidad del aire húmedo ρ_{ah} (kgm^{-3}). Para el Prandtl (Pr):

$$Pr = \frac{Cp_{ah}\mu_a}{K_a}$$

Ecuación 1-11

Definido por la capacidad calorífica del aire húmedo Cp_{ah} ($Jkg^{-1}K^{-1}$), la viscosidad del aire μ_a ($kgm^{-1}s^{-1}$) y la conductividad térmica del aire K_a ($Wm^{-1}K$). Para el caso del coeficiente convectivo de transferencia de masa, el número de Sherwood se calcula (Strumillo & Kudra, 1986):

$$\overline{Sh} \frac{h_H l}{D_{ab}} = 0.664 Re^{1/2} Sc^{1/3}$$

$0.6 < Sc < 10$
Ecuación 1-12

El número de Schmidt, Sc a su vez se calcula:

$$Sc = \frac{\mu_{ah}}{\rho_{ah} * D_{ab}}$$

Ecuación 1-13

1.3.3.3 REMOCIÓN DE LA HUMEDAD EN EL PERIODO DE VELOCIDAD DECRECIENTE

El periodo de velocidad constante termina cuando la velocidad de migración del agua en el interior a la superficie llega a ser menor que la velocidad de evaporación en la superficie. El periodo de velocidad decreciente inicia en el punto de humedad crítica (punto donde termina el periodo de velocidad constante y la velocidad de secado es regida por la evaporación del agua sobre la superficie húmeda). Se compone de dos periodos, uno en el que la velocidad de secado varia linealmente con la humedad desde el punto crítico y otro que no cumple con esta variación lineal (Sandoval, 1998).

En el primer periodo de velocidad decreciente, la superficie se seca y la velocidad de secado disminuye, al continuar el periodo, la evaporación se desplaza hacia la parte interna del material y la velocidad de secado disminuye aún más. Por lo que en los periodos de velocidad decreciente la velocidad de secado está influenciada por el movimiento de la humedad dentro del sólido y ya no influyen los efectos externos como es la velocidad del aire, sobre todo en la última etapa (Kisakurek & Gebizlioglu, 1978). Por lo tanto, la transferencia de calor en el periodo decreciente puede definirse como:

$$q_D = \rho_p * \lambda$$

Ecuación 1-14

Considerando los valores a partir de la humedad crítica. Para ajustar los valores de q_D se puede considerar el volumen del sistema alimenticio:

$$q_D = l_o * A_p * \rho_p \lambda_w \frac{dw}{dt} = m_p \lambda_w \frac{dw}{dt}$$

Ecuación 1-15

Dónde λ_w es el calor latente de vaporización del agua (kJkg^{-1}), A_p es el área del producto (m^2), ρ_p es la densidad del producto (kgm^{-3}) y m_p es la masa del producto (kg).

2 PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

2.1 OBJETIVOS

2.1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio comparativo del desempeño técnico, económico, ambiental y la evaluación del potencial de aceptación de dos tipos de deshidratadores solares (tipo invernadero y directo) en contraste con uno convencional (estufa) para su implementación en la reducción de mermas agrícolas de zarzamora.

2.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Cuantificar y evaluar el comportamiento del proceso de secado, mediante dos tipos de tecnología solar: invernadero y secador directo, en comparación con el secado convencional (en estufa).
- Evaluar la calidad fisicoquímica de los productos obtenidos en cada uno de los procesos de secado (compuestos fenólicos y capacidad antioxidante).
- Realizar el análisis energético a través de los coeficientes de transferencia de calor convectivo y difusivo, para determinar los ahorros económicos y ambiental de las opciones estudiadas.
- Realizar el análisis de potencial de aceptación tecnológico con posibles usuarios de la deshidratación solar.

2.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Con base en los objetivos establecidos en el punto 2.1.1, 2.1.2, las preguntas que se pretenden abordar y responder en este trabajo son las siguientes.

2.2.1 PREGUNTA CENTRAL

¿Qué implicaciones tecnológicas, económicas y ambientales tiene la implementación de dos tecnologías de deshidratadores solares (invernadero y directo) en comparación con uno convencional, encaminados a reducir las mermas agrícolas de zarzamora?

2.2.2 PREGUNTAS ADICIONALES

- ¿Qué tecnología ofrece el más atractivo proceso de secado?
- ¿Cuál proceso preserva mayor concentración de los compuestos fenólicos, la capacidad antioxidante, flavonoides y antocianinas de los productos obtenidos?
- ¿Qué requerimientos energéticos se asocian a cada uno de los procesos de secado y cómo se traducen en ahorros monetarios y ambientales?
- ¿Qué potencial/aceptación tendrán los deshidratadores solares en los pequeños y medianos productores agrícolas?

2.3 HIPÓTESIS

- Las tecnologías de deshidratación solar obtendrán mayor concentración de los compuestos fenólicos, la capacidad antioxidante, flavonoides y antocianinas de la zarzamora, que el proceso convencional de secado en estufa.
- El análisis energético y ambiental ofrecerá un panorama de los costos y ahorros asociados a cada proceso. Las tecnologías de deshidratación solar permiten un ahorro energético y evitan una cantidad importante de emisión de CO₂ al ambiente.
- Debido a las características que ofrece la deshidratación solar facilitará el potencial de aceptación pudiendo propiciar su implementación en la reducción de mermas agrícolas y beneficiando a los productores.

3 DISEÑO METODOLÓGICO

Las preguntas de investigación del proyecto son de diferente origen, por lo que se emplean metodologías cuantitativas específicas para responderlas. Los siguientes apartados realizan una descripción de las metodologías utilizadas. En el apartado 3.1 se desarrolla la metodología experimental desde la obtención de la muestra y su preparación para secado hasta la metodología de caracterización de antioxidantes, fenoles totales, flavonoides y antocianinas.

En la sección 3.2 se describe la metodología de valoración energética a partir de la transferencia de calor por convección natural y forzada, el procedimiento para comparar el consumo energético con otros combustibles (gas lp, gas natural y electricidad). Se establece en el mismo numeral el desarrollo para determinar las emisiones de CO₂ evitadas a la atmósfera. En la última sección del capítulo 3.3 se describe la metodología para el diseño de la encuesta, que fungió como el instrumento de recolección de datos para conocer el potencial de aceptación de los deshidratadores.

3.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1.1 MUESTRA Y PRETRATAMIENTO

Las muestras de zarzamoras frescas (variedad Tupy) fueron suministradas por Comercializadora de Frutas y Berries de Michoacán S.A de C.V.; un centro de comercialización nacional de bayas ubicado en Av. San José No. 509 Fracc. San José en Los Reyes Michoacán, México, así como por un productor y presidente no gubernamental del Sistema Producto Zarzamora, el Ing. Gustavo Calleros Coloni. Las muestras proporcionadas eran consideradas mermas de la producción por irregularidades en el color, tamaño y/o forma, además de que el 20% de la muestra era de origen orgánico y el resto era convencional.

Las frutillas fueron recolectadas a finales del mes de mayo del 2017, periodo que corresponde al final de la temporada de producción. Las muestras (100 kg) con un contenido de humedad de $\sim 0.88 \pm 0.04$ miligramos /gramos sólido seco (mg/g_{ss}) se transportaron en hieleras al Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM) en Temixco, Morelos. Las muestras se colocaron en contenedores de plástico (de 14L) con tapa y se almacenaron en un congelador (Hisense, FC72D7AWD, USA) a $-10 \sim -14^\circ\text{C}$ hasta su análisis dentro de los primeros 30 días. Todos los valores se calcularon con los promedios \pm desviación estándar, de tres determinaciones individuales (cada una realizada por triplicado).

Previo a realizar las pruebas de sacado se colocaron los contenedores de plástico en un refrigerador (Daewoo, FRS-2411S, Korea) a 7°C por ~ 12 h. Las frutillas se desinfectaron con plata ionizada al 0.048% (marca microdyn), se licuaron y se separó las semillas de la pulpa con un colador. El día posterior a la preparación de la muestra, se colocaron ~ 360 g de pulpa (medidas con un recipiente de 0.5 L) en charolas de plástico de 35x50x0.5 cm. La pulpa formó una película homogénea con espesor 0.5 ± 0.1 cm y luego se secaron por cada uno de los siguientes métodos.

3.1.2 MÉTODOS DE SECADO

Para el proceso de secado las zarzamoras se deshidrataron por tres diferentes tecnologías, secado solar directo (SSD), secado solar tipo invernadero (SSI) y se compararon con los

obtenidos mediante el secado en estufa eléctrica (SE) bajo condiciones controladas para la obtención de las curvas características de secado. La ubicación experimental del estudio tiene una latitud de 18° 50'N, una longitud de 99° 14'O y a 1219 m sobre el nivel del mar. Las pruebas se llevaron a cabo los días 16-17 de junio (primer secado), 21-22 de junio (segundo secado) y 5-6 de julio del 2017 (tercer secado), periodo que corresponde a la época de lluvias de la región; sin embargo, se seleccionaron los días con mejor irradiación para tener las condiciones ambientales óptimas (temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad del aire y dirección del viento) para cada secado. Las muestras se secaron entre las 9:30 am hasta las 5:00 pm continuamente.

Es necesario mencionar que los prototipos de secado SSD y SSI, fueron diseñados y desarrollados por dos equipos de investigación a cargo de Tamayo, (2017) y Vidaña, (2016) dentro del laboratorio de secado solar perteneciente a la coordinación de refrigeración y bombas de calor del IER-UNAM en el municipio de Temixco, Morelos.

3.1.2.1 SECADO SOLAR DIRECTO (SSD)

En el dispositivo de SSD (descrito por Vidaña, 2016) el aire y el producto se calientan por el efecto invernadero y está conformado por dos partes: a) una cámara de acrílico transparente (con área de 0.48 m²) con orificios en el fondo y paredes para permitir la entrada de aire seco y b) un extractor de aire caliente húmedo, sin embargo, para la experimentación de secado se utilizó convección natural (*Figura 3.1*). Se midió la irradiancia solar con el piranómetro (Kipp & Zonen, CMP6), la temperatura ambiente y la humedad relativa con un termohigrómetro (Cole Parmer, 37950) y la velocidad del viento con un anemómetro (Extech Thermo, AN100).

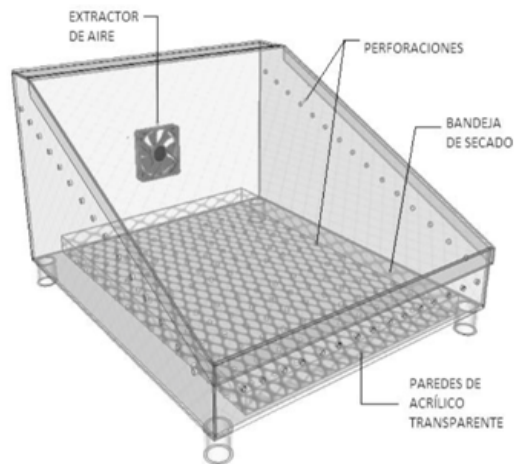


Figura 3.1. Esquema de secador solar directo. (Vidaña, 2016).

3.1.2.2 SECADO SOLAR TIPO INVERNADERO (SSI)

El SSI cuenta con un sistema auxiliar de calentamiento, por lo que puede operar por convección natural o forzada (descrito por Tamayo, 2017). La entrada del invernadero se encuentra orientado hacia el sur, ocupa un área de 30 m², está compuesto principalmente por

tres calentadores solares de aire de placa plana, una sala de secado con sistema de circulación de aire y dos extractores de salida de aire, ver *Figura 3.2*.

Los calentadores solares de aire están conectados en serie y tienen un área total de captación de 6.92 m^2 , están inclinados en un ángulo de 40° hacia el sur y cuentan con un filtro a la entrada del aire. El sistema de circulación de aire es provisto por un extractor-eyector centrífugo (AirTechnology, CFD-7 de tres fases, alimentación de 220 a 440 V, motor de $\frac{1}{2}$ HP y flujo de aire de $1546 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$), a la entrada de aire se cuenta con dos difusores en la pared sur encargados de distribuir uniformemente el aire caliente (de lámina galvanizada calibre 16 o 1.5 mm, dimensiones $1150 \times 1076.4 \times 203.2 \text{ mm}$). Los extractores de aire son axiales de pared (SilentVent, HAE 150 con un caudal de $258 \text{ m}^3\text{hr}^{-1}$ con un diámetro de aspas de 6 in, de 1250 rpm y 24 watts), localizados en la pared norte.

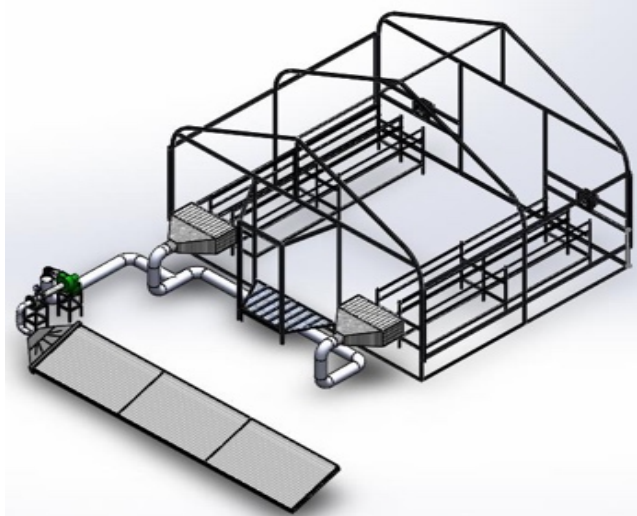


Figura 3.2. Esquema de secador solar tipo invernadero (Tamayo, 2017).

La estructura del invernadero es de acero estructural cuadrado de $1 \frac{1}{4}$ de pulgada (volumen total de 115.5 m^3), forrado con plástico de polietileno de baja densidad (PEBD) y malla sombra en las paredes este-oeste con un porcentaje de sombreo de 35%. En la sala de secado se tienen dos mesas (con charolas de acero inoxidable 300) con un área de secado total de 16 m^2 .

La medición de la temperatura dentro del invernadero se realizó mediante la distribución de 20 sensores, al exterior por 8 sensores (dos en cada pared) y uno adicional a 1 m del invernadero, todos termopares tipo T (Omega). La irradiación solar al interior y exterior se midieron con un piranómetro (Kipp & Zonen, CMP6). La humedad relativa al interior se registró con dos sensores de humedad (AOSONG, DHT22) a la entrada y a la salida del aire caliente, y uno en el exterior del invernadero. La velocidad del aire con el anemómetro (Extrech, SDL 350) y también se registró flujo de aire a la salida de los calentadores de aire con el flujómetro (Sierra QuadraTherm 780i, de 8 pulgadas de diámetro del tubo).

Para realizar las mediciones de temperatura y irradiación (cada 30 segundos) se utilizó el equipo de adquisición de datos (Keysight Technologies, Agilent 34970A), en un programa creado en el Software VEE Pro 9.3, y se utilizaron dos tarjetas multiplexor para la conexión de los 29 termopares y los dos piranómetros. Para recabar la información del sensor de humedad se utilizó un Arduino mega (ATmega1280).

3.1.3 CINÉTICA DE SECADO DE LA ZARZAMORA

La cinética de secado de cada una de las tecnologías se realizó como se describe a continuación:

- Secado Solar Directo (SSD). Se colocaron dos charolas con pulpa de zarzamora en el prototipo de secador directo, y se expuso a la luz solar directa hasta llegar a un equilibrio de pérdida de agua con precisión de 0.1 g medidos con báscula portátil (OHAUS, YS2101). El seguimiento de la pérdida de humedad del producto durante el secado se realizó mediante registros sucesivos cada 20 minutos (primeras dos horas de secado) y después cada 30 minutos (hasta peso constante).
- Secado Solar en Invernadero (SSI). Se colocaron 26 charolas con pulpa de zarzamora (trece en cada mesa) extendidas a todo lo largo de las mesas de trabajo, dentro de la cámara de secado del invernadero el cuál operaba con calentamiento solar auxiliar hasta peso constante. El registro y seguimiento de la pérdida de peso se realizó de la misma manera que el descrito para SSD.
- Secado en Estufa (SE). Se colocaron dos charolas con pulpa de zarzamora en el interior de la cámara de secado del horno (Yhchem, YGG-9030A) a 60 ± 1 °C con convección forzada a 1 ms^{-1} por siete horas (tiempo requerido para llegar a una pérdida de peso constante). El registro y seguimiento de la pérdida de peso se realizó de la misma manera que el descrito para SSD y SSI.

El contenido de humedad de las charolas en base húmeda y seca se realizaron con las ecuaciones siguientes:

$$X_{bh} = \frac{Pf - Ps}{Pf} \quad \text{Ecuación 3-1}$$

$$X_{bs} = \frac{Pf - Ps}{Ps} \quad \text{Ecuación 3-2}$$

Dónde:

X_{bh} contenido de humedad, base húmeda

X_{bs} contenido de humedad, base seca

Pf peso fresco inicial de la muestra (g)

Ps peso seco de la muestra (g)

Para realizar la corrección a contenido de sólidos secos, el peso seco se refiere al peso de la muestra inicial que fue sometida a un proceso de secado a 110° C por 12 horas. Este proceso es el seguido por el método del contenido de humedad de acuerdo con la norma del AOAC, 1990.

$$Ps = Pf - Pf * X_{bh*} \quad \text{Ecuación 3-3}$$

Dónde:

X_{bh*} es la humedad base húmeda de la muestra sometida a secado a 105° C por 12 horas.

3.1.4 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA ZARZAMORA

3.1.4.1 ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE

Reactivos

Para la determinación de la actividad antioxidante fueron utilizados los reactivos descritos en la *Tabla 3.1*.

Reactivo	Proveedor
Metanol (CH ₃ OH)	Sigma-Aldrich, Saint Louis, MO, USA
Ácido ascórbico (C ₆ H ₈ O ₆)	Sigma-Aldrich, Saint Louis, MO, USA
2,2-Difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH)	Sigma-Aldrich, Taufkirchen Alemania

Tabla 3.1. Reactivos utilizados en la determinación de la actividad antioxidante. Todos los reactivos utilizados son grado analítico

Procedimiento

Se utilizó el método desarrollado por Blois (1958) y descrito por Brand-Williams et al. (1995) para determinar la actividad antioxidante mediante el uso de un radical libre estable α , α -difeníl- β -picrilhidrazilo (DPPH).

Extracción de compuestos: se pesaron 0.5 g de muestra fresca y seca y se extrajo con 5 ml de metanol al 80% sonicado en baño de ultrasónico por 30 min (Branson, CPX3800H), se centrifugó a 1820 rpm (Solbat, J40) por 10 min. Se recuperó el sobrenadante, y se extrajo nuevamente con 5ml de metanol al 80%, se centrifugó a las mismas condiciones y se recupera sobrenadante. Se filtró el extracto orgánico total con pipeta Pasteur empacada y se almacenó en un vial en refrigeración a 5°C hasta su medición.

Curva estándar: se pesaron 2.5 mg de ácido ascórbico (ACS) y se aforaron a 10 ml con metanol al 80%. Se preparó ácido ascórbico a distintas concentraciones de acuerdo a la Tabla 3.2 en viales ámbar a partir de la solución madre de ácido ascórbico (2.5mg entre 10ml). Todo el procedimiento se realizó en obscuridad y tomando la precaución de forrar el matraz con papel aluminio.

Concentración (mg 100 ml ⁻¹)	Solución madre Ácido ascórbico (ml)	Metanol al 80% (ml)
25.0	2.00	0.00
21.0	1.68	0.32
17.0	1.36	0.64
12.5	1.00	1.00
9.0	0.72	1.28
5.0	0.40	1.60
0.0	0.00	2.00

Tabla 3.2. Diluciones de ácido ascórbico para curva estándar

Solución de DPPH: se pesaron 0.39 mg de DPPH y se aforaron a 10 ml con metanol al 80%, en obscuridad y con matraz previamente forrado. Posteriormente colocó a baño ultrasónico por 20 minutos a temperatura ambiente.

Determinación de la actividad antioxidante: se adicionan 100 μ l de cada dilución del estándar de ácido ascórbico a una celda para espectrofotómetro. A la par se adicionan 100 μ l de lo extracto orgánico a una celda. Se adicionan a cada celda 2.9 ml de solución DPPH y se dejó reposar por 30 minutos tomando el tiempo desde la adición del DPPH a la primera muestra, a temperatura ambiente y en obscuridad. Se leyó la absorbancia a $\lambda = 517$ nm en el espectrofotómetro (Genesys, 10S UV-Vis), utilizando como blanco metanol al 80%. Los resultados se expresaron en mg de ácido ascórbico equivalente por g de sólido seco (mg AAE g⁻¹ s.s).

En la Figura 3.3 se muestra la curva de calibración para las pruebas de actividad antioxidante, con valor de $R^2=0.996$ y obteniendo la ecuación de la recta que las representa para poder hacer los cálculos respectivos de concentración.

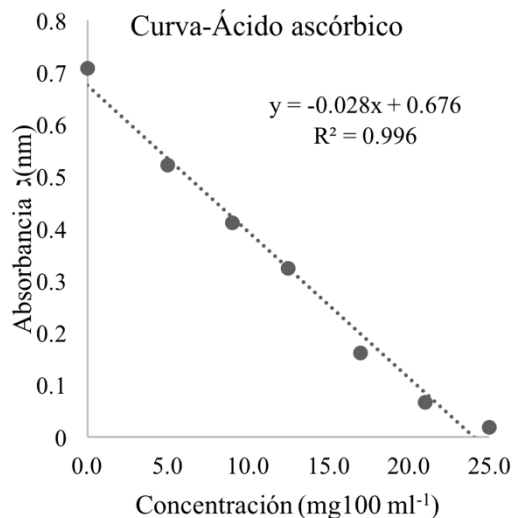


Figura 3.3. Curvas de calibración de ácido ascórbico

3.1.4.2 FENOLES TOTALES

Reactivos

Para la determinación de los fenoles totales fueron utilizados los reactivos descritos en la Tabla 3.3.

Reactivo	Proveedor
Metanol (CH ₃ OH)	Sigma-Aldrich, Saint Louis, MO, USA
Ácido clorhídrico (HCl)	Sigma-Aldrich, Saint Louis, MO, USA
Folin-Ciocalteu	Sigma-Aldrich, Buchs Suiza
Ácido gálico monohidratado (C ₇ H ₆ O ₅ · H ₂ O)	Sigma-Aldrich, Buchs Suiza

Tabla 3.3. Reactivos utilizados en la determinación de fenoles totales. Todos los reactivos utilizados son grado analítico.

Procedimiento

Los fenoles totales se determinaron usando el reactivo Folin-Ciocalteu de acuerdo al procedimiento descrito por Singleton & Rossi (1964).

Extracción de compuestos: se pesaron 0.5 g de muestra fresca y seca y se extrajo con 5 mL de metanol al 80% acidificado con ácido clorhídrico al 1%, se colocó en un baño ultrasónico por 30 min, posteriormente se centrifugó a 1820 rpm por 10 min recuperando el sobrenadante. Se extrajo nuevamente la muestra con 5 ml de metanol al 80% acidificado con ácido clorhídrico al 1% se centrifugó a las mismas condiciones y se recuperó el sobrenadante. Se filtró el extracto orgánico total con pipeta Pasteur empacada y se almacenó en un vial ambar en refrigeración a 5°C hasta su medición.

Reactivo de Folin-Coicalteu: se disolvieron 5 ml del reactivo de Folin-Ciocalteu 2 molar es una relación 1:1 con agua destilada, en un matraz previamente forrado y en oscuridad.

Curva estándar: se pesaron 3.6 mg de ácido gálico y se aforó a 10 ml con agua destilada en un matraz previamente forrado y en oscuridad. Se preparó ácido gálico a partir

de la solución madre (3.6mg/10ml) a distintas concentraciones de acuerdo a la *Tabla 3.4* en viales ámbar.

