

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química



Evaluación del efecto de pretratamiento de manzanas en el proceso  
de secado para la producción de *snacks*

Trabajo de graduación presentado por Irina Michelle Siguil Palacios para  
optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Química

Guatemala,


2023



Vo. Bo.

Tema examinadora

(f)   
Msc. & MBA Ing. Luis Núñez

(f)   
Msc. & MBA Ing. Luis Núñez

(f)   
Msc. Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f)   
Ing. José Andrés Lam

Fecha de aprobación: Guatemala, 27 de octubre de 2023

## Prefacio

Este trabajo de graduación, sin duda, ha sido uno de los retos más grandes de mi vida. Durante la elaboración de este trabajo, me enfrenté a diferentes retos académicos, de recursos, personales, entre otros. Sin embargo, como todo en la vida, los retos nos permiten crecimiento, oportunidades, lecciones y experiencias. A pesar de lo difícil que pudo parecer realizar este trabajo, debo agradecer cada persona que fue parte de este camino. Primero a Dios por darme la fortaleza y sabiduría y por permitirme tener a las personas que mencionaré a continuación.

Estaré eternamente agradecida con el esfuerzo que mis padres brindaron, el apoyo, especialmente por la motivación que representaron para mí para completar este trabajo. Gracias por enseñarme a dar lo mejor de mí en todo y por impulsarme a seguir cuando lo necesitaba. Gracias por darme las mejores oportunidades, ya que, sin ellos, todo lo que soy hoy, no sería posible. Pero sobre todas las cosas, agradezco el amor que me han dado toda la vida.

Quiero agradecerle a mi hermano, por siempre sacarme una sonrisa cuando lo necesitaba y por hacerme compañía durante todo el proceso. Le agradezco a mis amigos del colegio y a mis amigos que hice durante la carrera por darme ánimos cuando lo necesité y por siempre estar para mí. A mis abuelitas, que siempre me guiaron con sus palabras y por estar pendiente de mí todo el tiempo. A mis abuelos, por cuidarme, aunque ya no estén con nosotros. Quiero hacer un homenaje a mi abuelo Julio Palacios, quién siempre estuvo orgulloso de que su nieta estudiara una ingeniería. Quiero que sepa que fue el motor e inspiración principal para mí al escribir este trabajo de graduación.

El conocimiento que adquirí, las experiencias y las puestas en práctica que realicé me guiarán toda la vida y me permitirá el desarrollo profesional y personal que todos buscamos. Agradezco a los catedráticos que me guiaron durante la carrera y en este trabajo de graduación, los que nos compartieron sus conocimientos y sus experiencias para que pudiera entender mejor el mundo. Agradezco su dedicación en su trabajo y el apoyo que me dieron cada uno de ellos, con el fin de formar la persona profesional que soy ahora. Un especial agradecimiento al ingeniero Gamaliel Zambrano, el director de la carrera y el ingeniero Luis Núñez, mi asesor de este trabajo.

A raíz de mi experiencia de vivir de forma independiente para poder estudiar ingeniería química, una de las cosas que conllevaba era que mi alimentación dependía completamente de mí. Por lo que una de las constantes búsquedas eran alimentos para consumir entre comidas. La población guatemalteca cuenta con patrones de consumo en los que se tiende a ingerir alimentos poco saludables durante el tiempo entre comidas. Se tiende a consumir galletas altas en azúcar, frituras altas en grasas y sodio, entre otras opciones. Dado a que estas suelen ser las refacciones más económicas y de mayor facilidad de adquisición alrededor del país.

Sin embargo, existen nuevas tendencias ya que el consumidor se preocupa por su salud y por la calidad de alimentos que consume y personal esta era una preocupación. Por ello se han desarrollado diferentes *snacks* o refacciones que son una alternativa saludable y nutritiva. Una de estas opciones son las frutas deshidratadas. Estas frutas ofrecen beneficios tanto a la salud del consumidor como facilidad de transporte, almacenamiento y versatilidad de consumo. Por ello decidí investigar sobre la deshidratación de frutas, buscando formas más eficientes para realizar el proceso de deshidratación.