Concentración (mg 100 ml ⁻¹)	Solución madre Ácido gálico (ml)	Agua destilada (ml)
36.0	2.00	0.00
30.0	1.66	0.34
24.0	1.33	0.67
18.0	1.00	1.00
12.0	0.66	1.34
6.0	0.33	1.67
0.0	0.00	2.00

Tabla 3.4. Diluciones de ácido gálico para curva estándar

Determinación de los fenoles totales: en oscuridad se tomaron 200 μ l de cada dilución de ácido gálico en un tubo de réplica (vial ámbar) y se le adicionó 2.6 ml de agua destilada con 2 ml de carbonato de sodio al 7%, se agitó con vortex (XH-D, A50050) por 1 min. Se adicionaron 200 μ l reactivo Folin-Ciocalteu. A la par se realiza el mismo procedimiento para los extractos orgánicos. Se dejó reposar por 60 min a 25° C medidos desde la adición del reactivo Folin-Ciocalteu a la primera muestra. Se leyó absorbancia a $\lambda = 750$ nm en un espectrofotómetro. Los resultados se expresaron en mg de ácido gálico equivalente por gramo de sólido seco (mg GAE g⁻¹ s.s.).

En la Figura 3.4 se muestra la curva de calibración para la prueba de fenoles totales, obteniendo valores aceptables de $R^2=0.993$ y obteniendo la ecuación de la recta que las representa para poder hacer los cálculos respectivos.

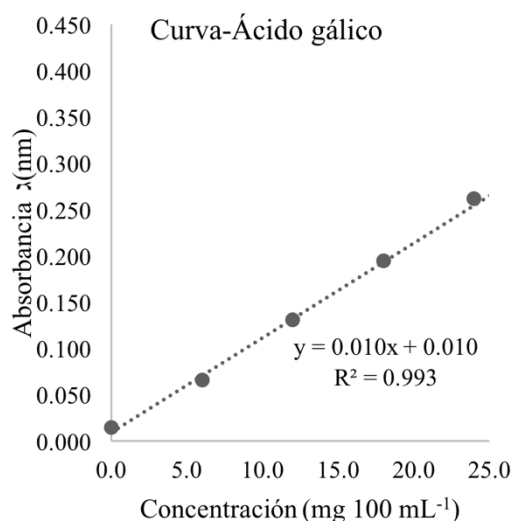


Figura 3.4. Curvas de calibración de ácido gálico

3.1.4.3 FLAVONOIDES

Reactivos

Para la determinación de los flavonoides fueron utilizados los reactivos descritos en la siguiente tabla:

Reactivo	Proveedor
Metanol (CH ₃ OH)	Sigma-Aldrich, Saint Louis, MO, USA
Quercentin $\geq 95\%$ (HPLC)	Sigma-Aldrich, Saint Louis, MO, USA
Nitrito de Sodio (NaNO ₂)	Fermont, Monterrey NL, México
Cloruro de aluminio (AlCl ₃ ·6H ₂ O)	Fermont, Monterrey NL, México
Hidróxido de Sodio (NaOH)	Sigma-Aldrich, Saint Louis, MO, USA

Tabla 3.5. Reactivos utilizados en la determinación de flavonoides. Todos los reactivos utilizados son grado analítico.

Procedimiento

El método de determinación de flavonoides totales consiste en la determinación espectrofotométrica del complejo Flavonoide-AlCl₃ en medio básico a $\lambda = 510$ nm, utilizando quercentina dihidratada como patrón. Las flavonas y flavonoles presentan al menos tres hidroxilos fenólicos, condición que facilita su clasificación y reactividad frente al cloruro de aluminio (AlCl₃), formando complejos de color amarillo específicos para flavonas y flavonoles (3,5-hidroxiflavonas y 3,5-hidroxiflavonoles) que son susceptibles de analizar mediante espectrofotometría ultravioleta-visible (Mabry et al., 1970)

Extracción de compuestos: la técnica de extracción de los compuestos en las muestras frescas y secas es la misma que la descrita para la determinación de la actividad antioxidante (sección 3.1.4).

Curva estándar: se pesa 1 mg de quercentina y se aforó a 10 ml con agua destilada, en obscuridad y con matraz previamente forrado, debido a la sensibilidad del estándar a la luz. Se preparan diferentes soluciones de quercentina a distintas concentraciones en viales ámbar, partiendo de la solución madre de quercentina (1 mg 10 ml⁻¹), de acuerdo con la Tabla 3.6.

Concentración (mg ml ⁻¹)	Solución madre Quercentina (ml)	Agua destilada (ml)
0.00	0.00	1.00
0.01	0.20	0.80
0.04	0.40	0.60
0.06	0.60	0.40
0.08	0.80	0.20
1.00	1.00	0.00

Tabla 3.6. Diluciones de quercentina para curva estándar

Determinación de los flavonoides: se agregaron a cada dilución de estándar 4 ml de agua destilada y se agitó con vortex por 30 segundos. Se añadieron 300 μ l de nitrito de sodio (NaNO₂) al 5%, se agitó con vortex por 30 s y se dejó reposar por 6 minutos. Transcurrido el tiempo se adicionó 300 μ l de cloruro de aluminio (AlCl₃·6H₂O) al 10% y se dejó reposar por 5 minutos. Posteriormente se adicionaron 2 ml de agua hidróxido de sodio (NaOH) 1M y finalmente se completa el volumen de cada dilución con 2.4 ml de agua destilada. Para la preparación de las muestras con el extracto orgánico se añade 1 ml de extracto en los tubos de prueba (vial ámbar), y se sigue el mismo procedimiento descrito para la curva estándar, el procedimiento se realiza simultáneamente. Se leyó la absorbancia a $\lambda = 510$ nm antes de 30 min (iniciando el conteo desde los primeros 6 min de reposo después de la adición del nitrito de sodio). Los resultados son expresados en mg de quercentina por gramo de sólido seco (mg Quercentina g⁻¹ s.s).

En la Figura 3.5 se muestra la curva de calibración para la prueba de flavonoides, obteniendo así la ecuación de la recta que la representa con valor aceptable de $R^2 = 0.994$.

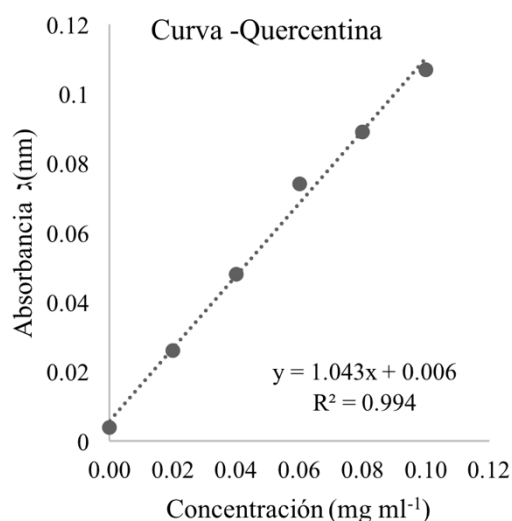


Figura 3.5. Curvas de calibración de Quercentina

3.1.4.4 ANTOCIANINAS

Reactivos

Para la determinación de los flavonoides fueron utilizados los reactivos descritos en la Tabla 3.7.

Reactivo	Proveedor
Etanol (CH ₃ CH ₂ OH)	Sigma-Aldrich, Saint Louis, MO, USA
Ácido clorhídrico (HCl)	Sigma-Aldrich, Saint Louis, MO, USA
Cloruro de potasio (KCl)	Fermont, Monterrey NL, México
Acetato de Sodio (C ₂ H ₃ NaO ₂)	Fermont, Monterrey NL, México

Tabla 3.7. Reactivos utilizados en la determinación de antocianinas. Todos los reactivos utilizados son grado analítico.

Procedimiento

El método utilizado para la determinación de antocianinas totales fue el método del potencial hidrógeno (pH) diferencial.

Extracción de compuestos: se pesaron 0.5 g de muestra fresca y seca y se extrajo con 5 ml de etanol (EtOH) acidificado con ácido clorhídrico (HCL) al 1%. Se colocó a baño de ultrasonido por 30 min, y posteriormente se centrifugó a 1820 rpm por 10 min recuperando el sobrenadante. Se extrajo nuevamente con 5 ml de EtOH acidificado con HCl al 1%, se centrifuga y se recupera el sobrenadante. Se filtra el extracto orgánico con pipeta Pasteur empacada con fibra de papel y se guarda en vial ámbar a 5°C hasta su análisis.

Determinación de las antocianinas totales: se colocó 1.5 ml del extracto orgánico diluido en 1.5 ml de dos diferentes buffers; 0.025M de cloruro de potasio (KCl) pH=1.0 y 0.4M de acetato de sodio (C₂H₃NaO₂) pH=4.5 respectivamente. Se deja incubar 30 minutos a temperatura ambiente, y se leyó la absorción en el espectrofotómetro a $\lambda = 510$ nm y $\lambda = 700$ nm.

La absorbancia de las muestras (A) fue calculada como sigue:

$$A = (A_{510} - A_{700})_{pH\ 1.0} - (A_{510} - A_{700})_{pH\ 4.5} \quad \text{Ecuación 3-4}$$

El total de antocianinas fue calculado como sigue:

$$TA = \frac{AxMWxfdx10^3}{\epsilon xp} \quad \text{Ecuación 3-5}$$

dónde

TA= antocianinas totales en mg l^{-1}

A= la diferencia de absorbancias entre soluciones de pH 1 y pH 4.5

fd= factor de dilución

ϵ = la absorptividad molar de $26900 \text{ L mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$

MW= peso molecular de $449.82 \text{ g mol}^{-1}$

p= ancho de la celda del espectrofotómetro igual a 1 cm.

La conversión a mg se realiza con el ajuste 10^3 . Los resultados son expresados en mg de cianidin 3-glucosido equivalente por g de sólido seco ($\text{mg C}_3\text{GE g}^{-1}$ s.s.).

3.2 METODOLOGÍA DE VALORACIÓN ENERGÉTICA DE LA DESHIDRATACIÓN

3.2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL SECADO

3.2.1.1 CONVECCIÓN FORZADA

Como

Como se describió en el capítulo 1, sección 1.3.3 el cálculo para el coeficiente convectivo la transferencia de calor por convección forzada y natural se puede hacer con el método de números adimensionales (López-Ortíz 2011; López-Ortíz et al., 2018). Para la convección

$0.6 < Pr < 10$ Ecuación 1-9 de Pohlhausen: $\overline{Nu} = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3}$, para $0.6 < Pr < 10$. A su vez, el cálculo del Reynolds y Prandlt con las Ecuaciones 1-10 y 1-11:

$$Re = \frac{l * v * \rho_{ah}}{\mu_{ah}}$$

$$Pr = \frac{Cp_{ah}\mu_a}{K_a}$$

Para poder realizar el cálculo del número adimensional de Prandlt se utiliza el siguiente procedimiento: la conductividad térmica del aire seco K_a ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$), y la viscosidad del aire seco μ_a se utilizan las ecuaciones 3-6 y 3-7 descritas por (Perry, 1988). La K_a se determina por:

$$K_a = 7.064 \times 10^{-5} + 0.005218 T_{pro,i} \quad \text{Ecuación 3-6}$$

La $T_{pro,i}$ es la temperatura del aire en K. La viscosidad del aire seco μ_a ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\mu_a = -8.133 \times 10^{-13} (T_{pro,i})^3 + 1.028 \times 10^{-9} (T_{pro,i})^2 - 3.982 \times 10^{-9} T_{pro,i} + 6.605 \times 10^{-5}$$

Ecuación 3-7

Las ecuaciones 3-8 a 3-10 utilizadas para determinar la capacidad calorífica del aire húmedo Cp_{ah} , (Felder & Rousseau 2004) está dada por:

$$Cp_{ah} = Cp_a + Cp_w + H \quad \text{Ecuación 3-8}$$

$$Cp_w = \frac{33.46 + 0.0068 T_{pro,i} + 7.604 \times 10^{-6} (T_{pro,i})^2 - 3.593 \times 10^{-9} (T_{pro,i})^3}{0.018016}$$

Ecuación 3-9

$$Cp_a = \frac{28.09 + 0.001965 T_{pro,i} + 4.799 \times 10^{-6} (T_{pro,i})^2 - 1.965 \times 10^{-9} (T_{pro,i})^3}{0.029}$$

Ecuación 3-10

Dónde el Cp_a , Cp_w se refieren a la capacidad calorífica del aire seco y del agua respectivamente ($Jkg^{-1}K^{-1}$) y H es la humedad absoluta en kilogramos de agua entre kilogramos de aire seco ($kg_w kg_a^{-1}$). Para determinar el valor de H se utilizan las ecuaciones 3-11 a la 3-14 (Geankoplis, 2007):

$$H = \frac{H^*}{\rho_a}$$

Ecuación 3-11

H^* se refiere a la humedad volumétrica ($kg_w m^{-3}$), y ρ_a se refiere a la densidad del aire seco. Para el cálculo de la humedad volumétrica, se utiliza la *ecuación 3-12*:

$$H^* = 2.16.68 \% HR \frac{P_{AS}}{100 (T + 273.15)} \times 10^{-5}$$

Ecuación 3-12

$$\ln P_{AS} = \sum_{i=-1}^4 b_i T_{ah}^i + b_4 \ln T_{ah}$$

Ecuación 3-13

$$T_{ah} = T_a - \sum_{i=0}^3 C_i T^i$$

Ecuación 3-14

Dónde P_{AS} es la presión del vapor de agua pura a la temperatura establecida en pascales para $\ln P_{AS}$ y en mbar para H^* . T_{ah} es la temperatura del aire húmedo en K, y T_a es la temperatura del aire (K). Para las ecuaciones 3-13 y 3-14 las constantes de b_i y C_i toman los valores de la *Tabla 3.8* y *Tabla 3.9* respectivamente:

b_i	valor
b_{-1}	-5800.2206
b_0	1.3914993
b_1	-0.04864024
b_2	4.1765×10^{-05}
b_3	-1.4452×10^{-08}
b_4	6.5459673

Tabla 3.8. Valores de la constante b_i para cálculo de $\ln P_{AS}$ en la Ecuación 3-13

C_i	valor
C_0	0.4931358
C_1	-0.00460943
C_2	1.3746×10^{-05}
C_3	-1.2743×10^{-08}

Tabla 3.9. Valores de la constante C_i para cálculo de T_{ah} en la Ecuación 3-14

Las ecuaciones descritas (3-6 a las 3-14) son para el cálculo del número adimensional de Prandlt. Para poder determinar el número de Reynolds (Ecuación 1-10) se utiliza el siguiente procedimiento (Ecuaciones 3-15 a 3-18) descritas por Perry, 1998. Para la densidad del aire húmedo ρ_{ah} :

$$\rho_{ah} = \frac{m}{V_h} = \frac{(1 + H)}{V_h}$$

Ecuación 3-15

$$V_h = (2.83 \times 10^{-3} + 4.56 \times 10^{-3} * H) T_{ah}$$

Ecuación 3-16

Dónde la ρ_{ah} está dado en kilogramos de aire húmedo entre metros cúbicos de aire húmedo ($\text{kg}_{ah} \text{m}^{-3}_{ah}$), y V_h se refiere al volumen húmedo en metros cúbicos entre kilogramos de aire seco ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}_a$). La viscosidad del aire húmedo μ_{ah} se calcula:

$$\mu_{ah} = \mu_a y_a + \mu_w y_w$$

Ecuación 3-17

$$\mu_w = (0.002381 T_{pro} - 0.33174) \mu_a$$

Ecuación 3-18

Dónde μ_a , y_a se refieren a la viscosidad y la fracción mol del aire; μ_w , y_w corresponden a la viscosidad y la fracción mol del agua. La viscosidad está dada en $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ y la fracción mol en kg mol de aire o agua entre kilogramos totales. Una vez obtenidos Reynolds y Prandlt se obtiene el Nusselt y finalmente se despeja el coeficiente convectivo de transferencia de calor h_H .

Para el caso del coeficiente convectivo de transferencia de masa h_M está dado en función del Sherwood Ecuación 1-12; $\overline{Sh} = 0.664 Re^{1/2} Sc^{1/3}$, para $0.6 < Sc < 10$ y del Schmidt (Ecuación 1-13):

$$Sc = \frac{\mu_{ah}}{\rho_{ah} * D_{ab}}$$

La densidad y viscosidad del aire húmedo (ρ_{ah}, μ_{ah}) están definidas en las ecuaciones 3-15 y 3-16 y la difusividad molecular del vapor de agua en el aire D_{ab} ($m^2 s^{-1}$):

$$D_{ab} = \frac{2.634}{P} (T_{pro})^{3/2}$$

Ecuación 3-19

Dónde la P es la presión promedio del ambiente en Pa, y T_{pro} es la temperatura del aire en K.

3.2.1.2 CONVECCIÓN NATURAL

Las correlaciones de ingeniería para la transferencia de calor por convección libre son similares en naturaleza a las presentadas en la sección anterior para la convección forzada en flujos externos. Sin embargo, en problemas de convección natural no hay velocidad de flujo libre, sobre la cual basar un número de Reynolds (Serth & Lestina, 2014). El grupo adimensional que toma el lugar del número de Reynolds en la caracterización de la convección libre se denomina número de Grashof, Gr, y se define por la ecuación descrita por Váquiro et al., 2009:

$$Gr = \frac{gl^3 \rho_{ah} |\rho_{ah} - (\rho_{ah})_{\infty}|}{\mu_{ah}^2}$$

Ecuación 3-20

Dónde g , es la aceleración gravitacional (ms^{-2}), ρ_{ah} , es la densidad del aire a la temperatura del sólido (kgm^{-3}), $(\rho_{ah})_{\infty}$ es la densidad del aire a la temperatura del sistema (kgm^{-3}). Para la convección natural de placas horizontales, está disponibles la siguiente correlación, para la superficie superior fría o inferior superficie caliente: (Serth & Lestina, 2014):

$$Nu = 0.27(GrPr)^{1/4} \text{ para } 10^7 \leq GrPr \leq 10^{11}$$

Ecuación 3-21

En estas ecuaciones, las propiedades del fluido se evalúan nuevamente a la temperatura de la película. La longitud característica utilizada en los números de Nusselt y Grashof es el área de superficie de la placa dividida por su perímetro.

3.2.2 COMPARACIÓN DE CONSUMO ENERGÉTICO CON OTROS COMBUSTIBLES.

La sección anterior se centró en describir la metodología para calcular el requerimiento energético para secar la zarzamora por convección forzada, que involucra al secador solar tipo invernadero, y por convección natural para el secador directo. Es decir, se obtiene el calor necesario para secar un kilogramo de zarzamora. Obteniendo el dato del calor requerido se puede hacer la comparativa del requerimiento energético con otros combustibles

provenientes de fuentes fósiles implementados en la industria para deshidratar, como el gas LP, gas natural o la electricidad. Para el consumo de gas del sistema se utilizan la siguiente fórmula:

$$Gas_{req} = \frac{q}{PC_{gas} * n}$$

Ecuación 3-22

Dónde q es el calor requerido para secar un kilogramo de producto seco (MJ), PC_{gas} es el poder calorífico del gas o combustible en cuestión ($MJm^{-3}gas$) y n es la eficiencia del quemador a la altura del lugar, es importante mencionar que para el caso del quemador eléctrico la eficiencia no se ve afectada por la altura. Para determinar la eficiencia de combustión según la altura de un lugar específico se utiliza la siguiente ecuación (Carlos & Carranza, 2005) :

$$n = n_{p,atm} \left(\frac{P_{lugar}}{P_{atm}} \right)$$

Ecuación 3-23

Dónde $n_{p,atm}$ es la eficiencia del quemador a fuego directo a la presión atmosférica a nivel del mar (760 mmHg) y P_{lugar} es la presión atmosférica del sitio de estudio. Para la investigación se consideró la altura del municipio Los Reyes, Michoacán de 1,536 metros sobre el nivel del mar. Para determinar la presión atmosférica de algún sitio con diferente altura que el nivel del mar se utilizó la siguiente ecuación:

$$P_{lugar} = P_{atm} e^{-\frac{PMa g h}{RT}}$$

Ecuación 3-24

Dónde PMa , se refiere al peso molecular del aire ($kgmol^{-1}$), g , es la aceleración gravitacional (ms^{-2}), h es la diferencia de altura (m), R es la constante universal de los gases ($N m mol^{-1} K^{-1}$) y T es la temperatura del aire en K.

La siguiente tabla, muestra los valores del poder calorífico utilizados en la comparación del consumo energético de los deshidratadores solares con otros combustibles, así como su precio reportado por la Comisión Reguladora de Energía y la Comisión Federal de Electricidad para el mes de octubre del 2018, (CRE, 2018; CFE, 2018) con los que se estimó el costo por kilogramos de producto seco.

Tabla 3.10. Valores del poder calorífico y precios del diferentes combustibles

Combustible	Poder calorífico	Referencia	Precio (pesos)	Referencia
Gas LP	46.16 $MJkg^{-1}$	INECC, 2014	\$19.67 ¹	CRE, 2018
Gas natural	36.1- 43.6 MJm^{-3}	PEMEX, 2018	\$5.71 ²	CRE, 2018
Electricidad	3.6 $MJ kWh^{-1}$	SENER, 2016	\$1.53 ³	CFE, 2018

¹ Precio al público del gas LP reportado por los distribuidores, precios promedio por entidad federativa. Precio específico reportado para Michoacán de Ocampo.

² Lista de tarifas vigentes, Gas Natural del Noroeste, S. A. de C. V., Zona Geográfica de Morelia.

³ Nuevo esquema tarifario. Tarifa pequeña demanda baja tensión “TDPB” (diciembre 2017-2018), cargo fijo (\$38.27 por mes) hasta 25 kw-mes. Tarifa para el municipio de Los Reyes Michoacán, división Centro Occidente.

3.2.3 CUANTIFICACIÓN DE LAS EMISIONES DE CO₂ EVITADAS A LA ATMÓSFERA

De acuerdo a los objetivos específicos planteados (sección 2.1.2), la implementación de tecnologías solares permite evitar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero GEI, a la atmósfera, esto se hace a través de la implementación de los factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles. Para el caso de México se han desarrollado factores propios de emisiones a partir de su contenido de carbono por unidad de energía, de los principales combustibles que se consumen en el país, en los diferentes sectores, los cuales, se han utilizado para el cálculo del inventario nacional de GEI.

En la siguiente tabla se resumen los factores de emisión promedio para los combustibles seleccionados:

Combustible	Factor de emisión
Gas LP	3.00 (kg CO ₂ kg ⁻¹ de gas LP)
Gas natural	2.27 (kg CO ₂ m ⁻³ de gas natural)
Electricidad	0.582 (ton CO ₂ MWh ⁻¹)

Tabla 3.11. Factores de emisión para los combustibles: gas LP, gas natural y electricidad, desarrollados y reportados por INECC, 2014; CRE, 2017.

3.3 POTENCIAL DE ACEPTACIÓN DE LOS DESHIDRATADORES SOLARES

Para la exploración de la posible aceptación y percepciones de la tecnología de deshidratación solar, se seleccionó como herramienta de producción de datos la encuesta. Debido a cuestiones de tiempo y de recursos del proyecto, únicamente se pudo tener una interacción muy breve con los productores de zarzamora, por lo tanto, la encuesta seleccionada fue de carácter exploratoria, ofreciendo un primer acercamiento al problema, generando un panorama o conocimiento superficial respecto al tema.

3.3.1 ENCUESTA

La técnica de encuesta es ampliamente utilizada como procedimiento de investigación social, ya que permite obtener y elaborar datos de modo rápido y eficaz, es una técnica que utiliza un conjunto de procedimientos estandarizados de investigación mediante los cuales se recoge y analiza una serie de datos de una muestra de casos representativa de una población o universo más amplio del que se pretende explorar, describir, predecir y/o explicar una serie de características (Casas et al., 20013).

El objetivo de la encuesta fue conocer la primera impresión y posible aceptación de los deshidratadores solares para su implementación en la reducción de mermas agrícolas de zarzamora. Se buscó conocer las causas asociadas a la merma de la zarzamora en sus diferentes etapas de voz de los productores, asimismo, determinar las características o factores que propiciarían la aceptación y posible implementación de los deshidratadores solares en sus huertas. Y finalmente conocer la opinión respecto a los productos obtenidos por la deshidratación de la zarzamora con posible valor comercial.

Debido al carácter exploratorio de la encuesta únicamente se aplicaron a un número reducido de participantes. Se me invitó a participar en una de las reuniones internas del Sistema Producto Zarzamora⁷ (SPZ) en el marco de pláticas y mesas redondas para hacer frente a los problemas de sanidad vegetal, fitosanitarios y falta de industria de transformación que aquejan y amenazan a la producción. En la reunión figuraron actores principales de la cadena productiva de la zarzamora, desde productores, comercializadores, proveedores de insumos, etc.

Los cuestionarios se realizaron el día 6 de junio del 2018. De los 28 participantes a la reunión, únicamente se realizaron 18 cuestionarios debido a que no todos los presentes en la reunión eran productores ni actores importantes dentro de la red del SPZ. Es importante mencionar que dentro de los actores clave presentes, el representante de productores de aguacate está vinculado en la región y al SPZ debido a que también están comenzando con la producción de zarzamora. La siguiente figura muestra la descripción de cada uno de los participantes a los que se le aplicó el cuestionario.

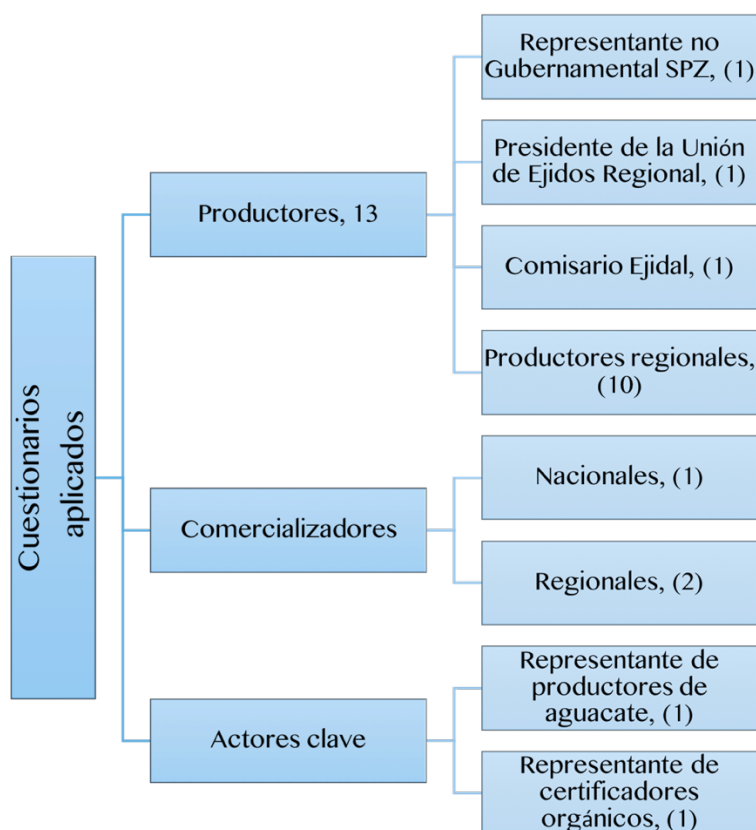


Figura 3.6. Descripción de los participantes seleccionados para la aplicación del cuestionario (n=18).

⁷ El gobierno Federal y Estatal han trabajado en la última década en fortalecer y fomentar la estrategia sistemas producto; en el año 2009 se consolida un grupo de productores (Zarzamoreros) que se apropian de la estrategia “Sistema Producto” conceptualizada en términos de visión participativa y con enfoque de sistema producto plasmado en la Ley de Desarrollo Rural Sustentable (SISPROA, 2015).

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos para cada una de las metodologías establecidas en la sección anterior. Se presentan en numeral 4.1 las condiciones ambientales de los tres secados: humedad relativa, irradiancia y temperatura y como estas variables afectan las cinéticas y la velocidad de secado (numeral 4.2 y 4.3) por tipo de tecnología, en el 4.4 se exponen la evaluación química de antioxidantes, fenoles totales, flavonoides y antocianinas asociados a las muestras frescas y deshidratadas. En la sección 4.5 se dan a conocer la transferencia de calor en el secado para la convección natural y forzada, así mismo, se muestran la valoración energética en términos económicos comparados con otros combustibles (gas LP, gas natural y electricidad) y las emisiones de CO₂ evitadas a la atmósfera. Finalmente, en el apartado 4.6 se expone el análisis de los cuestionarios.

4.1 CONDICIONES TERMODINÁMICAS

Como se vio en la sección 3.1.1, las evaluaciones de la deshidratación por las tecnologías solares se llevaron a cabo en diferentes días, 16 y 17 de junio para el primer secado, 21-22 de junio para el segundo secado y finalmente 5-6 de julio para el tercer secado. Para determinar la influencia de las diferentes variables ambientales en el secado se presentan los resultados para cada prueba.

4.1.1 HUMEDAD RELATIVA E IRRADIANCIA

La *Tabla 4.1* muestra las condiciones de humedad relativa, irradiancia e irradiación para las tres pruebas de secado por los métodos SSD y SSI. Es importante mencionar que al final del primero y tercer secado se presentaron lluvias, lo que incurrió en una elevada humedad relativa. Las condiciones de humedad al interior del secador tipo invernadero y las locales (exterior) no fueron significativamente diferentes para el segundo y tercer secado (>3%). La condición de máxima irradiancia solar en las tres pruebas se tiene para el tercer secado (correspondiente a una radiación de energía solar de 930 Wm⁻²) y por lo tanto la mayor irradiación (de 33.9 MJm⁻²).

Tabla 4.1. Condiciones de humedad relativa, irradiancia e irradiación para los tres secados.

Secado	Humedad relativa (%)		Irradiancia (Wm ⁻²)				Irradiación (MJm ⁻²)	
	Exterior*	Invernadero (SSI)	Exterior*		Invernadero (SSI)		SSD	SSI
			Mín-Máx	Promedio	Mín-Máx	Promedio		
Primero	51.7±10.0	Nd	316 - 850	677	208 - 484	385	31.81	18.01
Segundo	24.2±9.8	24.8±8.4	277 - 849	648	158 - 479	375	19.11	10.99
Tercero	34.6±11.1	31.3±16.7	116 - 930	604	56 - 478	446	33.90	19.28

*Datos ambientales; Nd: No disponible por falla en el sistema; SSI: Secado Solar Invernadero; SSD: Secado Solar Directo

4.1.2 TEMPERATURA DEL SECADO

La *Tabla 4.2* muestra las variaciones de temperatura (promedios y máximas), dentro de las cámaras de secado de SSD y el SSI. El dispositivo de secado solar directo obtuvo temperaturas de secado promedio de 49.29 ± 11.3 °C (para las tres pruebas). Para el caso del secador solar tipo invernadero, la temperatura promedio de la cámara es de 42.02 °C y únicamente muestra variaciones de 5 °C en las tres pruebas, manteniendo una temperatura estable.

Tabla 4.2. Temperatura promedio y máx. para SSD y SSI

Secado	Temperatura promedio (°C)		Temperatura máx. (°C)	
	SSD*	SSI*	SSD*	SSI*
Primero	57.65 ± 12.8	44.48 ± 4.0	75.0	47.9
Segundo	45.84 ± 10.6	44.21 ± 4.8	53.3	48.3
Tercero	44.38 ± 10.5	37.39 ± 6.2	58.9	48.0

*Condiciones medidas al interior de la cámara del secador solar directo (SSD) y del secador solar tipo invernadero (SSI)

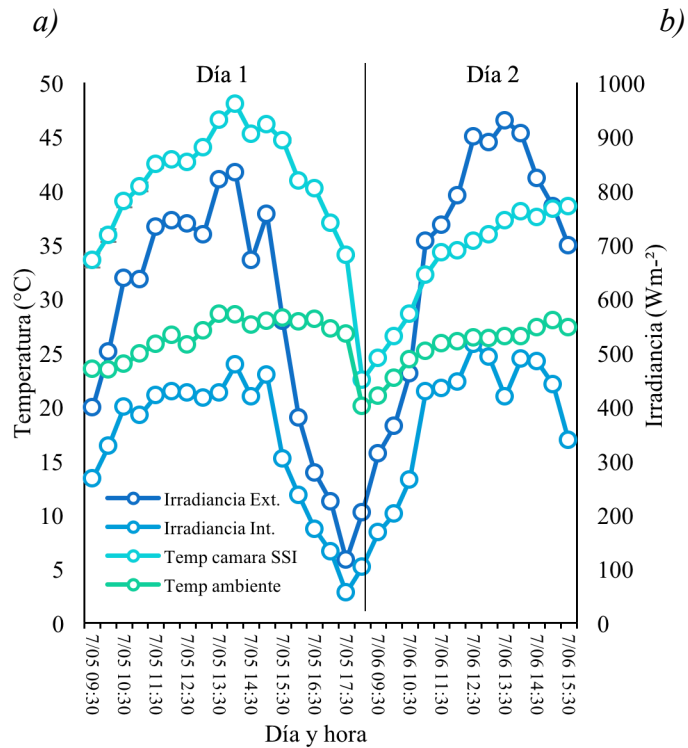
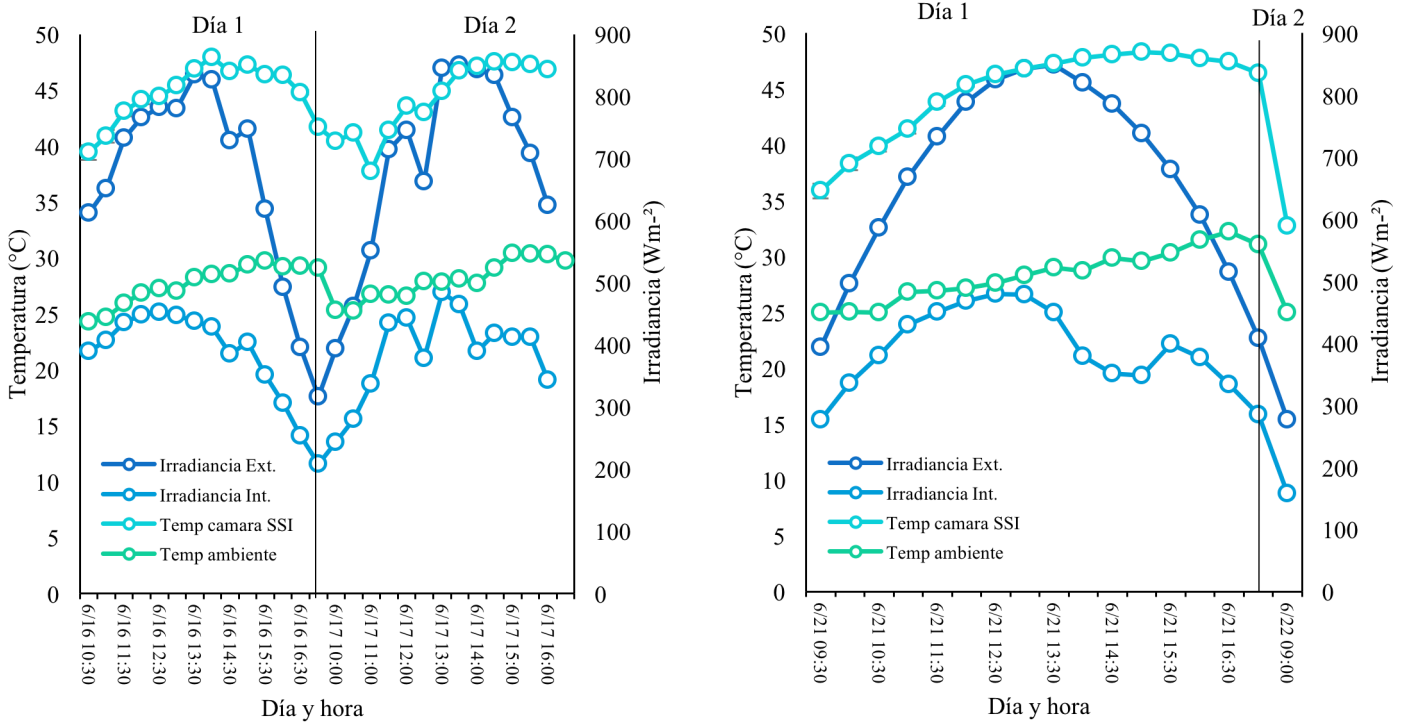
4.1.2.1 SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO (SSI)

En la *Figura 4.1 (a, b, c)* se observa la variación de las irradiancias y temperaturas al interior de la cámara de secado del SSI y su correspondencia con los datos ambientales para las pruebas de secado. De forma general la irradiancia al interior del invernadero corresponde a 0.59 veces la irradiancia exterior, es decir, pasa solamente poco más de la mitad de la energía de radiación solar. En el caso de la temperatura al interior de la cámara de secado del Invernadero, se muestra el efecto de los calentadores solares de aire (convección forzada) en el incremento de la temperatura del aire utilizada para secar la zarzamora, correspondiente a 1.53 veces más que la temperatura registrada para el ambiente, lo que representa un incremento de la temperatura (ΔT) de $10-15$ °C.

De acuerdo a la *Figura 4.1* las temperaturas e irradiancias máximas registradas al interior de la cámara para el primer día de secado corresponden a 47.9 °C y 484 Wm^{-2} , y una irradiancia exterior máxima de 850 Wm^{-2} . Para el segundo día la temperatura máxima fue de 48.3 °C y una irradiancia máxima de 479 y 849 Wm^{-2} al interior y exterior de la cámara. El tercer secado la temperatura máxima fue 48 °C con irradiancias máximas de 478 y 930 Wm^{-2} al interior y exterior de la cámara.

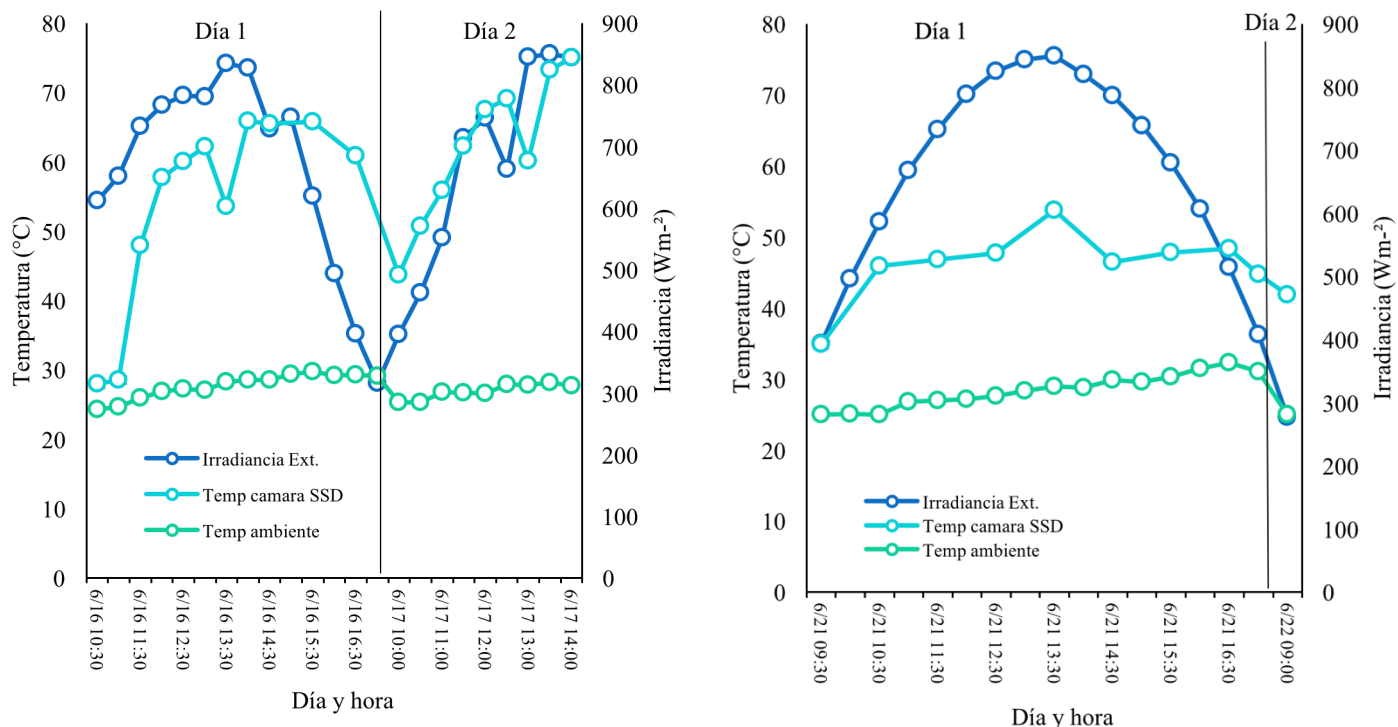
4.1.2.2 SECADO SOLAR DIRECTO (SSD)

En la *Figura 4.2 (a, b y c)* se observa la variación de la temperatura al interior de la cámara del secador de acrílico directo (SSD). La temperatura del aire al interior de la cámara del secador directo incrementa en 1.7 veces la temperatura del aire ambiente. Las condiciones máximas de irradiancia y temperatura para el primer secado fueron de 75 °C y 850 Wm^{-2} , para el segundo secado de 53.3 °C y 849 Wm^{-2} , y del tercer secado de 58.9 °C y 930 Wm^{-2} .



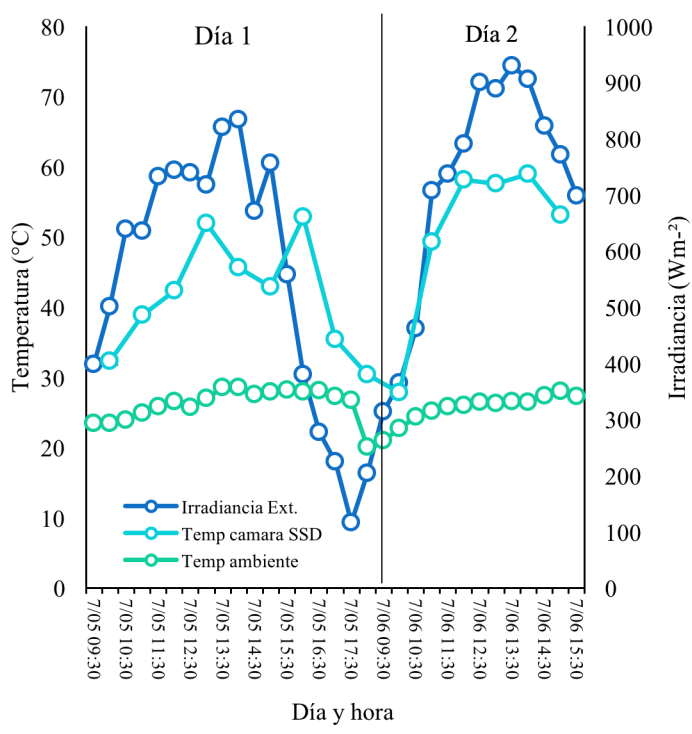
c)

Figura 4.1. Valoración de las condiciones climáticas de a) primer secado 16 y 17 de junio; b) segundo secado 21 y 22 de junio; c) tercer secado 5 y 6 de julio del 2017, irradiancia y temperatura al interior de la cámara del Secador Solar tipo Invernadero (SSI) y los registrados al exterior (ambientales).



a)

b)



c)

Figura 4.2. Valoración de las condiciones climáticas de a) primer secado 16 y 17 de junio; b) segundo secado 21 y 22 de junio; c) tercer secado 5 y 6 de julio del 2017, temperatura al interior de la cámara del Secador Solar Directo (SSD), irradiancia y temperatura ambiente.

4.2 CINÉTICA DE SECADO DE LA PULPA DE ZARZAMORA

Las pruebas para el SSI se realizaron con convección forzada de 0.5 ms^{-1} , los tiempos de secado fueron 840, 600 y 960 minutos para SSI-1,2,3 (*Figura 4.3*) correspondientes a 14, 10 y 16 horas de exposición solar, las variaciones se debieron a las condiciones climáticas específicas para cada día de experimentación. Para todas las gráficas de la cinética de secado presentadas se utilizó la *Ecuación 1-3* que describe la pérdida de peso normalizado “ W ” con respecto al tiempo. Al final del proceso de secado en invernadero con convección forzada el contenido de humedad fue de 0.38, 0.48 y 0.26 g de agua por gramo de sólido seco ($\text{g H}_2\text{O g}^{-1} \text{ s.s.}$).

Las pruebas de SSD se realizaron por convección natural, en la *Figura 4.4* se observan los tiempos de secado para las pruebas del SSD, que fueron 720, 600 y 960 minutos para SSD-1,2,3 correspondientes a 12, 10 y 16 horas de exposición solar, con humedades finales de 0.37, 0.47 y 0.26 $\text{g H}_2\text{O g}^{-1} \text{ s.s.}$ Al hacer la comparación de las tecnologías de secado SSI y SSD, se observa que para ambas el tiempo de secado de mayor prolongación correspondió al tercer secado de 960 min.

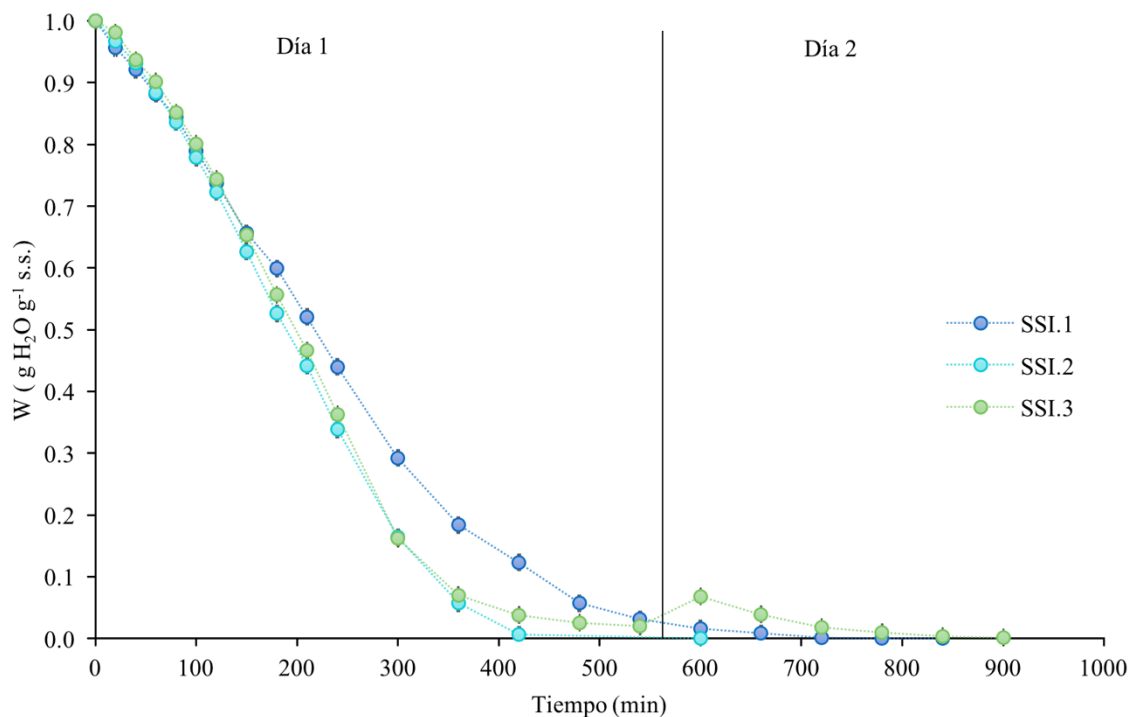


Figura 4.3. Cinética de Secado Solar tipo Invernadero (SSI) para las tres pruebas (1,2,3) de la pulpa de zarzamora.