## Índice

Prefacio .....	iv
Lista de tablas.....	vii
Lista de figuras .....	xii
Resumen.....	xiv
Abstract .....	xv
I.    Introducción .....	1
II.   Justificación.....	2
III.  Objetivos .....	4
A.  Objetivo general .....	4
B.  Objetivos específicos .....	4
IV.   Marco teórico .....	5
A.  Snacks nutritivos .....	5
B.  Frutas deshidratadas .....	5
C.  Manzana .....	6
D.  Operación de secado .....	8
E.  Tipos de secado .....	8
Clasificación por método de operación.....	9
Clasificación según el método de transferencia de calor .....	9
F.  Principales equipos de secado .....	9
Equipos por lotes .....	9
Equipos continuos.....	12
G.  Pretratamiento de secado de alimentos.....	13
Pretratamientos Químicos .....	14
Pretratamientos físicos o mecánicos .....	14
Otros tipos de pretratamientos .....	14
H.  Secado de alimentos .....	15
Modificaciones producidas en el alimento por la deshidratación.....	15
Actividad del agua .....	17
I.  Fenómenos de transporte en el secado.....	18
J.  Transferencia de masa en el secado.....	19
La humedad .....	19
La velocidad de secado por lotes .....	21
Curva de rapidez de secado .....	21
K.  Eficiencia energética.....	26

L.	Diagrama de flujo teórico .....	27
M.	Análisis de varianza (ANOVA) .....	28
V.	Antecedentes .....	30
VI.	Metodología .....	35
A.	Descripción .....	35
1.	Selección de materia prima .....	35
2.	Caracterización de materia prima .....	35
3.	Cortado de rodajas de manzana .....	36
4.	Pretratamiento de secado de materia prima.....	37
5.	Arranque del secador de bandejas .....	37
6.	Proceso de secado .....	37
7.	Curva de secado .....	38
8.	Balace de masa y energía de secado experimentales .....	38
9.	Diagrama de línea de producción .....	41
B.	Fundamento estadístico.....	41
VII.	Resultados .....	43
VIII.	Discusión.....	52
IX.	Conclusiones .....	59
X.	Recomendaciones .....	60
XI.	Bibliografía .....	61
XII.	Anexos .....	64
	Anexo A: Referencias .....	64
	Anexo B: Cálculos de muestra estadísticos .....	65
	Anexo C: Cálculo de muestra .....	66
	Anexo D: Incertidumbre.....	79
	Anexo E: Datos originales del experimento .....	80
	Anexo F: Datos calculados .....	106
	Anexo G: Balances de masa y energía del proceso real.....	154
	Anexo H: Fotografías de experimentación.....	159
XIII.	Glosario.....	169