En la *Figura 4.5* se muestra la relación del tiempo de secado promedio y el contenido de humedad final (menos de 32% X_b s) por los diferentes métodos de secado de la pulpa de zarzamora. La referencia de las cinéticas está dada por el secado en estufa (SE) en color naranja, el cual tuvo una duración de secado de 480 minutos a 60°C y convección forzada de 1 ms^{-1} , el contenido de humedad final fue de $0.31 \text{ g H}_2\text{O g}^{-1} \text{ s.s.}$ De acuerdo con el tiempo de

secado la tecnología que representa una mejor opción es el secado en estufa, sin embargo, las humedades finales obtenidas por las tecnologías solares representan una mejor opción.

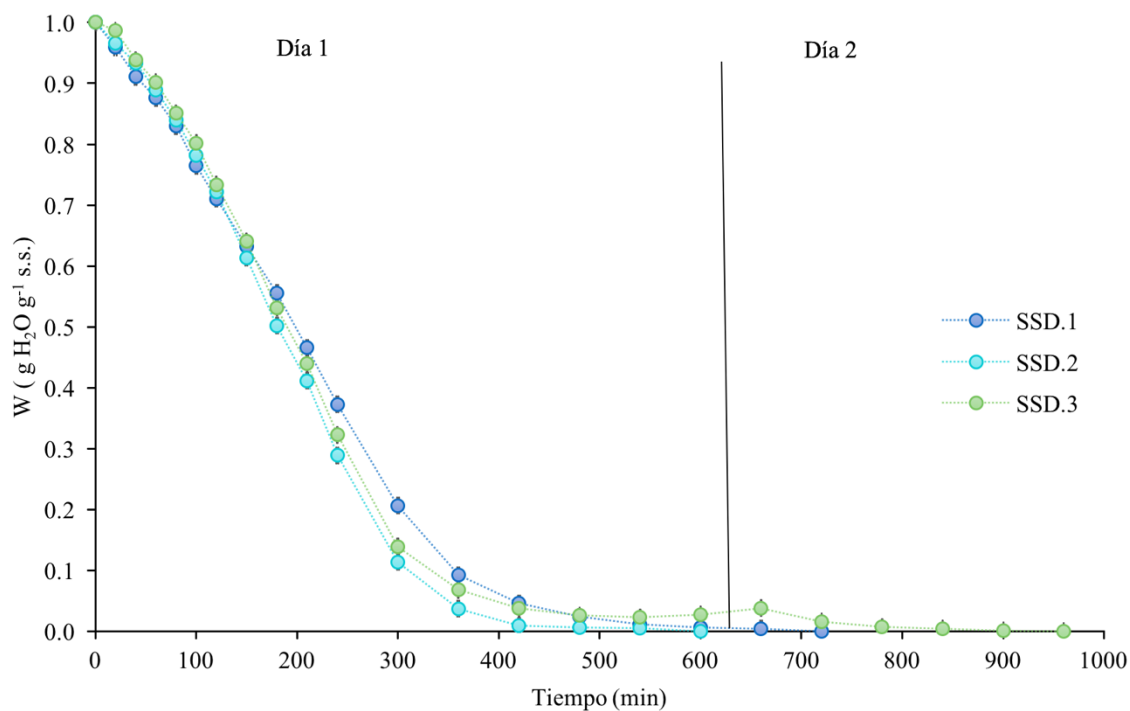


Figura 4.4. Cinética de Secado Solar Directo (SSD) de la pulpa de zarzamora

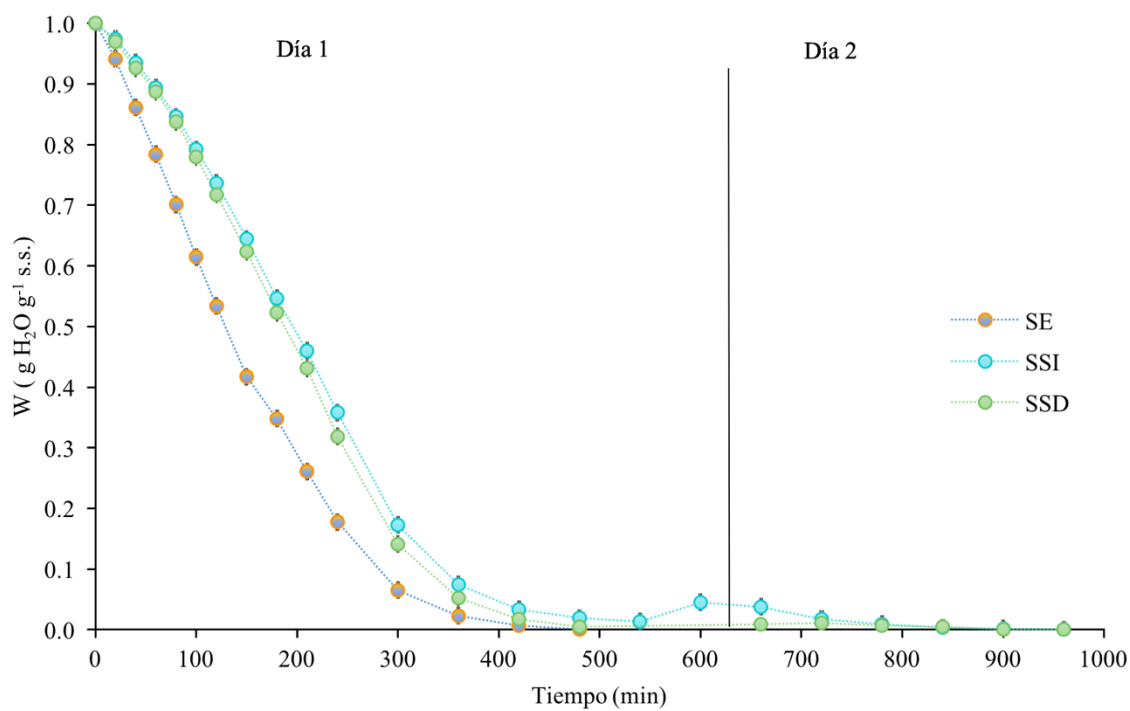


Figura 4.5. Cinética de secado solar por diferentes métodos: SSI, SSD y referencia de cinética de secado en estufa (SE).

4.3 VELOCIDAD DE SECADO

4.3.1 SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO

Las velocidades de secado para la tecnología solar tipo invernadero están representadas en la *Figura 4.6*, se observan los resultados para las tres pruebas de secado con velocidad de aire al interior de la cámara de 0.5 ms^{-1} . Las velocidades máximas de secado para el SSI-1, 2 y 3 fueron respectivamente 0.0027 , 0.0034 y 0.0034 gramos de H_2O por gramo de sólido seco por minuto ($\text{g H}_2\text{O g}^{-1} \text{ s.s. min}^{-1}$). En ninguna de las tres pruebas se presentó un periodo de velocidad constante, lo que si se observó es un periodo de acondicionamiento muy prologando, hasta aproximadamente una humedad normalizada promedio de $0.55 \text{ g H}_2\text{O g}^{-1} \text{ s.s.}$, para las pruebas SSI-2,3. Esto se debe a que, al principio, la pulpa de zarzamora está a una temperatura inferior a la cámara de secado y la velocidad de evaporación va en aumento hasta que la superficie alcanza su valor de equilibrio (Geankoplis, 1998).

Después de alcanzar la humedad de 0.55 ($X_{c_{SSI}}$) $\text{g H}_2\text{O g}^{-1} \text{ s.s.}$ correspondiente al contenido crítico de humedad libre comienza el periodo de velocidad decreciente. Se destacó un periodo de velocidad decreciente, dónde la superficie ya no está totalmente mojada, y la porción mojada comienza a disminuir durante el periodo de velocidad decreciente hasta que la superficie queda seca en su totalidad.

En el periodo de velocidad decreciente el plano de evaporación comienza a desplazarse con lentitud por debajo de la superficie. El calor de evaporación se transfiere a través del sólido hasta la zona de vaporización. El agua evaporada atraviesa el sólido para llegar hasta la corriente de aire. El proceso de transferencia de masa que rige ambos periodos decrecientes es la difusión (Rotstein et al., 1997).

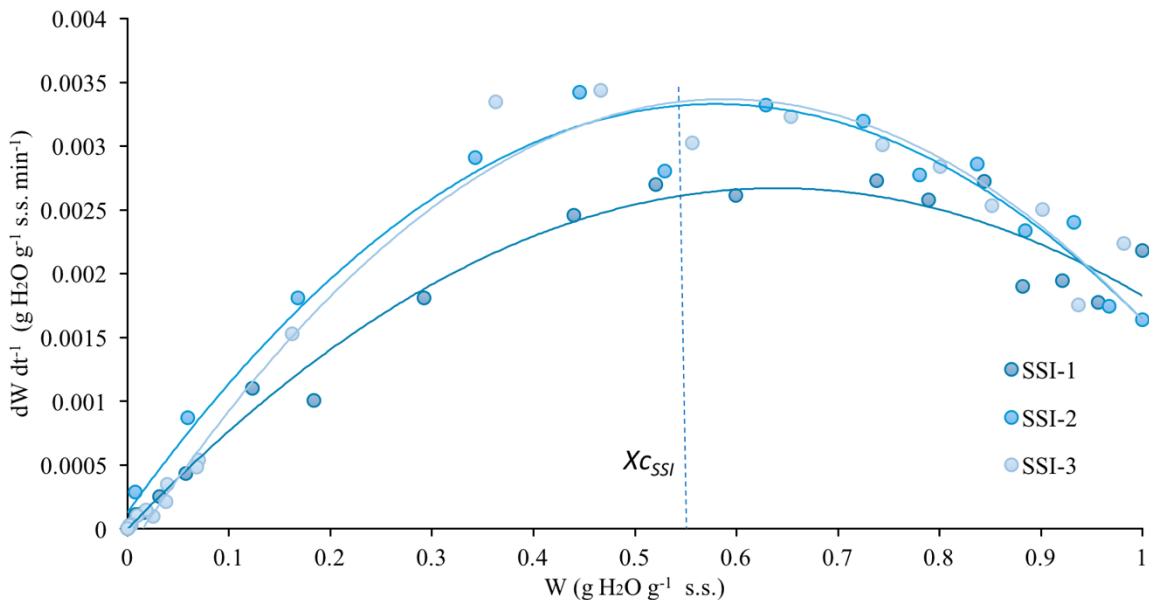


Figura 4.6. Velocidad de secado de la pulpa de zarzamora en el SSI

4.3.2 SECADOR SOLAR DIRECTO

En la *Figura 4.7* se muestran las velocidades de secado para las tres pruebas del secador solar directo con convección natural. Las velocidades máximas de secado fueron 0.0032, 0.0034 y 0.0038 ($\text{g H}_2\text{O g}^{-1} \text{ s.s. min}^{-1}$) para el SSD-1,2 y 3 respectivamente. Se apreció el mismo comportamiento que en el SSI, es decir un periodo de calentamiento de la muestra (o acondicionamiento) hasta una humedad normalizada promedio de 0.52 $\text{g H}_2\text{O g}^{-1} \text{ s.s.}$ para el SSD-1,2,3 respectivamente. Y posteriormente se observó una velocidad de secado decreciente continua con el tiempo de secado. Esto se debe a que el movimiento de la humedad dentro de la pulpa se encuentra controlada por el proceso difusivo (Janjai et al., 2010; Vidaña, 2016).

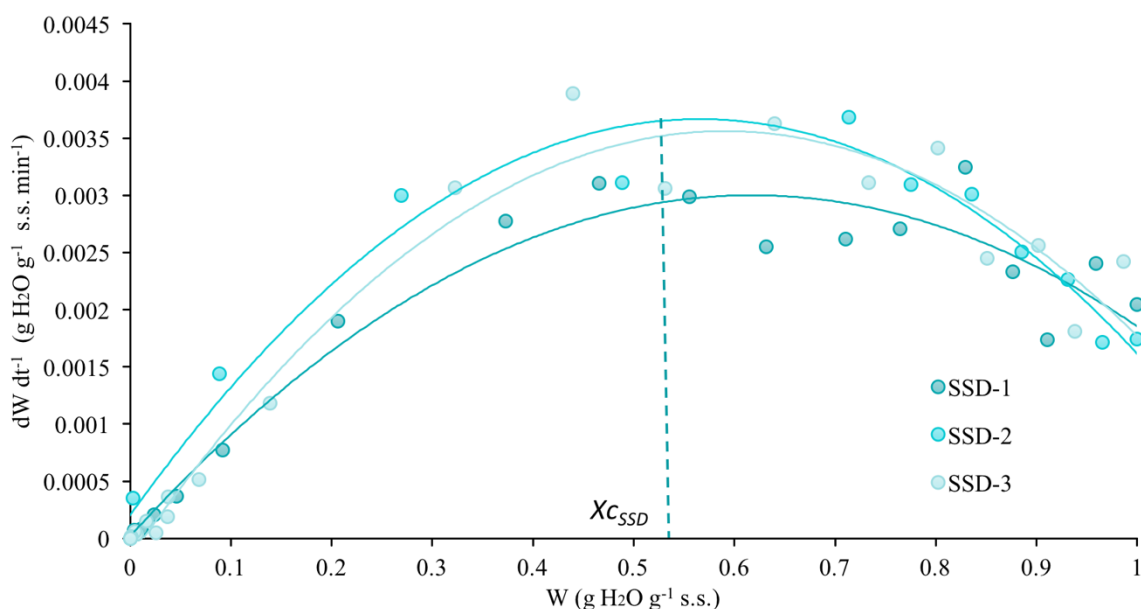


Figura 4.7. Velocidad de secado de la pulpa de zarzamora en el SSD

4.3.3 SECADO EN ESTUFA (CONDICIONES CONTROLADAS)

Se muestran los resultados obtenidos para las pruebas de secado en estufa de la pulpa de zarzamora a 60°C y 1ms^{-1} en la *Figura 4.8*. A diferencia que, en las tecnologías solares, se puede distinguir un periodo de velocidad constante, partiendo de la humedad inicial hasta un contenido de humedad normalizada promedio de 0.72 $\text{g H}_2\text{O g}^{-1} \text{ s.s.}$ Durante este periodo, la superficie del sólido está muy mojada y sobre ella hay una película de agua continua. Esta capa de agua es agua no combinada y actúa como si el sólido no estuviera presente. La velocidad de evaporación con las condiciones establecidas para el proceso, es independiente del sólido y esencialmente igual a la velocidad que tendría una superficie líquida pura. Debido a que el material de la pulpa de zarzamora es poroso, la mayor parte del agua que se evapora durante el periodo de velocidad constante proviene de su interior (Geankoplis, 1998), posteriormente se distingue un periodo de velocidad decreciente.

Las velocidades máximas fueron de 0.0037, 0.0042 y 0.0045 ($\text{g H}_2\text{O g}^{-1} \text{ s.s. min}^{-1}$) para el secado SE1, 2 y 3. La velocidad del aire influyó de manera positiva el tiempo de secado en las muestras, reduciendo el tiempo total de las muestras dentro de la estufa.

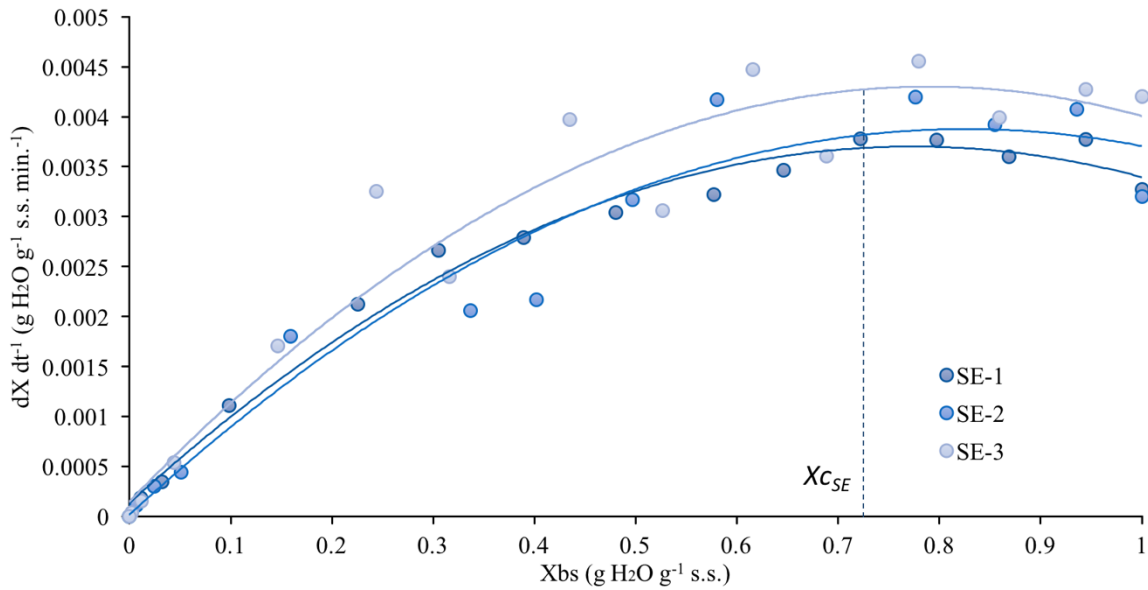


Figura 4.8. Velocidad de secado de la pulpa de zarzamora en el SE

4.3.4 COMPARATIVA DE SECADOS

Se muestra en la Figura 4.9 la comparativa de las velocidades promedio de secado por las tecnologías solares (SSI y SSD) y la referencia bajo condiciones controladas en la estufa (SE). Como se ha descrito en los numerales anteriores, la velocidad de secado promedio desde la humedad inicial hasta la humedad crítica es mayor para el SE, debido a la influencia de la convección forzada dentro de la cámara de secado. Las humedades críticas promedio para cada tecnología corresponden a 0.52, 0.55 y 0.72 g H₂O g⁻¹ s.s., para SSD, SSI y SE. Después de esta humedad las velocidades de secado en las tres tecnologías son similares.

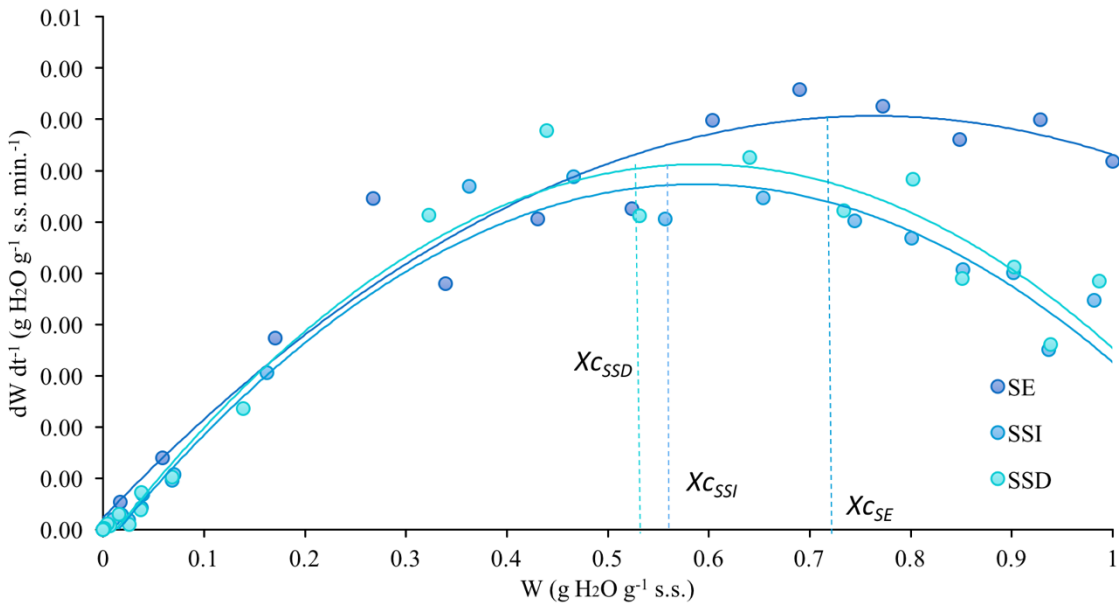


Figura 4.9. Comparativa de la velocidad de secado de la pulpa de zarzamora

4.4 PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS Y ANTIOXIDANTES DE LA ZARZAMORA

4.4.1 CAPACIDAD ANTIOXIDANTE

Se evaluó la actividad antioxidante de la zarzamora por el método 2,2-Difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH), descrito en la sección 3.1.4. En la *Figura 4.10* se presentan la actividad antioxidante en la pulpa de zarzamora de la muestra fresca y deshidratada por los diferentes métodos. La muestra fresca contiene 20.22 ± 2.94 mg de ácido ascórbico equivalente por gramo de sólido seco (mg AAE g^{-1} s.s.) y *en promedio las muestras deshidratadas pierden el 70% de su capacidad antioxidante comparadas con las muestras frescas*. La actividad antioxidante en la zarzamora deshidratada por SSI y SSD (5.86 ± 0.51 y 5.80 ± 0.39 mg AAE g^{-1} s.s.) y SE (5.28 ± 0.32 mg AAE g^{-1} s.s.) no hay diferencia significativa en la actividad antioxidante por efecto de la tecnología.

En la *Figura 4.11 a*) se muestra la concentración de la actividad antioxidante en cada una de las tres pruebas para cada una de las tecnologías de secado. Se muestra la influencia de la irradiancia promedio del día sobre la capacidad antioxidante total de las muestras. Para el SSI y el SSD las muestras 1 y 3 se muestran afectadas por la influencia de la irradiancia, con una correlación inversamente proporcional, a mayor irradiancia menor actividad antioxidante, a menor irradiancia mayor actividad antioxidante. Sin embargo, la muestra 2 del SSI y el SSD, parece no sigue esta tendencia. Algunos estudios han referido el efecto negativo de la luz solar sobre la actividad antioxidante de verduras y frutas (Lee et al., 2004; Lik et al., 2012).

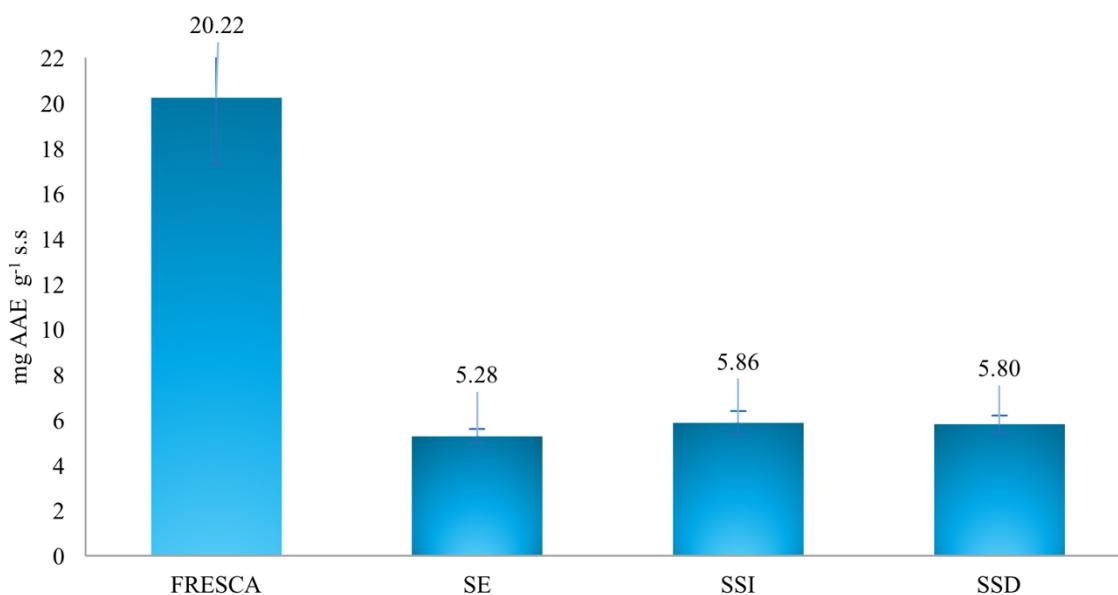


Figura 4.10. Concentraciones de la actividad antioxidante de la pulpa de zarzamora fresca y deshidratada por las diferentes tecnologías.

En la *Figura 4.11 b*) se muestra la influencia de la temperatura sobre la actividad antioxidante, para cada una de las pruebas secadas por las diferentes tecnologías. Se muestra el efecto por la influencia de la temperatura dando una correlación inversamente proporcional, es decir, existe una sensibilidad a la degradación térmica. Las muestras sometidas a una mayor temperatura promedio de secado corresponden a las concentraciones

más bajas de la actividad antioxidante. Las muestras deshidratadas en la estufa eléctrica a 60 °C, son las que tienen una menor actividad antioxidante. Estos resultados son similares a los obtenidos por López et al. (2013) en su estudio con áradano dorado y el efecto de la temperatura de deshidratación en las propiedades fisicoquímicas, donde sus resultados mostraron una degradación del 45% de la de la capacidad antioxidante con respecto a la muestra fresca (las muestras fueron deshidratada en estufa a 50, 60, 70, 80 y 90 °C).

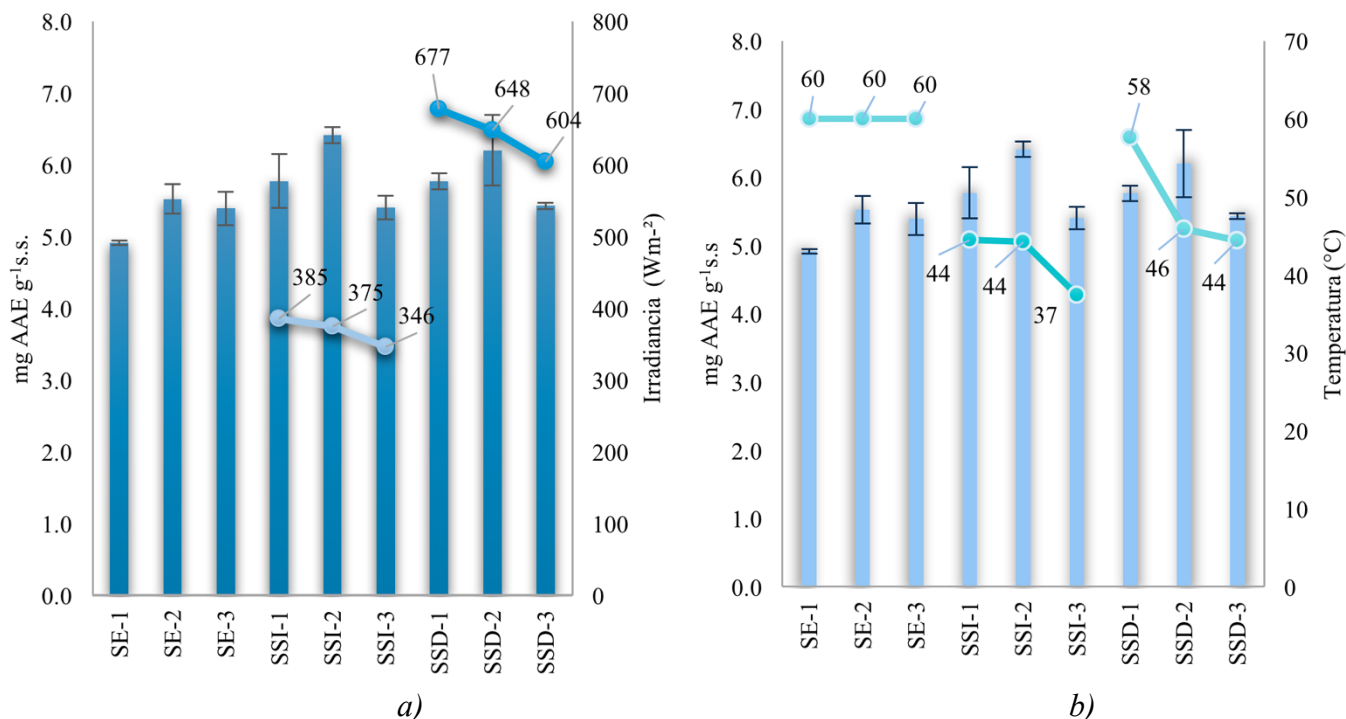


Figura 4.11. Capacidad antioxidante de la pulpa de la zarzamora deshidratada y su efecto con a) irradiancia y b) temperatura

4.4.2 FENOLES TOTALES

Los resultados de las concentraciones de fenoles totales se muestran en la Figura 4.12. Se observa la concentración en la muestra de pulpa de zarzamora fresca correspondiente a 63.41 ± 2.40 miligramos de ácido gálico equivalente por miligramo de sólido seco ($\text{mg AGE g}^{-1} \text{s.s.}$). Los promedios de concentraciones en las tecnologías solares son muy similares de 41.47 ± 3.14 y 41.04 ± 4.92 $\text{mg AGE g}^{-1} \text{s.s.}$, para el SSI y SSD respectivamente. Se obtuvo la menor concentración de fenoles totales en el SE con una concentración de 36.11 ± 2.93 $\text{mg AGE g}^{-1} \text{s.s.}$ Las tecnologías solares muestran una disminución del 35% de los fenoles totales con respecto a la muestra fresca y para el caso del secado en estufa presenta una degradación del 43%.

El efecto por la irradiancia en las concentraciones de fenoles totales es similar al obtenido para la capacidad antioxidante. Las muestras que estuvieron sometidas a una menor irradiación corresponden a las de mayor concentración para cada una de las tecnologías solares (Figura 4.13). El efecto por temperatura también está presente y se manifiesta con respuesta igual a la actividad antioxidante. Es decir, las muestras sometidas a una mayor temperatura de secado, como el SE, son las correspondientes a las menores concentraciones

de fenoles totales. Estos resultados se contraponen a los obtenidos por Lutz et al. (2015); dónde el contenido de fenoles totales de la zarzamora deshidratada incrementó de 22.1 ± 0.6 mg AGE g^{-1} para la muestra fresca a 126.3 ± 1.3 mg AGE g^{-1} para la muestra deshidratada a $60^\circ C$, sin embargo, los resultados que muestran no están expresados por gramo de sólido seco.

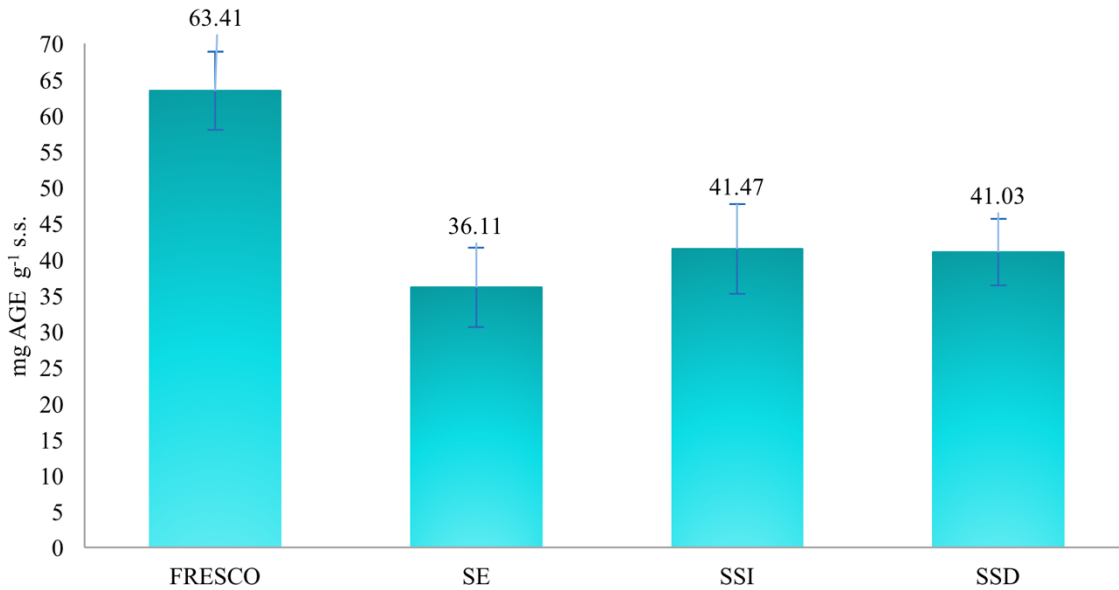


Figura 4.12. Concentraciones de fenoles totales de la pulpa de zarzamora fresca y deshidratada por las diferentes tecnologías

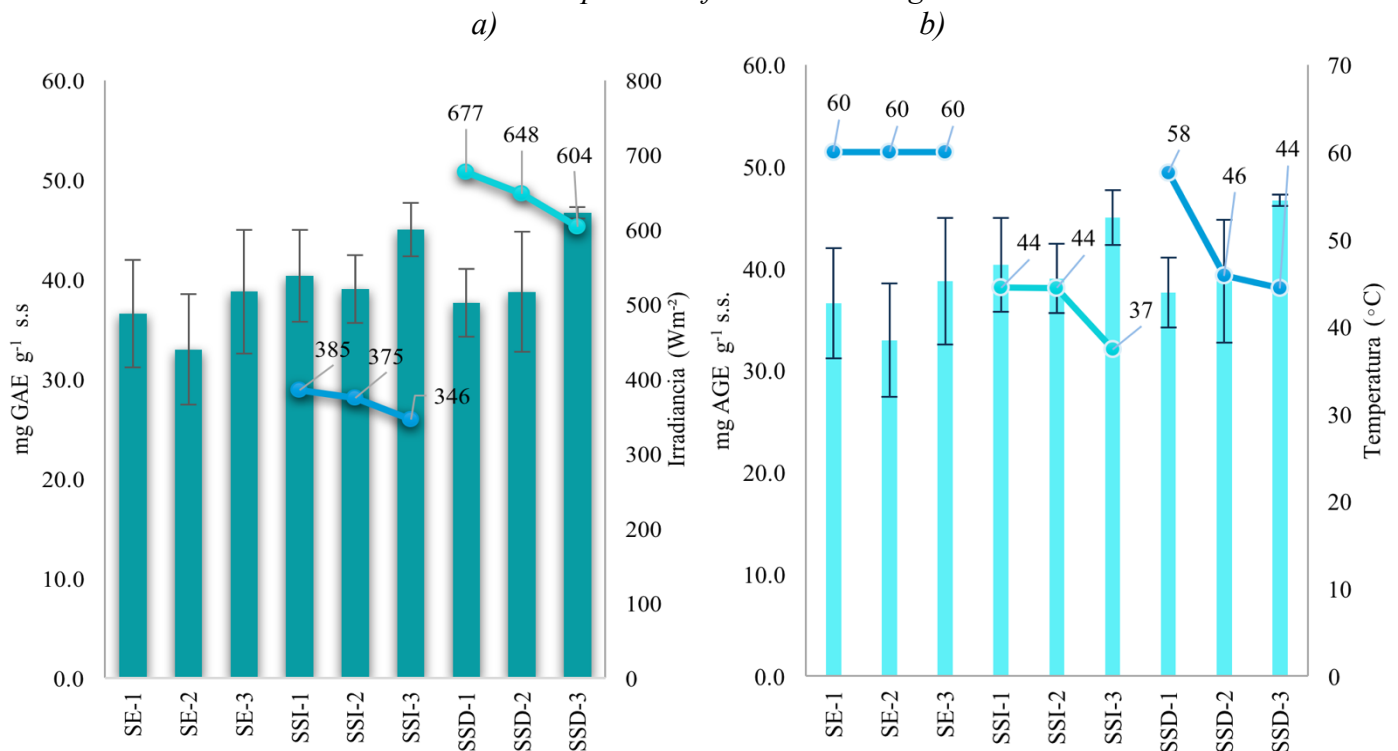


Figura 4.13. Fenoles totales de la pulpa de la zarzamora deshidratada y su efecto con a) irradiancia y b) temperatura

4.4.3 FLAVONOIDES

La Figura 4.14 muestra el contenido de flavonoides totales en la pulpa de zarzamora de la muestra fresca y deshidratada. La muestra fresca contiene 12.17 ± 0.79 mg de quercentina equivalente por gramo de sólido seco (mg QE g^{-1} s.s.). Las muestras deshidratadas por las tecnologías SSI, SSD y SE contienen 10.53 ± 0.46 , 9.94 ± 0.21 y 8.89 ± 0.24 mg QE g^{-1} s.s. En promedio, el total de flavonoides en las muestras deshidratadas se degrada un 20% en comparación con muestras frescas.

La Figura 4.15 se muestra la influencia de la irradiancia promedio en el contenido total de flavonoides. Se observó una correlación de las concentraciones para las muestras que se sometieron a una irradiancia promedio más alta, lo que resultó en una concentración más baja de flavonoides totales. De la misma manera, la Figura 4.15 b) se observa la influencia de la temperatura promedio del día sobre la concentración de flavonoides totales presentes.

Se observa un mayor efecto debido a la temperatura, ya que las muestras deshidratadas en la estufa eléctrica a 60°C son aquellas que tienen una concentración más baja. Dentro de las cámaras de secado de SSI y SSD, las muestras que fueron sometidas a una temperatura promedio más alta son aquellas que muestran una menor concentración de flavonoides. Este efecto ha sido reportado por Madrau et al. (2009), donde evidencia el proceso de degradación por temperatura de chabacanos (*prunus armeniaca*), las muestras secadas a 55°C y 70°C presentan una disminución en la concentración de 24% y 64% respectivamente, en relación a la muestra fresca.

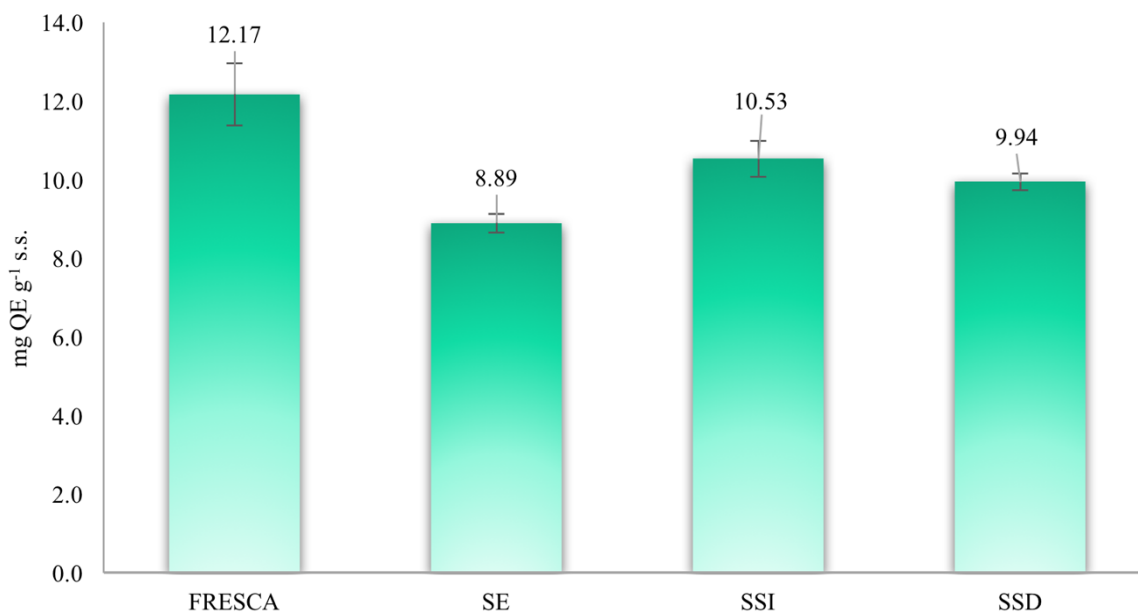


Figura 4.14. Concentraciones de los flavonoides de la pulpa de zarzamora fresca y deshidratada por las diferentes tecnologías.

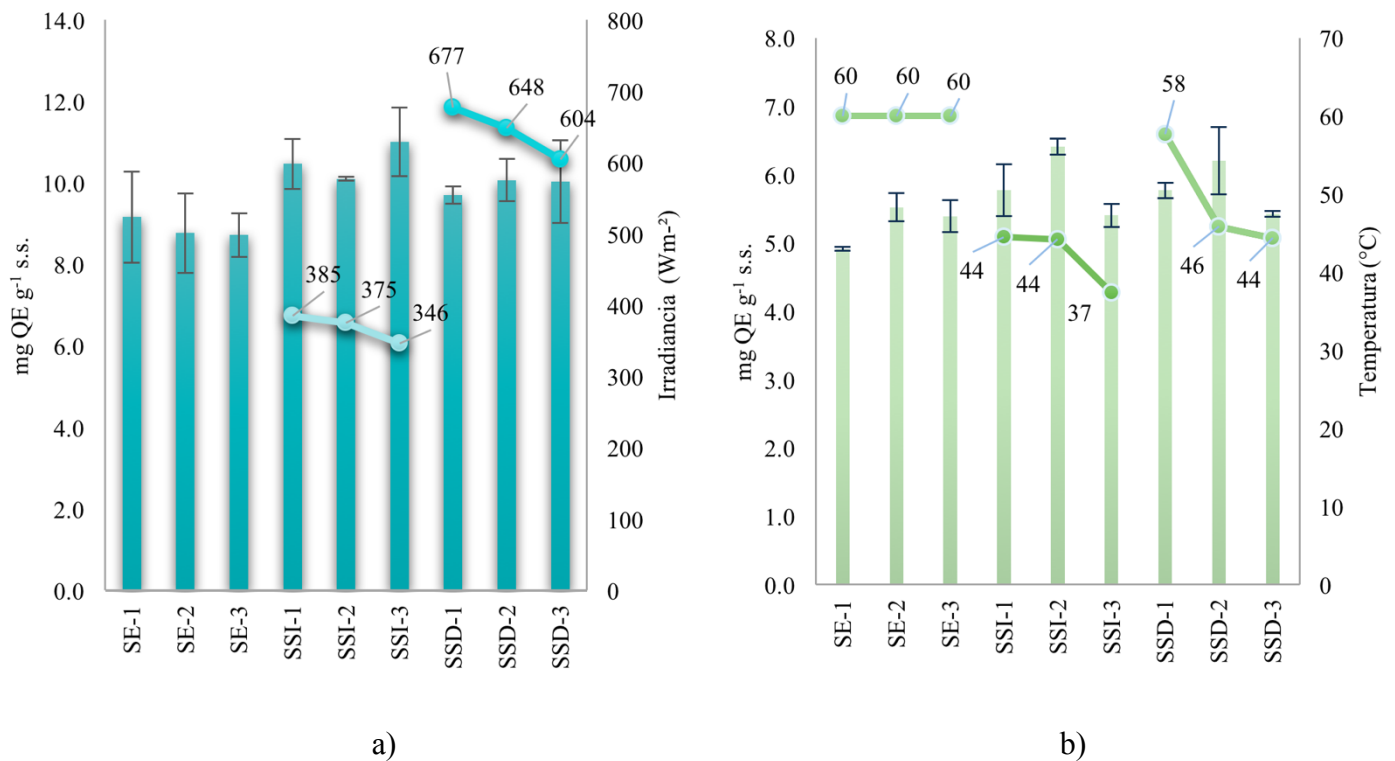


Figura 4.15. Flavonoides de la pulpa de la zarzamora y su efecto con a) irradiancia y b) temperatura

4.4.4 ANTOCIANINAS

Las concentraciones de antocianinas se muestran en la Figura 4.16, las muestras frescas presentan una concentración promedio de 2.42 ± 0.44 mg de cianidin 3-glucosido equivalente por g de sólido seco ($\text{mg C}_3\text{GE g}^{-1}$ s.s.). Las muestras deshidratadas contienen 0.53 ± 0.09 ; 0.25 ± 0.09 y 0.15 ± 0.05 $\text{mg C}_3\text{GE g}^{-1}$ s.s., para las tecnologías de SE, SSI y SSD. Se observa una pérdida de las antocianinas para todas las muestras, el secado en estufa representa una pérdida del 78%, y las tecnologías solares una disminución del 90% y 93% para SSI y SSD con relación a las muestras frescas.

El efecto de la irradiancia y la temperatura en las antocianinas (Figura 4.17) es contrario a las obtenidas para actividad antioxidante, fenoles totales y flavonoides, ya que las muestras en estufas son las que presentan una menor degradación. Es decir, el efecto por degradación térmica es menor al efecto por degradación por exposición a la luz, debido a que dentro de la cámara de secado del SE están en la oscuridad. El papel fotoprotector de las antocianinas ha sido descrito (Gould et al. 1995; Krol et al. 1995; Adir et al. 2003) dónde las antocianinas protegen a las células de los efectos adversos de la luz intensa, adicionalmente del exceso de radiación visible, las antocianinas también se han relacionado con la protección contra la radiación ultravioleta (UV) (Hatier & Gould, 2009).

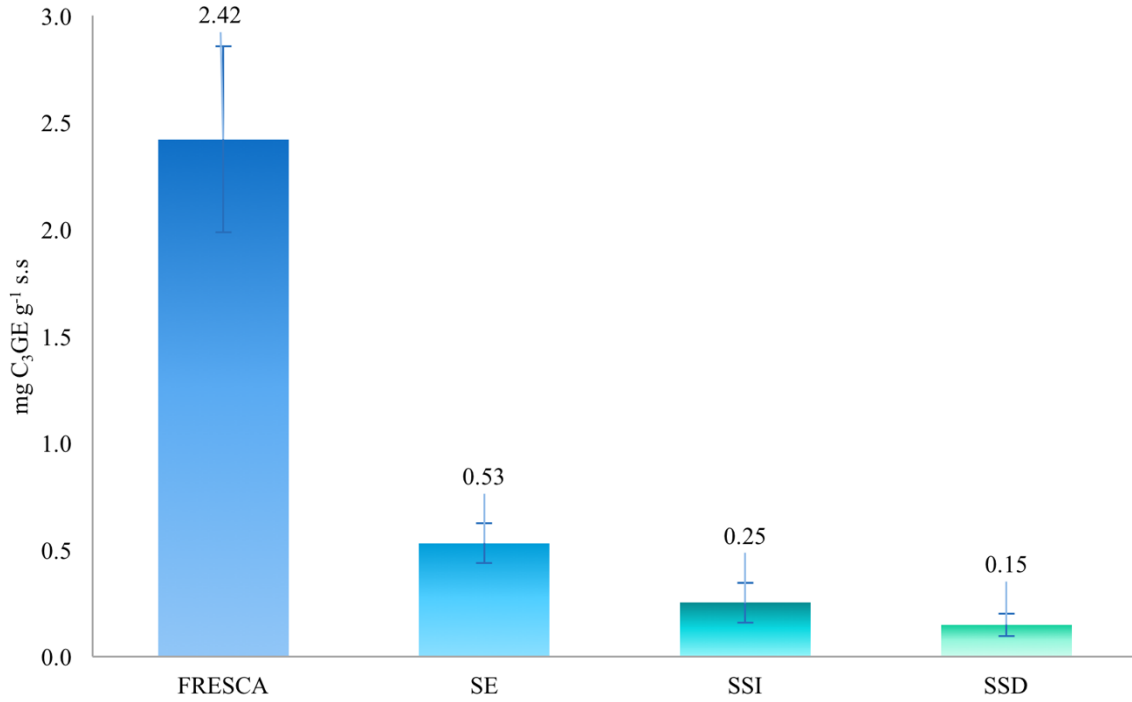


Figura 4.16. Concentraciones de antocianinas de la pulpa de zarzamora fresca y deshidratada por las diferentes tecnologías.