## Lista de tablas

Tabla 1. Composición nutricional de la manzana .....	7
Tabla 2. Análisis ANOVA para la comparación de medias de porcentaje de pérdida de masa a diferentes temperaturas .....	41
Tabla 3. Análisis ANOVA para la comparación de medias de porcentaje de pérdida de masa a diferentes pretratamientos .....	42
Tabla 4. Resultados de caracterización de materia prima de manzana gala .....	43
Tabla 5. Eficiencia de secado, consumo de energía por calentamiento de aire y eficiencia energética de secado a diferentes temperaturas .....	45
Tabla 6. Prueba ANOVA para medias de porcentaje de pérdida de masa en 6 muestras de cada secado a diferentes temperaturas utilizando alfa 0.1 .....	45
Tabla 7. Eficiencia de secado, consumo de energía por calentamiento de aire y eficiencia energética de secado a diferentes condiciones .....	47
Tabla 8. Prueba ANOVA para medias de porcentaje de pérdida de masa en 6 muestras de cada secado con y sin pretratamiento utilizando alfa 0.1 .....	47
Tabla 9. Comparación de resultado características físicas de rodajas secadas a diferentes pretratamientos ...	47
Tabla 10. Balance de masa para línea de producción de sobres de 10 gramos de snacks por lote de producción .....	48
Tabla 11. Balance de energía para línea de producción de sobres de 10 gramos de snacks por lote de producción.....	49
Tabla 12. Equipos propuestos para la línea de producción de snacks de manzana en sobres de 10 g en operación por lotes .....	49
Tabla 13. Información de equipo y cristalería utilizados para la realización de la experimentación .....	64
Tabla 14. Datos fisicoquímicos de los compuestos analizados en la experimentación.....	64
Tabla 15. Masa de manzanas gala frescas y sin pelar .....	80
Tabla 16. Diámetro ecuatorial manzanas gala frescas y sin pelar.....	80
Tabla 17. Diámetro polar manzanas Gala frescas y sin pelar .....	80
Tabla 18. Masa manzanas gala peladas y descorazonadas .....	80
Tabla 19. Datos para relación de diámetros manzanas gala .....	81
Tabla 20. Masa jugo extraído de manzana gala .....	81
Tabla 21. Cantidad de jugo extraído por manzana gala .....	81
Tabla 22. Sólidos solubles (grados Brix) de jugo de manzana gala.....	81
Tabla 23. Masa muestra para acidez titulable de jugo de manzana gala .....	81
Tabla 24. Volumen de NaOH 0.1 N utilizado en titulación para ácidos titulables de jugo de manzana .....	82
Tabla 25. Resultado de pruebas microbiológicas.....	82
Tabla 26. Humedades relativas de sólidos utilizados en pruebas de secado .....	82
Tabla 27. Condiciones de operación de secado 1 a 55°C de rodajas de manzana sin pretratamiento .....	83
Tabla 28. Temperatura inicial manzana secado 1 .....	83
Tabla 29. Masa manzana previo y posterior a secado 1 .....	83
Tabla 30. Grosor de 6 rodajas de manzana utilizadas para la curva de secado .....	83
Tabla 31. Datos de masa de 6 rodajas de muestra de secado 1 contra tiempo.....	83
Tabla 32. Condiciones de aire de secado 1 .....	84
Tabla 33. Condiciones de operación de secado 2 a 55°C de rodajas de manzana sin pretratamiento .....	84
Tabla 34. Temperatura inicial manzana secado 2 .....	84
Tabla 35. Masa manzana previo y posterior a secado 2 .....	84
Tabla 36. Datos de masa de 4 rodajas de muestra de secado 2 contra tiempo.....	85
Tabla 37. Condiciones de aire de secado 2 .....	85
Tabla 38. Condiciones de operación de secado 3 a 55°C de rodajas de manzana sin pretratamiento .....	85
Tabla 39. Temperatura inicial manzana secado 3 .....	85
Tabla 40. Masa manzana previo y posterior a secado 3 .....	86
Tabla 41. Grosor de 6 rodajas de manzana utilizadas para la curva de secado 3.....	86