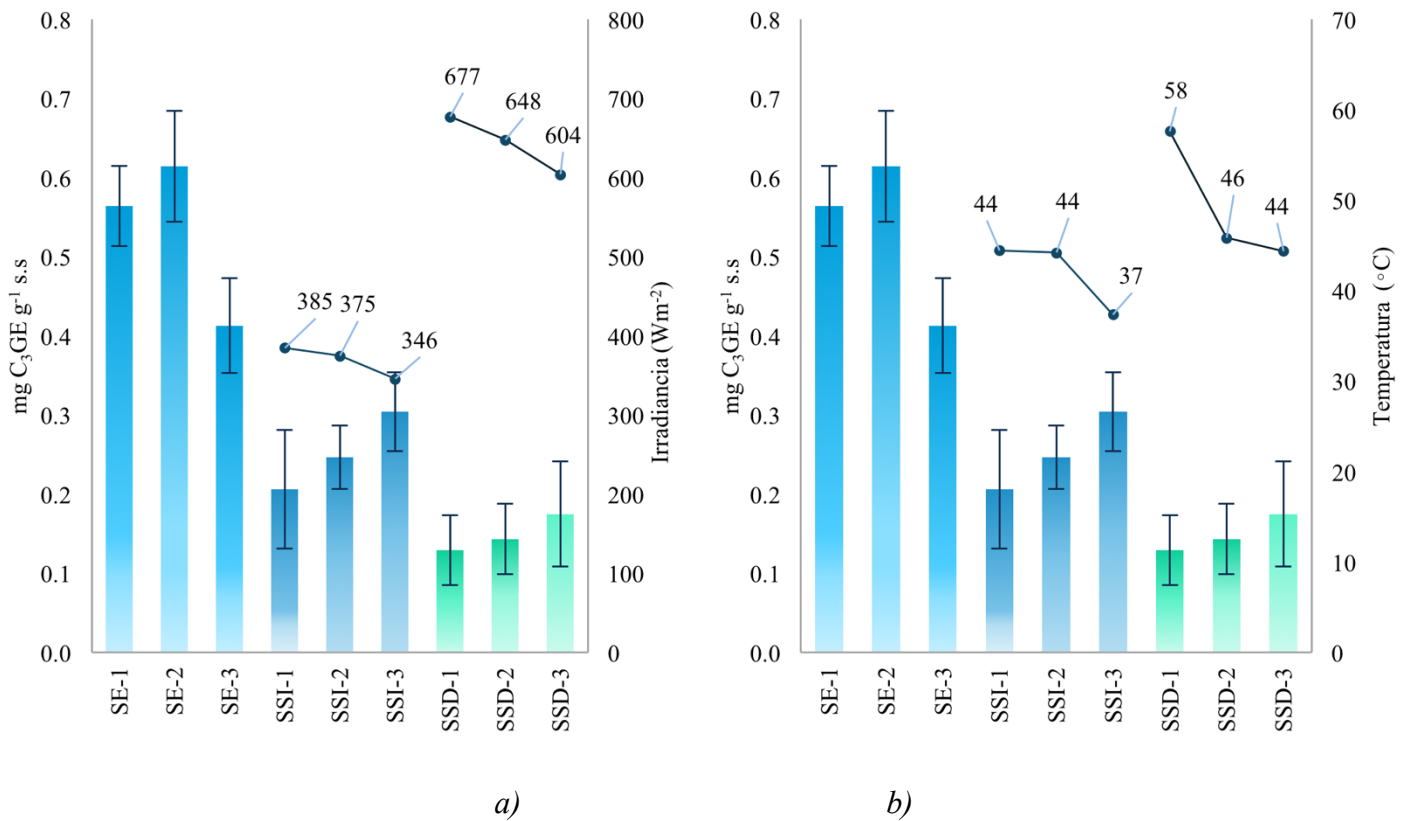


Figura 4.17. Antocianinas de la pulpa de zarzamora y su efecto con a) irradiancia y b) temperatura

4.5 TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL SECADO

Como se describió en la sección 3.2, la cuantificación energética del secado permitirá conocer en términos de eficiencia cuál de las tecnologías supone un mayor ahorro en cuanto a su comparación con combustibles procedentes de fuentes fósiles y en términos de las emisiones de CO₂ evitadas. La cuantificación del calor implicada para secar un kilogramo de muestra es la medida que nos permitirá abordar estos objetivos.

4.5.1 CONVECCIÓN FORZADA

La tecnología solar tipo invernadero y el secado en estufa operaron bajo condiciones de convección forzada a 0.5 y 1 ms⁻¹, además, como se apreció en el numeral 4.3 *Velocidad de secado*, se distinguieron los periodos evaporativos y difusivos para las muestras por lo que a continuación se describen los resultados obtenidos para el cálculo del calor para el periodo evaporativo de cada tecnología.

4.5.1.1 PERÍODO EVAPORATIVO

Partiendo de la forma general del calor vista en la sección 1.3.3 *Fundamentos del proceso de secado*:

$$q_c = h_c * A (T - T_w)$$

Ecuación 4-1

Y suponiendo ausencia de transferencia de calor por conducción y radiación en el periodo evaporativo, la temperatura del sólido se considera igual a la temperatura del aire y por lo tanto es posible calcular la velocidad de secado (*Rc*) con la ecuación de transferencia de calor, de acuerdo a la fórmula:

$$Rc \frac{Kg H_2O}{h * m^2} = \frac{h}{\lambda_w} (T - T_w \text{ } ^\circ C)$$

Ecuación 4-2

Dónde el coeficiente de transferencia de calor se determina:

$$h = 0.0204 G^{0.8}$$

Ecuación 4-3

En la *Tabla 4.3* se presentan las consideraciones que se tomaron para el cálculo del coeficiente convectivo y para el calor en el periodo evaporativo del secador solar tipo invernadero y bajo condiciones controladas en el secado en estufa. El periodo evaporativo para el SE y el SSI corresponden desde una humedad inicial o *X₀* hasta 6.16 y 4.40 g H₂O g⁻¹ s.s., lo que significó hasta los 80 minutos de secado para el SE, y 180 minutos para el SSI (ver *Figura 4.6.- 4.9*).

En la *Tabla 4.4* se muestran los resultados obtenidos para el cálculo del calor *q_c* en el periodo evaporativo. El total de masa evaporada *Ecuación 4-4* para cada una de las tecnologías se calculó restando la masa inicial menos la masa de la siguiente medición

correspondiente hasta llegar al contenido crítico de humedad (X_c) y multiplicado por el número total de charolas (n_{ch}) dentro de la cámara de secado de cada tecnología, es decir, dos charolas para el SE y 26 charolas para el SSI. Se observó que la energía requerida para secar un kilogramo de pulpa de zarzamora para el secado en estufa corresponde a 2.35 megajoules (MJ), y para el secado en invernadero es 8.90 MJ.

$$\left(\sum_{i=0}^{ic} (m_{i0} - m_{i1}) + (m_{i1} - m_{i2}) + \dots + (m_i - m_{ic}) \right) * n_{ch}$$

Ecuación 4-4

Tabla 4.3. Parámetros considerados para el cálculo del calor en el periodo evaporativo de SE y SSI.

Tecnología de secado	Velocidad del aire interna (ms^{-1})	$\rho a h$ (kgm^{-3})	Flujo másico por unidad de área ($\text{kgm}^{-2}\text{h}^{-1}$)	Área de secado (m^2)	h ($\text{kg m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	Humedad relativa promedio (%)	Temp. Ambiente promedio ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo de secado min. ($X_0 - X_c$)*
SE	1.00	1.08	3898.80	0.20	15.22	52.66	26.58	80
SSI	0.50	1.19	2142.00	16.00	9.43	45.57	27.08	180

*El tiempo de secado corresponde desde la humedad inicial X_0 hasta el contenido de humedad crítico X_c , que indica el término del periodo evaporativo.

Tabla 4.4. Calor en el periodo evaporativo para las tecnologías SE y SSI

Tecnología de secado	T. Secado ($^{\circ}\text{C}$)	T. de bulbo húmedo ($^{\circ}\text{C}$)	q/A (Wm^{-2})	Q/A (MJ m^{-2})	λ (MJ kg^{-1})	Masa total evaporada (kg)	q (W)	Q (MJ)	Q / masa (MJ kg^{-1})
SE	60.00	19.63	614.38	5.53	2.26	0.38	124.41	0.60	1.57
SSI	41.50	18.82	213.76	2.69	2.26	4.84	3420.17	43.094	7.63

Para el resultado de calor en el periodo evaporativo por método de números adimensionales las tablas 4.5 - 4.7 muestran el resumen de los resultados obtenido para el SSI-1,2 y 3.

Los resultados del calor en el periodo evaporativo del SSI-1 y 2 son muy similares de 4.39 y 4.40 MJ kg^{-1} , para el caso del tercer secado en invernadero fue de 3.36 MJ kg^{-1} . En promedio el calor requerido para secar un kilogramo de pulpa de zarzamora por el método de números adimensionales en el periodo evaporativo es 4.05 ± 0.69 MJ.

Haciendo la comparación de los valores obtenido a través de la metodología de números adimensionales con el de la correlación del coeficiente convectivo (Tabla 4.4), este segundo es mayor, debido a que no se consideran los requerimientos energéticos de cada intervalo, si no, de forma global para todo el periodo.

Tabla 4.5. Calor en el periodo evaporativo, método números adimensionales para el SSI-1.

t(min)	Xbs	Pr	Re	Nu	h_H $= \frac{K_a * Nu}{l}$	q/A (Wm ⁻²)	∑ q/A (Wm ⁻²)	Q/A (MJ m ⁻²)	Q (MJ)	Masa evaporada (kg)	Q/masa (MJ kg ⁻¹)	
X ₀	0	11.50	0.75	9366.02	58.48	4.84	24.23	112.01	1.21	19.35	4.41	4.39
	20	11.01	0.77	9340.51	58.71	4.88	27.41					
	40	10.62	0.75	9272.14	58.13	4.84	29.36					
	60	10.18	0.75	9230.58	57.98	4.84	31.28					
	80	9.76	0.75	9203.30	57.76	4.83	31.49					
	100	9.16	0.75	9186.57	57.72	4.83	31.33					
	120	8.58	0.75	9180.85	57.78	4.84	30.78					
	150	7.67	0.74	9139.18	57.53	4.83	30.29					
X _c	180	7.04	0.74	9083.24	57.31	4.83	31.21					

Tabla 4.6. Calor en el periodo evaporativo, método números adimensionales para el SSI-2.

t(min)	Xbs	Pr	Re	Nu	h_H $= \frac{K_a * Nu}{l}$	q/A (Wm ⁻²)	∑ q/A (Wm ⁻²)	Q/A (MJ m ⁻²)	Q (MJ)	Masa evaporada (kg)	Q/masa (MJ kg ⁻¹)	
X ₀	0	9.77	0.75	9490.37	58.88	4.826	14.75	103.96	1.12	17.96	4.08	4.40
	20	9.46	0.75	9400.24	58.52	4.826	20.67					
	40	9.14	0.75	9340.68	58.28	4.826	24.20					
	60	8.69	0.75	9287.40	58.10	4.831	27.10					
	80	8.25	0.74	9190.72	57.65	4.823	31.78					
	100	7.72	0.74	9136.40	57.48	4.828	33.85					
	120	7.20	0.74	9099.70	57.30	4.824	34.19					
	150	6.30	0.74	9081.67	57.25	4.826	32.18					
X _c	180	5.37	0.74	9061.74	57.14	4.823	29.38					

Tabla 4.7. Calor en el periodo evaporativo, método números adimensionales para el SSI-3.

t(min)	Xbs	Pr	Re	Nu	h_H $= \frac{K_a * Nu}{l}$	q/A (Wm ⁻²)	∑ q/A (Wm ⁻²)	Q/A (MJ m ⁻²)	Q (MJ)	Masa evaporada (kg)	Q/masa (MJ kg ⁻¹)	
X ₀	0	9.17	0.76	9581.70	59.30	4.83	8.57	73.72	0.80	12.73	3.79	3.36
	20	9.01	0.76	9537.55	59.11	4.83	11.51					
	40	8.61	0.76	9497.39	58.98	4.83	14.18					
	60	8.30	0.75	9378.45	58.48	4.83	21.57					
	80	7.85	0.75	9350.11	58.34	4.83	22.47					
	100	7.40	0.75	9322.40	58.20	4.83	23.22					
	120	6.89	0.75	9248.17	57.95	4.83	26.65					
	150	6.09	0.75	9230.45	57.86	4.83	25.41					
X _c	180	5.22	0.75	9239.64	57.88	4.83	22.37					

4.5.1.2 PERÍODO DIFUSIVO

Para el cálculo del calor requerido en el periodo difusivo se utilizó la ecuación vista en la sección “1.3.3.3 Remoción de la humedad en el periodo de velocidad decreciente”:

$$q_D = m_p \lambda_w \frac{dw}{dt}$$

Los resultados para el calor requerido en el periodo difusivo de SSI-1, 2 y 3 se muestran en las tablas 4.8 – 4.10. El valor del calor latente de vaporización del agua λ es el mismo que en la tabla 4.4. Se observa variación del calor requerido en este periodo debido al tiempo de secado, con valores de 12.24, 10.38 y 11.25 MJ para el secado solar tipo invernadero 1, 2 y 3 respectivamente. Las variaciones del calor requerido se deben a la diferencia de masas con las que inicia el periodo difusivo (minuto 210) y al tiempo de secado de cada prueba, es decir, el SSI-1 tiene un periodo difusivo de 630 minutos, e inicia con una masa de 6.00 kg de pulpa de zarzamora. El SSI-2 tiene un periodo difusivo de 390 minutos con una masa inicial de 4.51 kg, y el SSI-3 tiene el periodo difusivo más prolongado de 750 minutos, pero inicia con una masa menor a las otras dos pruebas de 4.3 kg.

Tabla 4.8. Calor requerido en el periodo difusivo para el SSI-1.

t(min)	m (g)	Xbs	W	dW/dt	q_D ($m \cdot \lambda \cdot dw/dt$) (kJ min ⁻¹)	Q_D ($m \cdot \lambda \cdot dw/dt$) (MJ)	ΣQ_D (MJ)
210	6004.27	6.17	0.5207	0.00270	63.45	1.90	12.24
240	5259.58	5.27	0.4398	0.00246	57.76	3.47	
300	3891.55	3.63	0.2924	0.00181	42.55	2.55	
360	2881.45	2.42	0.1838	0.00101	23.68	1.42	
420	2315.30	1.75	0.1233	0.00110	25.84	1.55	
480	1694.55	1.02	0.0574	0.00043	10.22	0.61	
540	1452.32	0.73	0.0313	0.00025	5.94	0.36	
600	1308.88	0.56	0.0161	0.00013	2.97	0.18	
660	1238.03	0.47	0.0085	0.00011	2.61	0.16	
720	1175.20	0.40	0.0018	0.00002	0.56	0.03	
780	1161.77	0.38	0.0004	0.00001	0.17	0.01	
840	1157.65	0.38	0.0000	0.00000	0.00	0.00	

Tabla 4.9. Calor requerido en el periodo difusivo para el SSI-2.

t(min)	m (g)	Xbs	W	dW/dt	q_D ($m \cdot \lambda \cdot dw/dt$) (kJ min ⁻¹)	Q_D ($m \cdot \lambda \cdot dw/dt$) (MJ)	ΣQ_D (MJ)
210	4513.38	4.59	0.4519	0.00338	65.63	1.97	10.38
240	3756.13	5.27	0.3504	0.00286	55.49	3.33	
300	2460.25	3.63	0.1788	0.00175	33.92	2.04	
360	1645.37	2.42	0.0739	0.00083	16.07	0.96	
420	1252.98	1.75	0.0242	0.00027	5.31	0.32	
480	1122.98	1.02	0.0078	0.00010	1.84	0.11	
540	1077.48	0.73	0.0021	0.00004	0.68	0.04	
600	1195.13	0.56	0.0000	0.00000	0.00	0.00	

Tabla 4.10. Calor requerido en el periodo difusivo para el SSI-3.

t(min)	m (g)	Xbs	W	dW/dt	q _D (m*λ*dw/dt) (kJ min ⁻¹)	Q _D (m*λ*dw/dt) (MJ)	Σ Q _D (MJ)
210	4363.02	4.41	0.46596	0.00344	63.28	1.90	11.25
240	3628.95	3.50	0.00335	0.36280	61.58	3.69	
300	2202.20	1.71	0.00153	0.16202	28.13	1.69	
360	1539.85	0.89	0.00054	0.07032	9.92	0.59	
420	1302.17	0.60	0.00021	0.03799	3.88	0.23	
480	1207.05	0.49	0.00010	0.02534	1.78	0.11	
540	1164.58	0.44	-0.00081	0.01953	1.78	0.11	
600	1505.62	0.87	0.00048	0.06807	8.90	0.53	
660	1298.92	0.61	0.00035	0.03905	6.35	0.38	
720	1148.77	0.43	0.00014	0.01835	2.66	0.16	
780	1084.85	0.35	0.00010	0.00969	1.87	0.11	
840	1039.78	0.30	0.00003	0.00361	0.60	0.04	
900	1025.48	0.28	0.00003	0.00165	0.51	0.03	
960	1013.35	0.26	0.00000	0.00000	0.00	0.00	

En la siguiente tabla se plasman el resumen de los resultados obtenido para el cálculo del calor requerido en el periodo evaporativo + difusivo para la tecnología solar tipo invernadero. Se observan que los requerimientos energéticos globales de las pruebas SSI-2 y SSI-3 son similares y la diferencia que existe con la primera es debido al contenido de masa inicial.

Tabla 4.11. Calor requerido en el SSI.

Transferencia de calor	SSI-1	SSI-2	SSI-3
Período evaporativo (MJ kg ⁻¹)	4.39	4.40	3.36
Período difusivo (MJ kg ⁻¹)	12.24	10.38	11.25
Total	16.63	14.78	14.61
Promedio		15.34 ± 1.12	

4.5.2 CONVECCIÓN NATURAL

Para el cálculo del calor requerido en el secador solar directo con convección natural, se utilizó el método por números adimensionales de acuerdo a lo descrito en la sección 3.2.1.2 *Convección natural*. Las tablas 4.12 – 4.14 presentan los resultados obtenidos, para los SSD-1, 2 y 3. Se observó que, el requerimiento energético de la primera prueba en el SSD-1 de 8.16 MJ fue mayor al calor involucrado para el SSD-2 y 3 de 6.68 y 6.65 MJ, valor muy similar. En promedio el calor requerido para secar un kilogramo de pulpa de zarzamora por el método de números adimensionales en el periodo evaporativo por convección natural es 7.69±1.43 MJ. Este mismo comportamiento se observó en el secador tipo invernadero y se debió a que las masas iniciales para ambas tecnologías solares en la primera prueba (SSI-1 y SSD-1) son mayores que las otras dos pruebas.

Tabla 4.12. Calor en el periodo evaporativo por convección natural, método de números adimensionales para el SSD-1.

t(min)	Xbs	Pr	Gr	Nu	$h_H = \frac{K_a * Nu}{l}$	q/A (Wm ⁻²)	∑ q/A (Wm ⁻²)	Q/A (MJ m ⁻²)	Q (MJ)	Masa evaporada (kg)	Q/masa (MJ kg ⁻¹)	
X₀	0	11.97	0.77	1.95E+06	9.45	0.27	1.13	18.43	0.20	3.18	0.39	8.16
	20	11.49	0.77	1.75E+06	9.20	0.26	1.07					
	40	10.93	0.74	1.84E+05	5.20	0.15	2.17					
	60	10.53	0.74	1.05E+05	4.50	0.14	2.54					
	80	9.98	0.73	1.18E+05	4.62	0.14	2.66					
	100	9.23	0.73	9.82E+04	4.42	0.14	2.52					
	120	8.60	0.74	1.50E+05	4.93	0.15	1.99					
	150	7.69	0.73	8.26E+04	4.23	0.13	2.28					
X_c	180	6.80	0.73	8.96E+04	4.31	0.13	2.08					

Tabla 4.13. Calor en el periodo evaporativo por convección natural, método de números adimensionales para el SSD-2.

t(min)	Xbs	Pr	Gr	Nu	$h_H = \frac{K_a * Nu}{l}$	q/A (Wm ⁻²)	∑ q/A (Wm ⁻²)	Q/A (MJ m ⁻²)	Q (MJ)	Masa evaporada (kg)	Q/masa (MJ kg ⁻¹)	
X₀	0	9.64	0.76	7.44E+05	7.39	0.21	1.22	13.53	0.15	2.34	0.35	6.68
	20	9.32	0.75	4.16E+05	6.38	0.19	1.51					
	40	9.00	0.74	2.64E+05	5.68	0.17	1.74					
	60	8.58	0.74	2.71E+05	5.72	0.17	1.69					
	80	8.12	0.74	3.22E+05	5.96	0.18	1.69					
	100	7.56	0.74	2.85E+05	5.79	0.17	1.55					
	120	6.99	0.74	3.09E+05	5.90	0.18	1.48					
	150	5.97	0.74	2.53E+05	5.61	0.17	1.37					
X_c	180	4.91	0.73	2.36E+05	5.50	0.17	1.27					

Tabla 4.14. Calor en el periodo evaporativo por convección natural, método de números adimensionales para el SSD-3.

t(min)	Xbs	Pr	Gr	Nu	$h_H = \frac{K_a * Nu}{l}$	q/A (Wm ⁻²)	∑ q/A (Wm ⁻²)	Q/A (MJ m ⁻²)	Q (MJ)	Masa evaporada (kg)	Q/masa (MJ kg ⁻¹)	
X₀	0	9.00	0.76	8.20E+05	7.59	0.22	0.75	13.09	0.14	2.26	0.34	6.65
	20	8.89	0.76	6.11E+05	7.04	0.20	0.97					
	40	8.46	0.74	2.12E+05	5.38	0.16	1.61					
	60	8.15	0.74	1.51E+05	4.93	0.15	1.77					
	80	7.70	0.74	1.58E+05	4.99	0.15	1.79					
	100	7.27	0.73	1.61E+05	5.00	0.15	1.78					
	120	6.67	0.74	1.88E+05	5.21	0.16	1.43					
	150	5.86	0.73	1.23E+05	4.67	0.14	1.56					
X_c	180	4.91	0.73	1.34E+05	4.77	0.15	1.43					

En la siguiente tabla se plasman el resumen de los resultados obtenido para el cálculo del calor requerido en el periodo evaporativo.

Tabla 4.15. Calor requerido en el para el SSI.

Transferencia de calor	SSD-1	SSD-2	SSD-3
Período evaporativo (MJ kg ⁻¹)	8.16	6.68	6.65
Promedio	7.16 ± 0.86		

4.5.3 COMPARACIÓN DE COSTOS DE SECADO CON GAS LP, GAS NATURAL Y ELECTRICIDAD

En esta sección se presenta la comparativa de implementación de los deshidratadores solares en comparación con los costos de secado a partir de los combustibles de fuentes fósiles, partiendo de los valores de calor obtenidos en las tablas anteriores. Se utilizan los datos promedio de los tres secados, tanto por convección natural como convección forzada y para los periodos evaporativo y difusivo.

Para el SSI el calor promedio requerido para secar un kilogramo de pulpa de zarzamora en el periodo evaporativo y difusivo fue de 15.34 MJ, este valor es el que se utilizó como referencia. De la misma manera se presentan los resultados para el SSD, dónde se partió del calor promedio requerido para secar un kilogramo de producto en el periodo evaporativo (por convección natural) de 7.16 MJ, pese a que el procedimiento empleado únicamente nos indica el calor requerido en solo uno de los periodos este nos sirve para correlacionar los costos en la comparativa con otros combustibles.

Tabla 4.16. Comparativa de costos de producción por kilogramo para el SSI Y SSD

Combustible	Poder calorífico	Precio del combustible octubre 2018 (pesos)	Combustible requerido		Costo por kg de producto (pesos)	
			SSI	SSD	SSI	SSD
Gas LP	46.16 MJkg ⁻¹	\$19.67	0.49*	0.23*	\$9.58	\$4.47
Gas natural	36.1- 43.6 MJm ⁻³	\$5.71	0.61**	0.29**	\$3.50	\$1.63
Electricidad	3.6 MJ kWh ⁻¹	\$1.53	4.26***	1.99**	\$6.52	\$3.04

Unidades en: * kg de gas LP por kg de producto; ** m³ de gas natural por kg de producto y *** kWh por kilogramo de producto. Las referencias del poder calorífico se encuentran descritas en la Tabla 3.10.

El mayor ahorro se presenta en la comparativa con gas LP, donde el costo de secado por kilogramo asciende a \$9.58 y \$4.47 comparado con los requerimientos energéticos de SSI y SSD, seguido de la electricidad y el gas natural.

4.5.4 EMISIONES DE CO₂ EVITADAS

Hasta aquí se han descrito los resultados obtenidos para las tecnologías solares, representado la tecnología que mejor ha preservado los nutrientes y también un ahorro monetario generado en el secado, adicionalmente otra de las ventajas que presenta al compararse con el secado a través de fuentes fósiles son las emisiones de contaminantes que se están evitando, al no quemar gas LP, o gas natural ni consumir electricidad. La siguiente tabla concentra la información respecto a la cantidad de CO₂ que se estarían emitiendo al utilizar cualquiera de los combustibles de comparación. Se partió de los requerimientos energéticos de cada tecnología solar para determinar las emisiones por cada kilogramo de producto.

Tabla 4.17. Comparativa de emisiones de CO₂ por kilogramo para el SSI y SSD

Combustible	Factor de emisión	Emisiones	
		kg de CO ₂ kg de producto ⁻¹ SSI	kg de CO ₂ kg de producto ⁻¹ SSD
Gas LP	3.00 kg CO ₂ kg ⁻¹ de gas LP	1.44	0.67
Gas natural	2.27 kg CO ₂ m ⁻³ de gas natural	1.28	0.60
Electricidad	0.582 ton CO ₂ MWh ⁻¹	2.48	1.16

Las referencias de los factores de emisiones, se encuentran descritas en la *Tabla 3.11*.

Si se estuviera utilizando electricidad en vez de las tecnologías solares se estarían emitiendo entre 2.48 y 1.16 kg de CO₂ por kilogramo de producto, entre 1.44 - 0.67 kg de CO₂ por kg de producto para el caso del gas LP y entre 1.28 - 0.60 kg de CO₂ por kg de producto para el gas natural.

Es importante mencionar que las emisiones expresadas son únicamente para el proceso de secado de la pulpa de zarzamora, para tener el cálculo completo de la huella de carbono generado por la “implementación de los deshidratadores en la reducción de mermas agrícolas de zarzamora” sería necesario incluir todos los procesos involucrados para definir el sistema y poder realizar los cálculos correspondientes, objetivos que quedan fuera de esta investigación, pero serían interesantes para ponderar la importancia del beneficio ambiental del proceso de secado con deshidratadores solares.

4.6 ANÁLISIS DE CUESTIONARIOS

Parte importante de la investigación fue poder realizar una vinculación y retroalimentación del proyecto con los posibles usuarios de la tecnología, en la sección de metodología se describió bajo qué contexto se aplicaron los cuestionarios a los productores y demás actores clave dentro de la red de producción. Debido a que se me invitó a presentar los resultados de mi investigación, se realizó una presentación oral del proyecto de la “deshidratación solar de la zarzamora encaminada a reducir las mermas agrícolas”, dónde el objetivo del espacio brindado fue dar difusión a las tecnologías solares y los resultados de los análisis químicos obtenidos.

Esta participación permitió generar un espacio de diálogo de preguntas y respuestas de forma que los participantes pudieran manifestar sus dudas e inquietudes del proyecto de investigación y suscitar el punto de partida para la aplicación de los cuestionarios, por consiguiente, se deben tomar los resultados aquí expresados con mucha precaución, ya que el haber realizado una presentación de resultados antes del cuestionario pudo haber inducido respuestas.

El instrumento utilizado para la recogida de datos presentó cinco secciones, dónde la última recopiló información sobre aspectos personales que ayudaron a la caracterización de las personas participantes dentro de la muestra objeto de estudio. La primera y segunda sección permitieron conocer los aspectos sobre la cantidad de producción que generaban y las implicaciones de las mermas de zarzamora dentro de sus procesos. La tercera sección abordó los atributos tecnológicos de los deshidratadores solares y su potencial de implementación. Y en la cuarta sección se planteó el posible valor comercial de los productos obtenidos de la deshidratación solar. A continuación, se presentan las tabulaciones en frecuencias y porcentajes para cada pregunta.

4.6.1 PRIMERA SECCIÓN. GENERAL DE LA PRODUCCIÓN.

La sección uno y dos debido a que estaba dirigida únicamente a los productores de zarzamora la contestaron 13 de los 18 cuestionarios aplicados, recordando que los restantes cinco participantes eran comercializadores y actores claves involucradas en la cadena de sistema de la zarzamora. La sección tres, cuatro y cinco la contestaron todos los participantes.

La primera pregunta se centró en el volumen de producción, dónde los productores contestaron en términos de cajas por ciclo de cultivo. Cada caja pesa alrededor de 2.2 kg (media pinta) y contiene 12 *clamshell*⁸ (ver *Figura 4.18*). De los trece agricultores entrevistados contestaron once que su producción oscilaba entre 5,000 y 20,000 cajas equivalente a 11 y 44 toneladas y solo dos participantes contestaron un volumen entre 20,001 y 40,000 cajas equivalente a 44 y 88 toneladas por ciclo. Pudiera ser que los volúmenes de producción se hayan sido subestimados, debido al carácter sensible de la pregunta, ya que existe una implicación económica.

1. ¿Cuál es la cantidad de producción por ciclo de cultivo?	Frecuencia n=13	%
Entre 5,000 y 20, 000 cajas	11	85
Entre 20,001 y 40, 000 cajas	2	15



a)



b)

Figura 4.18. a) Presentación de la zarzamora en clamshells de 170 gr o 6 onzas, 340 gr o 12 onzas y 510 gr o 18 onzas. b) Apilamiento de cajas de zarzamora sobre pallets dentro de las cámaras de prerrefrigeración para su exportación.

4.6.2 SEGUNDA SECCIÓN. DE LAS MERMAS DE ZARZAMORA

La primera pregunta de la segunda sección permitió conocer en qué etapa de la producción se generan las pérdidas de la zarzamora. Los productores contestaron que las dos etapas donde se generaban las mermas son cosecha y poscosecha (ver *Figura 4.18*).

⁸ Es un contenedor de una sola pieza que consta de dos mitades unidas por un área de bisagra que permite que la estructura se junte para cerrarse. Las cubiertas a menudo están hechas de un material plástico. El nombre de *clamshell* se toma del inglés *shell of a clam* que significa concha de una almeja, debido a su parecido tanto en la forma como en el funcionamiento (Oxford English Dictionary, 2018).

2.1. ¿En cuál de las etapas del proceso de producción de la zarzamora se generan pérdidas/mermas?	Frecuencia n=13	%
Cosecha	5	62
Poscosecha	7	77



a)



b)

Figura 4.18 a) Colector cosechando la zarzamora directamente en clamshell, b) poscosecha: selección, clasificación, pesado empaque de la zarzamora dentro de la huerta, separación de frutillas fuera del estándar de calidad.

La pregunta 2.2 dió a conocer las causas de la pérdida o merma de la zarzamora en cada una de las etapas. En general las causas asociadas en la etapa de cosecha que se describieron fueron: sobremaduración, deformación y tamaño de la fruta, mal tiempo y ataque de plagas. En la etapa de poscosecha se nombraron también factores físicos como: daños por manipulación; factores fisiológicos: pérdidas por la exposición de las frutas al sol, pérdida de humedad y factores patológicos como ataque de hongos.

Dentro de las causas relacionadas a los daños por manipulación los productores hacen mención a que el tipo de cosecha es manual, por lo tanto, influye la experiencia de los colectores para no dañar las frutillas, así como para seleccionar aquellas que han logrado su madurez óptima. Comentaron que la mejor hora de recolección es por la mañana evitando las temperaturas altas afectan la producción. Adicionalmente expresaron que casi todas las huertas empaacan directamente en campo, pero existen algunos productores que llevan su mercancía a centros de acopio, lo que retrasa el enfriamiento de la fruta y aumenta la posibilidad de daños.

La pregunta 2.3 expresa que porcentaje de mermas se generan por ciclo de cultivo. Casi el 70% de los encuestados contestaron que entre el 20-30% de la producción total se pierde, 15.4% de los participantes mencionaron que se merma entre el 5 y el 10%; y solo el 8% mencionó que se pierde entre 10-20% y entre 30-40% de la producción total. Nadie mencionó mermas superiores al 40% de la producción total.

Se describió en el capítulo uno el porcentaje de desperdicio por grupo de alimento, para América Latina el porcentaje de desperdicio de frutas y hortalizas es de 55% (FAO, 2012; FAO, 2015) pero conjuntando todos los eslabones de la cadena alimentaria (producción agrícola, poscosecha, procesamiento, distribución y consumo). Para el caso de la zarzamora únicamente en las etapas de cosecha y poscosecha se merma alrededor del 20-30% de acuerdo a lo expresado por los productores (ver *Figura 4.19*). La merma o pérdida que tenga cada productor de forma interna van a estar relacionadas con las buenas prácticas y técnicas de manejo de la cosecha y la poscosecha.

2.3. ¿Qué porcentaje del total de su producción acaba en pérdidas por ciclo de cultivo?	Frecuencia n=13	%
De 5 a 10 %	2	15
De 10 a 20%	1	8
De 20 a 30%	9	69
De 30 a 40%	1	8
Más de 40%	0	0



Figura 4.19. Merma de zarzamora

El productor que mencionó tener mayor porcentaje de merma fue también uno de los productores con mayor producción por ciclo de cultivo.

En la pregunta 2.4 a través de una pregunta dicotómica, establece si las mermas representan un problema, dónde el 100% de los encuestados contestó que si representa una problemática dentro de su proceso.

2.4. ¿Las mermas representan un problema para su proceso?	Frecuencia n=13	%
Sí	13	100
No	0	0

La pregunta 2.5, hace referencia a si los productores están realizando alguna acción para mitigar las mermas de las zarzamoras. El 100% de los participantes contestaron que sí realizan acciones encaminadas a la reducción de los desperdicios.

2.5. ¿Realiza alguna acción para mitigar la merma de zarzamora?	Frecuencia n=13	%
Sí	13	100
No	0	0

En la pregunta 2.6 de tipo abierta, se pide especificar qué tipos de acciones se realizan con la finalidad de obtener un menor índice de desperdicio. Dentro de las descripciones de acciones se pueden clasificar en: mejorar las prácticas en el manejo de cosecha y poscosecha, capacitación de los operadores para mejorar la sanidad e inocuidad, detección temprana de enfermedades, vigilancia de cultivos y procesamiento de mermas.

Las últimas dos preguntas de esta sección se centraron en verificar si actualmente se le está dando algún uso a sus mermas. En la pregunta 2.7 se establece si el productor ha considerado darle uso a la producción que se merma, el 92% de los participantes contestaron que sí.

2.7. ¿Ha considerado darle uso a su producción que se merma?	Frecuencia n=13	%
Sí	12	92
No	1	8

En la pregunta 2.8 se pide describan cuál uso se le está dando a ese producto mermado, el 77% de los participantes mencionan que se vende para “proceso” es decir comercializadoras nacionales que utilizan las mermas en la industria de la transformación alimentaria, como la producción de jugos, néctares, mermeladas. Sin embargo, en la sesión de preguntas y respuestas hicieron mención de que muchas veces dependiendo del estado de afectación de las frutillas no son aceptadas tampoco para proceso quedándose sin opciones para procesar sus mermas.

2.8. ¿Qué uso les da a sus mermas?	Frecuencia n=13	%
Venderla para proceso	10	77
Ninguno	3	23

4.6.3 TERCERA SECCIÓN. DE LA TECNOLOGÍA DE DESHIDRATACIÓN SOLAR

La sección tres se relaciona con los factores de la tecnología de deshidratación solar que propiciaría o limitaría la aceptación. Esta sección la contestaron los 18 encuestados. La pregunta 3.1 hace mención de la viabilidad de insertar los deshidratadores solares dentro de sus procesos, cerca del 61% de los productores mencionaron que sí implementarían la tecnología solar. Adicionalmente en la pregunta 3.2 se pide especificar si percibe algún beneficio de la implementación de los deshidratadores. El 72 % señaló que, si percibe beneficio, y en la pregunta 3.3 se pide describir el tipo de beneficio que observaron. Dentro de los beneficios mencionados se encuentran: generar sus propios productos procesados, dar valor agregado a su producción, tener producto disponible todo el año, incrementar sus ganancias.

3.1. ¿Insertaría en sus procesos tecnología solar para atacar los problemas de mermas?	Frecuencia n=18	%
Sí	11	61
No	7	39

3.2. ¿Percibe algún beneficio de la implementación?	Frecuencia n=18	%
Sí	13	72
No	5	28

3.3. ¿Qué tipo de beneficios percibe?	Frecuencia n=18	%
Generar productos procesados propios	2	11
Dar valor agregado a su producción	9	50
Tener producto disponible todo el año	2	11
Incrementar ganancias	5	28

La pregunta 3.4 menciona los factores más importantes para seleccionar una tecnología. El factor del precio accesible, se ubicó en la primera posición con 39%, los bajos costos de operación en segunda posición con 23%, que se obtengan productos de valor comercial en tercera posición con 17%, en cuarta posición fácil de utilizar y amigable con el ambiente ambas con 11%.

3.4. ¿Qué factores considera más importante en la selección de una tecnología?	Frecuencia n=18	%
Precio accesible	7	39
Bajos costo de operación	4	22
Obtener productos de valor comercial	3	17
Fácil de utilizar	2	11
Amigable con el ambiente	2	11

En la pregunta abierta 3.5 se cuestiona sobre los factores que limitarían la adquisición de un deshidratador solar. Dentro de las respuestas se mencionaron factores como el precio del equipo, versatilidad de productos que se pueden obtener, falta de rentabilidad y necesidad de capacitación para su uso, falta o necesidad de creación de mercados para los productos obtenidos.

3.5. ¿Qué factores limitarían la adquisición de un deshidratador solar?	Frecuencia n=18	%
Inversión	9	50
Rentabilidad	5	27
Falta de mercados para insertar productos	2	11
Requerimiento de capacitaciones	1	6
Versatilidad de los productos	1	6

La última pregunta de la sección fue para permitir agregar sugerencias o comentarios respecto a los deshidratadores solares. Dentro de los comentarios se mencionó que otras tecnologías existen en el mercado de deshidratación solar (como el túnel de secado) con que otras frutas se ha probado y estudiado las tecnologías de invernadero y solar directo, las dimensiones requeridas para la instalación y si existen programas de apoyo para adquirir la tecnología.

3.6. ¿Tiene algún comentario o sugerencia sobre los deshidratadores solares?	Frecuencia n=18	%
Sin comentarios	10	56
Otras tecnologías de deshidratación solar	3	16
Con que otras frutas o legumbres se ha probado	2	11
Existencia de programas de apoyo para adquirir la tecnología	2	11
Requerimientos para la instalación	1	6

4.6.4 CUARTA SECCIÓN. DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS POR DESHIDRATACIÓN DE LA ZARZAMORA

En la cuarta sección del cuestionario se hicieron solo tres preguntas sobre los productos deshidratados de la zarzamora que se presentaron: en pulpa en forma de láminas y en polvo (*Figura 4.20 a y b*). La primera pregunta hizo referencia a el valor comercial de los productos presentados de acuerdo a su percepción el 44% considera que ambos productos tienen valor comercial, el 33% considera que solo la pulpa en lámina tiene un valor comercial y el 23% solo eligió la presentación en polvo.

4.1. ¿Considera que los productos deshidratados de zarzamora tienen valor comercial?	Frecuencia n=18	%
Ambos	8	44
Solo pulpa en lámina	6	33
Solo en polvo	4	23



a)



b)

Figura 4.20 Pulpa de zarzamora a) charolas en el Secador Solar tipo Invernadero b) una vez retirada de la charola.

La pregunta 4.2, se cuestionó sobre cuál de las aplicaciones presentadas les pareció más viable; dentro de la presentación oral se hicieron referencia a alternativas de aplicaciones de la zarzamora deshidratada en la industria alimenticia. Dentro de las opciones mostradas está la creación de dulces con y sin chile y también dulces o golosinas especializadas o nutritivas. De las aplicaciones en polvo como aditamento para comidas (existen versiones de blueberry en polvo considerado superalimento) en repostería, así como polvos para bebidas y también aplicaciones en golosinas y dulces, principalmente dirigidos para toda la población infantil y joven.



Figura 4.21. Alternativas de productos generados a partir de la pulpa de zarzamora deshidratada.



Figura 4.22. Alternativas de productos generados a partir del polvo de zarzamora deshidratada.

Las aplicaciones más seleccionadas fueron para la presentación en pulpa en la creación de golosinas nutritivas y para el polvo en aditamento para alimentos y bebidas. Pero de forma generalizada todas las alternativas fueron aceptadas.

4.2. ¿Cuál aplicación de los productos le pareció más interesante?	Frecuencia n=18	%
Dulces nutritivos	5	28
Aditamento en polvo	5	28
Bebidas	3	17
Repostería	2	10
Todos	3	17

En la última pregunta de la sección se pidió a los participantes indicar las características más importantes de los productos de zarzamora deshidratados. El 39% seleccionó los antioxidantes como el más importante, seguido de antioxidantes + valor nutrimental con el 28%, la versatilidad de aplicaciones con el 17%, el periodo prolongado de

almacenamiento con el 10% y periodo prolongado de almacenamiento + valor nutrimental con el 6%.

4.3. De las características descritas para los productos de zarzamora deshidratados. ¿Cuál o cuáles considera que son más importantes?	Frecuencia n=18	%
Antioxidantes (anticancerígenos)	7	39
Antioxidantes + valor nutrimental	5	28
Versatilidad de aplicaciones	3	17
Periodo prolongado de almacenamiento	2	10
Periodo prolongado de almacenamiento + valor nutrimental	1	6

5 CONCLUSIONES

Los puntos más relevantes de la investigación fueron:

- El objetivo general del proyecto de realizar un estudio comparativo del desempeño técnico, económico y ambiental y la evaluación del potencial de aceptación de dos tipos de deshidratadores solares, en contraste con uno convencional para su implementación en la reducción de las mermas agrícolas de zarzamora se cumplió satisfactoriamente.
- Para el desempeño técnico los tiempos requeridos para el secado mostrados a través de las cinéticas y las velocidades de secado, fueron menores para la tecnología convencional, esto se debió a que se vieron favorecidos los resultados debido a las condiciones controladas, así como la velocidad del aire al interior de la cámara de secado.
- No se observó diferencia significativa entre los tiempos y las velocidades de secado de las tecnologías solares, pese a que dentro de la cámara del secador solar tipo invernadero se operó por convección forzada. Adicionalmente las humedades finales de los tres tipos de secado fueron similares.
- La tecnología solar tipo invernadero presentó los valores de concentraciones de antioxidantes y fenoles totales más altos, seguido del secador solar directo y finalmente la tecnología convencional presentó una mayor degradación de los compuestos analizados. Sin embargo, es importante mencionar que compuestos evaluados presentan una sensibilidad térmica y a la luz, presentando porcentajes de degradación. Los polifenoles más sensibles son las antocianinas degradándose en promedio el 87% con respecto a la concentración de las zarzamoras frescas, seguido de los antioxidantes con una degradación promedio del 70%, los fenoles totales con 40%, y los que presentaron una mayor resistencia a la exposición solar y la temperatura fueron los flavonoides con degradación del 20%.
- Se determinó el calor involucrado en los procesos de secado por convección natural y forzada para el secador directo e invernadero respectivamente. Para el secado en invernadero el calor promedio requerido para secar un kilogramo de pulpa de zarzamora en el periodo evaporativo y difusivo fue de 15.34 MJ. Para el secador solar directo el calor promedio requerido para secar un kilogramo de producto en el periodo evaporativo fue de 7.16 MJ.
- Basados en las estimaciones energéticas se realizó la comparación de los costos de utilizar gas LP, gas natural y electricidad para el secado. Esta demanda de energía representó ahorros en la comparativa con gas LP de \$9.58 y \$4.47 pesos por kilogramo de producto deshidratado y evitarían en promedio la emisión al ambiente de 2.48 y 0.16 kg de CO₂ por kilogramo de producto seco en la comparativa del secado con electricidad para el secador tipo invernadero y directo respectivamente.
- Utilizar el cuestionario como instrumento de recogida de datos sirvió como herramienta piloto en un primer acercamiento a los productores, sin embargo, debido a que fue un cuestionario realizado en un solo día y bajo las limitaciones que esto conlleva se deben de tomar los resultados con precaución. Aunado a esto, debido a que anterior a la aplicación de los cuestionarios se realizó una presentación de los resultados de la investigación se pudo haber inducido las respuestas.
- En promedio la zarzamora que se pierde en las etapas de cosecha y poscosecha es del 30%, lo que representaría para la región de Los Reyes, Michoacán un promedio de 39,440 toneladas de zarzamora desperdiciada anualmente. Las acciones que se están llevando a cabo para disminuir la cantidad de mermas que se generan no son suficientes para mitigar

la problemática, teniendo un nicho de oportunidad la implementación de las tecnologías solares.

- El principal beneficio percibido por los productores en la implementación de las tecnologías solares es darle valor agregado a su producción. Dentro de los principales factores que propiciarían o limitarían la aceptación de los deshidratadores solares se encuentra el precio o la inversión inicial, los costos de operación y la rentabilidad del equipo. En general los productos presentados en pulpa y polvo deshidratado recibieron una buena aceptación, mencionando que la característica más atractiva de ellos es la cantidad de antioxidantes y de manera generalizada denotaron interés en la creación de dulces especializados (nutritivos).
- De acuerdo a lo expresado en la “Meta 3” del objetivo 12 de los ODS dónde se establece que para 2030, se pretende reducir a la mitad el desperdicio mundial de alimentos, se contextualiza la investigación dónde los deshidratadores solares han demostrado ser una alternativa tecnológica adecuada para mejorar la eficiencia de los sistemas alimentarios a través de la reducción de pérdidas, creando productos a partir de las mermas con valor nutrimental, con mayor vida de anaquel y amigables con el medio ambiente.

5.1 RECOMENDACIONES

- Con base en lo desarrollado en la investigación se recomienda presentar los resultados de manera agregada para facilitar la visualización de los beneficios o limitaciones de implementar los deshidratadores solares en la reducción de pérdidas, con el objetivo de que los agricultores puedan tomar decisiones más acertadas de acuerdo al desempeño de las alternativas tecnológicas presentadas.
- Debido a la alta degradación térmica que presentan los compuestos antioxidantes y los polifenoles sería importante explorar la temperatura óptima de deshidratación a través de los perfiles térmicos. Para el caso de la sensibilidad a la luz, principalmente antocianinas, también sería de interés explorar la aplicación de recubrimientos vegetales para mejorar la conservación de los compuestos nutraceuticos.
- Se requiere realizar un estudio químico de los posibles contaminantes que pueden estar presentes en los productos deshidratados, ya que parte de las muestras de zarzamoras que se utilizaron son procedentes de la agricultura convencional, dónde se utilizan la aplicación de herbicidas, pesticidas, abonos químicos, etc. Habría que evaluar si la exposición solar o el cambio de temperatura no potencializa alguno de los compuestos presentes, siendo perjudicial para la salud.
- En términos de eficiencia energética el realizar modelos de simulación permitiría conocer los gastos energéticos bajo diferentes variables de operación y determinar cuál es la mejor opción tecnológica.
- El conocer los ahorros monetarios que representa en el secado las tecnologías solares frente a los combustibles fósiles son una idea general, sin embargo, es indispensable realizar evaluaciones económicas del tipo costo-beneficio y/o análisis financiero para determinar la rentabilidad de las tecnologías.
- Para conocer también los impactos ambientales totales del sistema se tendría que determinar la huella de carbono involucrada para ponderar el beneficio ambiental del uso de los deshidratadores solares frente a otros procesos de secado convencional.