Tabla 42. Diámetros mayor y menor de las 6 rodajas de muestra secado 3 .....	86
Tabla 43. Datos de masa de 6 rodajas de muestra de secado 3 contra tiempo.....	86
Tabla 44. Condiciones de operación de secador respecto el tiempo en el secado 3 .....	87
Tabla 45. Condiciones de operación dentro de secador en secado 3 .....	87
Tabla 46. Condiciones de operación de secado 4 a 60°C de rodajas de manzana sin pretratamiento .....	87
Tabla 47. Temperatura inicial manzana secado 4 .....	87
Tabla 48. Masa manzana previo y posterior a secado 4 .....	88
Tabla 49. Grosor de 6 rodajas de manzana utilizadas para la curva de secado 4.....	88
Tabla 50. Diámetros mayor y menor de las 6 rodajas de muestra secado 4 .....	88
Tabla 51. Datos de masa de 6 rodajas de muestra de secado 4 contra tiempo.....	88
Tabla 52. Condiciones de operación de secador respecto el tiempo en el secado 4 .....	89
Tabla 53. Condiciones de operación dentro de secador en secado 4 .....	89
Tabla 54. Condiciones de operación de secado 5 a 60°C de rodajas de manzana sin pretratamiento .....	90
Tabla 55. Temperatura inicial manzana secado 5 .....	90
Tabla 56. Masa manzana previo y posterior a secado 5 .....	90
Tabla 57. Grosor de 6 rodajas de manzana utilizadas para la curva de secado 5.....	90
Tabla 58. Diámetros mayor y menor de las 6 rodajas de muestra secado 5 .....	90
Tabla 59. Datos de masa de 6 rodajas de muestra de secado 5 contra tiempo.....	91
Tabla 60. Condiciones de operación de secador respecto el tiempo en el secado 5 .....	91
Tabla 61. Condiciones de operación dentro de secador en secado 5 .....	91
Tabla 62. Condiciones de operación de secado 6 a 65°C de rodajas de manzana sin pretratamiento .....	92
Tabla 63. Temperatura inicial manzana secado 6 .....	92
Tabla 64. Masa manzana previo y posterior a secado 6 .....	92
Tabla 65. Grosor de 6 rodajas de manzana utilizadas para la curva de secado 6.....	92
Tabla 66. Diámetros mayor y menor de las 6 rodajas de muestra secado 6.....	93
Tabla 67. Datos de masa de 6 rodajas de muestra de secado 6 contra tiempo.....	93
Tabla 68. Condiciones de operación de secador respecto el tiempo en el secado 6 .....	93
Tabla 69. Condiciones de operación dentro de secador en secado 6 .....	94
Tabla 70. Condiciones de operación de secado 7 a 65°C de rodajas de manzana sin pretratamiento .....	94
Tabla 71. Temperatura inicial manzana secado 7 .....	94
Tabla 72. Masa manzana previo y posterior a secado 7 .....	94
Tabla 73. Grosor de 6 rodajas de manzana utilizadas para la curva de secado 7.....	95
Tabla 74. Diámetros mayor y menor de las 6 rodajas de muestra secado 7.....	95
Tabla 75. Datos de masa de 6 rodajas de muestra de secado 7 contra tiempo.....	95
Tabla 76. Condiciones de operación de secador respecto el tiempo en el secado 7 .....	95
Tabla 77. Condiciones de operación dentro de secador en secado 7 .....	96
Tabla 78. Condiciones de operación de secado 8 a 65°C de rodajas de manzana con pretratamiento mecánico .....	96
Tabla 79. Temperatura inicial manzana secado 8 .....	96
Tabla 80. Masa manzana previo y posterior a secado 8 .....	97
Tabla 81. Grosor de 6 rodajas de manzana utilizadas para la curva de secado 8.....	97
Tabla 82. Diámetros mayor y menor de las 6 rodajas de muestra secado 8.....	97
Tabla 83. Datos de masa de 6 rodajas de muestra de secado 8 contra tiempo.....	97
Tabla 84. Condiciones de operación de secador respecto el tiempo en el secado 8 .....	98
Tabla 85. Condiciones de operación dentro de secador en secado 8 .....	98
Tabla 86. Condiciones de operación de secado 9 a 65°C de rodajas de manzana sin pretratamiento .....	98
Tabla 87. Temperatura inicial manzana secado 9 .....	99
Tabla 88. Masa manzana previo y posterior a secado 9 .....	99
Tabla 89. Grosor de 6 rodajas de manzana utilizadas para la curva de secado 9.....	99
Tabla 90. Diámetros mayor y menor de las 6 rodajas de muestra secado 9.....	99
Tabla 91. Datos de masa de 6 rodajas de muestra de secado 9 contra tiempo.....	99
Tabla 92. Condiciones de operación de secador respecto el tiempo en el secado 9 .....	100

Tabla 93. Condiciones de operación dentro de secador en secado 9 .....	100
Tabla 94. Condiciones de operación de secado 10 a 65°C de rodajas de manzana con pretratamiento mecánico .....	101
Tabla 95. Temperatura inicial manzana secado 10 .....	101
Tabla 96. Masa manzana previo y posterior a secado 10 .....	101
Tabla 97. Grosor de 6 rodajas de manzana utilizadas para la curva de secado 10.....	101
Tabla 98. Diámetros mayor y menor de las 6 rodajas de muestra secado 10 .....	101
Tabla 99. Datos de masa de 6 rodajas de muestra de secado 10 contra tiempo.....	102
Tabla 100. Condiciones de operación de secador respecto el tiempo en el secado 10.....	102
Tabla 101. Condiciones de operación dentro de secador en secado 10.....	102
Tabla 102. Condiciones de operación de secado 11 a 65°C de rodajas de manzana con pretratamiento químico .....	103
Tabla 103. Temperatura inicial manzana secado 11 .....	103
Tabla 104. Masa manzana previo y posterior a secado 11 .....	103
Tabla 105. Grosor de 6 rodajas de manzana utilizadas para la curva de secado 11 .....	103
Tabla 106. Diámetros mayor y menor de las 6 rodajas de muestra secado 11 .....	103
Tabla 107. Datos de masa de 6 rodajas de muestra de secado 11 contra tiempo.....	104
Tabla 108. Condiciones de operación de secador respecto el tiempo en el secado 11.....	104
Tabla 109. Condiciones de operación dentro de secador en secado 11.....	105
Tabla 110. Relación de diámetros de manzanas .....	106
Tabla 111. Jugosidad de manzanas Gala .....	106
Tabla 112. Acidez titulable (porcentaje de ácido málico) .....	106
Tabla 113. Área superficial de rodajas de muestra de secado 3.....	106
Tabla 114. Sólido seco de muestras de secado 3 y relación de sólidos secos sobre área superficial.....	107
Tabla 115. Agua perdida con respecto al tiempo de secado 3 .....	107
Tabla 116. Contenido de agua de muestras en secado 3 .....	107
Tabla 117. Humedad en base húmeda secado 3 (kg agua/kg sólido húmedo) .....	108
Tabla 118. Humedad base seca de secado 3 (kg agua/kg sólido seco).....	108
Tabla 119. Velocidad de secado o flujo de transferencia de masa secado 3 (kg/min*m2) .....	108
Tabla 120. Balance de masa y energía de secado 3.....	111
Tabla 121. Balance de energía de secado 3 .....	111
Tabla 122. Balance de energía de secado 3 .....	111
Tabla 123. Sólido seco de muestras de secado 4 y relación de sólidos secos sobre área superficial.....	112
Tabla 124. Agua perdida con respecto al tiempo de secado 4 .....	112
Tabla 125. Contenido de agua de muestras en secado 4 .....	112
Tabla 126. Humedad en base húmeda secado 4 (kg agua/kg sólido húmedo) .....	113
Tabla 127. Humedad base seca de secado 4 (kg agua/kg sólido seco).....	113
Tabla 128. Velocidad de secado o flujo de transferencia de masa secado 4 (kg/min*m2) .....	114
Tabla 129. Balance de masa y energía de secado 4.....	116
Tabla 130. Balance de energía secado 4.....	116
Tabla 131. Área superficial de rodajas de muestra de secado 5.....	116
Tabla 132. Sólido seco de muestras de secado 5 y relación de sólidos secos sobre área superficial.....	117
Tabla 133. Agua perdida con respecto al tiempo de secado 5 .....	117
Tabla 134. Contenido de agua de muestras en secado 5 .....	117
Tabla 135. Humedad en base húmeda secado 5 (kg agua/kg sólido húmedo) .....	118
Tabla 136. Humedad base seca de secado 5 (kg agua/kg sólido seco).....	118
Tabla 137. Velocidad de secado o flujo de transferencia de masa secado 5 (kg/min*m2) .....	118
Tabla 138. Balance de energía de secado 5 .....	120
Tabla 139. Balance de energía de secado 5 .....	121
Tabla 140. Área superficial de rodajas de muestra de secado 6.....	121
Tabla 141. Sólido seco de muestras de secado 6 y relación de sólidos secos sobre área superficial.....	121
Tabla 142. Agua perdida con respecto al tiempo de secado 6 .....	122