- Para poder conocer la percepción y potencial de adopción tecnológica, se tendría que llevar a cabo una investigación exclusiva para la recogida de datos a través de cuestionarios. Se podría mapear a los actores clave del Sistema Producto Zaramora, así como, identificar a un número representativo de productores de los 1,300 involucrados en la red.
- El trabajo de campo se tendría que planificar en torno al número de cuestionarios, sin embargo, la presencia dentro del municipio tendría que ser suficiente para generar el espacio de confianza y libertad de expresión del productor encuestado hacia con el interlocutor. Por un lado, se investigaría sobre todas las cuestiones involucradas en la merma de la zaramora, y sus implicaciones económicas, ambientales, sociales, debido a la poca información que existe disponible en la literatura respecto al tema. Adicionalmente se abordarían todos los temas referentes a la aceptación y posible implementación de los deshidratadores solares encaminados a reducir las mermas.

REFERENCIA

- Acosta-Montoya, Ó., Vaillant, F., Cozzano, S., Mertz, C., Pérez, A. M., & Castro, M. V. (2010). Phenolic content and antioxidant capacity of tropical highland blackberry (*Rubus adenotrichus* Schltdl.) during three edible maturity stages. *Food Chemistry*, 119(4), 1479-1501.
- Agrifood and Fisheries Information Service. SIAP. (s.f.). Statistical Yearbook of Agricultural Production. Recuperado el 2 de Marzo de 2018, de http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola/
- AOAC International. (2000). Official Methods of Analysis of AOAC International (17th ed.). Gaithersburg, MD, USA: Association of Analytical Communities.
- AOAC. (1990). Official methods of analysis (Vol. One). (K. Helrich, Ed.) Virginia, Arlington, USA.
- Aravindh, M. a. (2014). Design and techno- economic analysis of a solar matrix collector for drying application. *Res Civil Environ Eng*, 2(3), 160-171.
- Astier, M., Masera, O. R., & Galván-Miyoshi, Y. (2008). Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional. Valencia, España: Mundiprensa.
- Basunia, M., & Abe, T. (2001). Thin-layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. *Journal of Food Engineering*, 47(4), 295-301.
- Blois, M. S. (26 de Abril de 1958). Antioxidant Determinations by the Use of a Stable Free Radical. *Nature*, 181, 1199 - 1200.
- Brand, W. W., Cuvelier, M., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food Sci. Technol.*, 28(1), 25-30.
- Bynoe, M., Cain, D., & Peralta, A. (2014). The use of Benefit Cost Analysis to assess Adaptation and Mitigation Interventions in the Caribbean: Case Studies. Caribbean Community Climate Change Centre, Economic and Social Impact , Belmopan.
- Clark, W. C. (2007). Sustainability Science: A room of its own. *Proceedings of the National Academy of Sciences* , 104(6), 1737-1738 .
- Carlos, S. J., & Carranza, S. Y. (2005). Análisis teórico de la combustión en quemadores de gas. *Scientia et Technica*, XI(29), 139-143.
- Casas, A. J., Repullo, L. J., & Donado, C. J. (20013). La encuesta como técnica de investigación. *Elaboración de cuestionarios y tratamiento estadístico de los datos. Atención Primaria*, 31(8), 469-558.
- Cash, D. W., Clark, W. C., Alcock, F., Dickson, N. M., Eckley, N., Guston, D. H., . . . Mitchell, R. B. (2003). Knowledge systems for sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14), 8086-8091.
- Casp V, A. (2003). *Procesos de conservación de alimentos* (2a edición ed.). Madrid: Mundi-Prensa.
- Cho, M. J., Howard, L. R., Prior, R. L., & Clark, J. R. (2004). Flavonoid glycosides and antioxidant capacity of various blackberry, blueberry and red grape genotypes determined by high-performance liquid chromatography/mass spectrometry. *J. Sci. Food Agric.* , 84(13), 1771–1782.
- CRE. (2017). Comisión Reguladora de Energía. Recuperado el 22 de Septiembre de 2018, de Factor de Emisión del Sector Eléctrico Nacional: <https://www.gob.mx/>
- CRE. (2018). Comisión Reguladora de Energía. Recuperado el 16 de Septiembre de 2018, de Precios al público de gas LP reportados por los distribuidores:

- <https://www.gob.mx/cre/documentos/precios-al-publico-de-gas-lp-reportados-por-los-distribuidores>
- Dai, J. J., Russell, D. P., & Mumper, J. (2007). Characterization of Blackberry Extract and Its Antiproliferative and Anti-Inflammatory Properties. *Journal of Medicinal Food*, 10(2).
- de Rada, V. D. (2007). Tipos de encuestas considerando la dimensión temporal. *Papers*, 86, 131-145.
- Desai, S. R., Vijaykumar, P., & Anantachar, M. (2009). Performance evaluation of farm solar dryer for chilly drying. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*, 22(2), 382-384.
- Ekechukwu, O., & Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management*, 40(6), 615-655.
- FAO. (2012). Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo – Alcance, causas y prevención. Roma.
- FAO. (2015). Pérdidas y desperdicio de alimentos en América Latina y el Caribe. Boletín 2.
- FAO. (2016). How access to energy can influence food losses. A brief overview. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Climate and Environment division, Rome.
- FAO. (2017). FAOSTAT. Recuperado el 12 de 07 de 2017, de Datos de producción de cultivos: <http://www.fao.org/faostat/es/#data>
- FAO. (2017). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperado el 2 de Octubre de 2017, de <http://www.fao.org/faostat>
- FAO. (2017). Reflexiones sobre el sistema alimentario y perspectivas para alcanzar su sostenibilidad en América Latina y el Caribe . Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Oficina Regional para América Latina y el Caribe, Santiago.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2016). El Estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación. Cambio climático, agricultura y seguridad alimentaria. Roma.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2017). The future of food and agriculture-Trends and challenges. Rome.
- FIRA. (2016). Panorama Agroalimentario, Berries 2016. Fideicomiso Instituidos en Relación con la Agricultura, Dirección de Investigación y Evaluación Económica Sectorial.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s.f.). FAOSTAT . Recuperado el 15 de february de 2018, de Statistics Database: <http://www.fao.org/faostat/>
- FUMIAT. (2005). Cultivo de Berries (Frambuesa y Zorzamora) en México. Plan de negocios. Fundación Mexicana para la investigación Agropecuaria y Forestal.
- Gallardo, I. A., & Cuadra, J. G. (1999). Producción de mora híbrida (Zorzamora). Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA, Comisión Nacional de Riego CNR, Chile.
- Galván-Miyoshi, Y. (2004). Métodos multicriterio en la evaluación de sustentabilidad de un sistema de manejo de recursos naturales: el caso de las estufas eficientes de leña. Tesis de licenciatura.
- García, A. F., Alfaro, E. A., Hernández, M. A., & Molina, A. M. (2006). Diseño de Cuestionarios para la recogida de información: metodología y limitaciones. *Revista Clínica de Medicina de Familia*, 1(5), 232-236.
- Geankoplis, C. J. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias (3a edición ed.). Ciudad de México, México: CECSA.

- Gu, L., Kelm, M. A., Hammerstone, J. F., Beecher, G., Holden, J., Haytowitz, D., . . . Prior, R. L. (2004). Concentrations of Proanthocyanidins in Common Foods and Estimations of Normal Consumption. *The Journal of Nutrition*, 134(3), 613–617.
- Guitouni, A., & J-M, M. (s.f.). Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method (Vol. 109). *European Journal of Operational Reserch*.
- HLPE. (2014). Las pérdidas y el desperdicio de alimentos en el contexto de sistemas alimentarios sostenibles. Un informe del Grupo de alto nivel de expertos en seguridad alimentaria y nutrición del Comité de Seguridad Alimentaria Mundial. . Roma.
- Hatier, J.-H. B., & Gould, K. S. (2009). Anthocyanin Function in Vegetative Organs. En *Anthocyanins* (págs. (325) 1-22). New York: Springer.
- Hudson, U., & Messa, M. (2016). Documento de posición sobre las pérdidas y desperdicios alimentarios. *Slow Food*.
- Hudson, U., & Messa, M. (2017). Documento de posición sobre las pérdidas y desperdicios alimentarios. *Slow Food*.
- INECC. (2014). Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Coordinación General de Cambio Climático y Desarrollo Bajo en Carbono.
- Ímaz, G. M., González, V. M., Ayala, I. D., Beristain, A. A., Delgado, R. G., Gacia, B. C., . . . Masera, C. O. (2015). Siguiendo la huella. El impacto de las actividades humanas (Vol. IV). D.F, México: Universidad Nacional Autónoma de México: Dirección General de Divulgación de la Ciencia: Programa Universitario de Estrategias para la Sustentabilidad: Siglo XXI Editores.
- Jain, D., & Tiwari, G. (2003). Thermal aspects of open sun drying of various crops. *Energy*, 28(1), 37-54.
- Janjai, S., Mahayothee, B., Lamler, N., Bala, B., Precoppe, M., Nagle, M., & Müller, J. (2010). Diffusivity, shrinkage and simulated drying of litchi fruit (*Litchi Chinensis* Sonn.). *Journal of Food Engineering*, 96(2), 214-221.
- Jensen, G. S., Wu, X., Patterson, K. M., Barnes, J., Steve, C. G., Scherwitz, L., . . . Schauss, A. G. (2008). In Vitro and in Vivo Antioxidant and Anti-inflammatory Capacities of an Antioxidant-Rich Fruit and Berry Juice Blend. Results of a Pilot and Randomized, Double-Blinded, Placebo-Controlled, Crossover Study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(18), 8326-8333.
- Kafkas, E., M. K., N. T., & K. B. (2006). Analysis of sugars, organic acids and vitamin C contents of blackberry genotypes from Turkey. *Food Chemistry*(97), 732–736.
- Kamel Msaada, S. T.-B. (2016). Chemical Composition and Antioxidant Activities of Tunisian *Thymus capitatus* L. Methanolic Extract. *International Journal of Food Properties*, 19(6), 1381-1390.
- Kates, R. W. (6 de December de 2011). What kind of a science is sustainability science? *PNAS*, 108(49), 19449–19450.
- Kates, R. W., Clark, W. C., Corell, R., Hall, J. M., Jaeger, C. C., & al, e. (27 de April de 2001). Sustainability science. *Science*, 292(5517), 641-642.
- Kaume, L., Howard, L. R., & Devareddy, L. (2012). The Blackberry Fruit: A Review on Its Composition and Chemistry, Metabolism and Bioavailability, and Health Benefits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*(60), 5716–5727.

- Kumar, M., Sansaniwal, S. K., & Khatak, P. (2015). Progress in solar dryers for drying various commodities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55(2016), 346-360.
- Lee, J. (2017). Blackberry Fruit Quality Components, Composition, and Potential Health Benefits. En H. K. Hall, & R. C. Funt (Edits.), *Blackberries and their Hybrids. Crop Production Science in Horticulture*. Boston, MA: CAB International.
- Lee, J., Dossett, M., & Finn, C. E. (16 de May de 2012). Rubus fruit phenolic research: The good, the bad, and the confusing. *Food Chemistry*, 130(4), 785–796.
- Lee, J., Finn, C. E., & Wrolstad, R. E. (2004). Comparison of Anthocyanin Pigment and Other Phenolic Compounds of *Vaccinium membranaceum* and *Vaccinium ovatum* Native to the Pacific Northwest of North America. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(23), 7039–7044.
- Lik, H. C., Vinayak, J. S., Pheng, O. S., & Sadashiv, M. A. (2012). *Solar Drying: Fundamentals, Applications and Innovations*. Recuperado el 14 de Mayo de 2018, de <https://www.arunmujumdar.com>
- López, J., Vega-Gálvez, A., Torres, M., Lemus-Mondaca, R., Q.-F. I., & Di, S. K. (2013). Effect of dehydration temperature on physico-chemical properties and antioxidant capacity of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) . *Chilean Journal of Agricultural reserch*, 73(3), 293-300.
- López, Ortíz. A. (2011). Secado convectivo de ajo (*Allium sativum*, L.) con condiciones variables de operación.
- López-Ortíz, A., Pilatowsky-Figueroa, I., García-Valladares, O., & Rodríguez-Ramírez, J. (2018). Heat and mass transfer during drying of Basil (*Ocimum basilicum*) and pulp of blackberry (*Rubus rosoideae*) in an active greenhouse dryer coupled to an air solar heating system.
- López, V. E., & Pilatowsky, F. I. (2015). Drying of Strawberry in a Direct and Indirect Solar Dryer (Effects of Drying Methods on Total Phenolic Content). *IJAEE*, 2(2), 61-63.
- Lutz, M., Hernández, J., & Henríquez, C. (2015). Phenolic content and antioxidant capacity in fresh and dry fruits and vegetables grown in Chile. *CyTA - Journal of Food*, 13(4), 541-547.
- Mabry, T., Markham, K. R., & Thomas, M. B. (1970). *The systematic identification of flavonoids*. Nueva York, EEUU: Springer.
- Madrau, M. A., Piscopo, A., Sanguinetti, A. M., Del Caro, A., Poiana, M., Romeo, F. V., & Piga, A. (2009). Effect of drying temperature on polyphenolic content and antioxidant activity of apricots. *European Food Research and Technology*, 228, 441–448.
- Margarita Castillo Téllez, I. P. (Enero de 2017). Solar drying of Stevia (*Rebaudiana Bertoni*) leaves using direct and indirect technologies. *Solar Energy*, 159(1), 898-907.
- Masera, O., Astier, M., & López-Ridaura, S. (1999). *Sustentabilidad y Manejo de Recursos Naturales: El marco MESMIS*. México: Mundiprensa.
- Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. (2011). A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1777-1790.
- Merchard, R. M. (2013). La transnacionalización de la agricultura de exportación en México. *Geografía en cuestión*, 6(02), 235-261.
- Miller, T. R. (2013). Constructing sustainability science: emerging perspectives and research trajectories. *Sustainability Science*, 8(2), 279–293.
- Midili, A. (25 de June de 2001). Determination of pistachio drying behaviour and conditions in a solar drying system. *Energy Research*, 25(8), 715-725.

- Morales, A. Y., & Castillo, S. E. (Diciembre de 2017). Red de comercialización de zarzamora en Los Reyes, Michoacán. *Commercium PLUS*, 2(1), 29-54.
- Moreno, J. A., Cerutti, O. R., & Gutiérrez, A. F. (2014). La Ecotecnología en México. México.
- Mustayen, A., Mekhilef, S., & Saidur, R. (2014). Performance study of different solar dryers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 463–470.
- ODEPA, Oficina de Estudios y Política Agraria. (2017). Pérdida y desperdicios de alimentos: diciembre 2017.
- ONU, Organización de las Naciones Unidas. (2005). Documento Final de la Cumbre Mundial 2005.
- ONU, Organización Naciones Unidas. (2015). Memoria del Secretario General sobre la labor de la Organización. Asamblea General.
- Orsata, V., Raghavana, G. S., & Soslea, V. (2008). Adapting Drying Technologies for Agri-Food Market Development in India. *Drying Technol.*, 26(11), 1355 — 1361.
- Oxford English Dictionary. (24 de octubre de 2018). <https://en.oxforddictionaries.com/>.
- Parfitt, J., Barthel, M., & Macnaughton, S. (2010). Food waste within food supply chains: quantification and potential for change to 2050. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 365(1554), 3065–3081.
- PEMEX. (2018). Hoja de Datos de Seguridad Gas Natural. México. Pemex Gas y Petroquímica Básica.
- Rodríguez, G. S. (2008). La Red de Valor de la Zarzamora. Fundación Produce Michoacán, Morelia.
- Rotstein, E., Singh, R. P., & Valentas, K. J. (1997). *Handbook of Food Engineering Practice*. New York, Boca Raton, USA: CRC Press.
- Roy, B. (1996). *Multicriteria methodology for decision aiding*. Londres: Kluwer Academic Publisher.
- Schettini, P., & Cortazzo, I. (2015). Análisis de datos cualitativos en la investigación social: procedimientos y herramientas para la interpretación de información cualitativa. Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Trabajo Social. EDULP.
- Sánchez, R. G. (2008). La Red de Valor de la Zarzamora. El cluster de Los Reyes, Michoacán un ejemplo de reconversión competitiva. Fundación Produce Michoacán, Sistema de Inteligencia de Mercados, Morelia.
- SAGARPA. (2012). Panorama de la seguridad alimentaria y nutricional en México.
- Sandoval, J. A. (1998). Determinación de los coeficientes de transferencia de masa y calor durante el secado de hojuelas de avena. Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Celaya, Ingeniería Química.
- Seeram, N. P., Lee, R., Scheuller, H. S., & Heber, D. (2006). Identification of phenolic compounds in strawberries by liquid chromatography electrospray ionization mass spectroscopy. *Food Chemistry*, 97(1), 1-11.
- SENER. (2016). Balance Nacional de Energía. Secretaría de Energía.
- Serth, R. W., & Lestina, T. G. (2014). *Process Heat Transfer: Principles, Applications and Rules of Thumb* (2nd edition ed.). USA: Elsevier Science Publishing Co Inc.
- SIAP. (s.f.). Recuperado el 15 de Agosto de 2017, de Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera: <https://www.gob.mx/siap/>
- SIAP. (2017). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Recuperado el 17 de Septiembre de 2017, de http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola/

- SIAP. (2018). Atlas Agroalimentario 2012-2018. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Ciudad de México.
- Singleton, V., & Rossi, J. J. (Noviembre de 1964). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144-158.
- SISPROA. (2015). Plan Rector estatal. Sistema Producto zarzamora A.C. Programa de Fomento a la Agricultura, Componente Sistem Producto Agrícola (SISPROA), Uruapan.
- Spangenberg, J. H. (14 de June de 2011). Sustainability science: a review, an analysis and some empirical lessons. *Environmental Conservation*, 38(3), 275–287.
- Spieritz, H. (2010). Food production, crops and sustainability: Restoring confidence in science and technology. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2(5-6), 439-443.
- Strik, B. C., & Finn, C. (Enero de 2012). Blackberry Production Systems – a Worldwide Perspective. En B. Tanović (Ed.), *Xth Intl. Rubus and Ribes Symp.*
- Strik, B. (2007). *Berry Fruit. Value-added products for health promotion (1st ed ed.)*. (Y. Zhao, Ed.) Boca Raton, FL, US: CRC Press.
- Strumillo, C., & Kudra, T. (1986). *Drying: Principles, applications, and aesign (Vol. 3)*. Gordon and breach science publishers.
- Türemiş, N., Kafkas, S., Kafkas, E., & Onur, C. (2003). Fruit characteristics of nine thornless blackberry genotypes. *Journal of the American Pomological Society*, 57(4), 161–165.
- Talcott, S. (2007). Chemical components of berry fruits. En Y. Zhao (Ed.), *Berry Fruit Value-Added Products for Health Promotion (1ra Edición ed., Vol. 1, págs. 51-72)*. Boca Raton, FL: CRC.
- Tamayo, D. H. (2017). *Diseño, construcción, instrumentación y evaluación de un secador solar tipo invernadero*. Tesis, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, México.
- Váquiro, H., Clemente, G., García-Pérez, J., Mulet, A., & Bon, J. (2009). Enthalpy-driven optimization of intermittent drying of *Mangifera indica* L. *Chemical Engineering Research and Design*, 87(7), 885-898.
- Vallejos, I. A., Agudo, A. Y., Mañas, R. B., Arribas, M. J., Camarero, R. L., & Ortí, M. M. (2011). *Investigación social mediante encuesta (1a ed.)*. Madrid, España: Editorial Centro de Estudios Ramón Areces.
- Vidaña, E. C. (2016). *Estudio experimental del proceso de secado solar directo e indirecto y su efecto sobre la capacidad antioxidante de la fresa (Fragaria x ananassa), arándano azul (Vaccinium corymbosum) y zarzamora (rubus fruticosus)*. Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, Instituto de Energías Renovables, IER, México.
- W.Brand-Williams, M. C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. (Elsevier, Ed.) *LWT- Food Science and Technology*, 28(1), 25-30.
- World Commission on Environment and Development. . (1987). *Our common future*. Oxford: Oxford University Press.
- Wrolstad, R. E., Culbertson, J. D., Nagaki, D. A., & Madero, C. F. (1980). Sugars and nonvolatile acids of blackberries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 28(3), 553-558.

- Zhang, X., Zhao, X., Smith, S., Xu, J., & Yu, X. (2012). Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies. . *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 599-617.
- Zhishen, J., Mengcheng, T., & Jianming, W. (1999). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chem.*, 64(4), 555-559.
- Ziesemer, J. (2007). Energy use in organic food systemsEnergy Use in Organic Food Systems. Natural Resources Management and Environment Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/docs/eims/upload/233069/energy-use-oa.pdf>.

ANEXO.
Formato de cuestionario

“POTENCIAL DE ACEPTACIÓN DE DESHIDRATADORES SOLARES PARA SU USO EN LA
REDUCCIÓN DE MERMAS AGRÍCOLAS DE ZARZAMORA”

Buen día mi nombre es Azucena Silva Norman, estudiante de la Universidad Nacional Autónoma de México del posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad. Actualmente me encuentro realizando una investigación para evaluar aplicaciones de los deshidratadores solares para su uso en la reducción de mermas agrícolas de zarzamora, dándole valor agregado a un producto considerado desperdicio. Con esta encuesta se pretende conocer el grado de aceptación de las tecnologías solares y su potencial de aceptación en productores de zarzamora. Por tal motivo solicito su ayuda para responder la siguiente encuesta la cual no le llevara más de 10 minutos.

Muchas gracias por su colaboración.

Nombre:

Cargo:

6 DATOS GENERALES DE PRODUCCIÓN

6.1 ¿Podría decirme un aproximado de su producción total por ciclo de cultivo?

6.2 Podría describir de forma general las etapas de la producción de zarzamora_____

7 DE LAS MERMAS DE ZARZAMORA

7.1 De las etapas descritas anteriormente ¿identifica en cuál se generan pérdidas y/o mermas

Nombre de etapa	Se genera merma	
_____	<input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/> No
_____	<input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/> No
_____	<input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/> No
_____	<input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/> No

7.2 Desde su percepción, ¿cuáles son las principales causas asociadas con la pérdida/desperdicio de que la zarzamora en cada una de las etapas?

Etapas	Causa
_____	_____
_____	_____
_____	_____

8.6 ¿Tendría algún comentario o sugerencia sobre los deshidratadores solares? _____

8.7 Entre que rango de precios considera que sería viable comprar un deshidratador (considerando el volumen de mermas que genera) _____

9 DE LOS PRODUCTOS OBTENIDO POR DESHIDRATACIÓN

9.1 De los productos presentados por deshidratación: *pulpa y polvo de zarzamora*.
¿Considera que tienen valor comercial?

Sí No

9.2 ¿Cuál aplicación de los productos le pareció más viable y por qué?

9.3 De todas las características descritas para los productos obtenidos por deshidratación, ¿cuál o cuáles considera que son más importantes para el mercado?

- Valor nutrimental
- Antioxidantes
- Periodo prolongado de almacenamiento
- Variedad de aplicaciones

10 DATOS DE CONTACTO

10.1 ¿Estaría dispuesto a seguir retroalimentando la investigación para el desarrollo de prototipos y aplicaciones de los deshidratadores solares?

Sí No

10.2 ¿Me podría proporcionar su teléfono y correo electrónico?

La encuesta ha terminado.

Le agradezco mucho su tiempo y colaboración, si tiene alguna duda o comentario nos gustaría escucharlo.