Tabla 143. Contenido de agua de muestras en secado 6 .....	122
Tabla 144. Humedad en base húmeda secado 6 (kg agua/kg sólido húmedo) .....	122
Tabla 145. Humedad base seca de secado 6 (kg agua/kg sólido seco).....	123
Tabla 146. Velocidad de secado o flujo de transferencia de masa secado 6 (kg/min*m2) .....	123
Tabla 147. Balance de masa y energía de secado 6.....	125
Tabla 148. Balance de energía de secado 6 .....	125
Tabla 149. Área superficial de rodajas de muestra de secado 7.....	125
Tabla 150. Sólido seco de muestras de secado 7 y relación de sólidos secos sobre área superficial .....	126
Tabla 151. Agua perdida con respecto al tiempo de secado 7 .....	126
Tabla 152. Contenido de agua de muestras en secado 7 .....	126
Tabla 153. Humedad en base húmeda secado 7 (kg agua/kg sólido húmedo) .....	127
Tabla 154. Humedad base seca de secado 7 (kg agua/kg sólido seco).....	127
Tabla 155. Velocidad de secado o flujo de transferencia de masa secado 7 (kg/min*m2) .....	128
Tabla 156. Balance de masa y energía de secado 7.....	129
Tabla 157. Balance de energía de secado 7 .....	130
Tabla 158. Área superficial de rodajas de muestra de secado 8.....	130
Tabla 159. Sólido seco de muestras de secado 8 y relación de sólidos secos sobre área superficial .....	130
Tabla 160. Agua perdida con respecto al tiempo de secado 8 .....	130
Tabla 161. Contenido de agua de muestras en secado 8 .....	131
Tabla 162. Humedad en base húmeda secado 8 (kg agua/kg sólido húmedo) .....	131
Tabla 163. Humedad base seca de secado 8 (kg agua/kg sólido seco).....	132
Tabla 164. Velocidad de secado o flujo de transferencia de masa secado 8 (kg/min*m2) .....	132
Tabla 165. Balance de masa y energía secado 8 .....	134
Tabla 166. Balance de energía secado 8.....	134
Tabla 167. Área superficial de rodajas de muestra de secado 9.....	134
Tabla 168. Sólido seco de muestras de secado 9 y relación de sólidos secos sobre área superficial .....	135
Tabla 169. Agua perdida con respecto al tiempo de secado 9 .....	135
Tabla 170. Contenido de agua de muestras en secado 9 .....	135
Tabla 171. Humedad en base húmeda secado 9 (kg agua/kg sólido húmedo) .....	136
Tabla 172. Humedad base seca de secado 9 (kg agua/kg sólido seco).....	136
Tabla 173. Velocidad de secado o flujo de transferencia de masa secado 9 (kg/min*m2) .....	137
Tabla 174. Balance de masa y energía secado 9 .....	139
Tabla 175. Balance de energía secado 9.....	139
Tabla 176. Área superficial de rodajas de muestra de secado 10.....	140
Tabla 177. Sólido seco de muestras de secado 10 y relación de sólidos secos sobre área superficial .....	140
Tabla 178. Agua perdida con respecto al tiempo de secado 10 .....	140
Tabla 179. Contenido de agua de muestras en secado 10.....	141
Tabla 180. Humedad en base húmeda secado 10 (kg agua/kg sólido húmedo).....	141
Tabla 181. Humedad base seca de secado 10 (kg agua/kg sólido seco).....	141
Tabla 182. Velocidad de secado o flujo de transferencia de masa secado 10 (kg/min*m2) .....	142
Tabla 183. Balance de masa y energía de secado 10.....	144
Tabla 184. Balance de energía de secado 10 .....	144
Tabla 185. Área superficial de rodajas de muestra de secado 11.....	145
Tabla 186. Sólido seco de muestras de secado 11 y relación de sólidos secos sobre área superficial .....	145
Tabla 187. Agua perdida con respecto al tiempo de secado 11 .....	145
Tabla 188. Contenido de agua de muestras en secado 11.....	146
Tabla 189. Humedad en base húmeda secado 11 (kg agua/kg sólido húmedo).....	146
Tabla 190. Humedad base seca de secado 11 (kg agua/kg sólido seco).....	146
Tabla 191. Velocidad de secado o flujo de transferencia de masa secado 11 (kg/min*m2) .....	147
Tabla 192. Balance de masa y energía de secado 11.....	149
Tabla 193. Balance de energía de secado 11 .....	149
Tabla 194. Condiciones supuestas para la línea de producción .....	150

Tabla 195. Eficiencias de secado, energético y consumo de calentamiento de todas las corridas .....	150
Tabla 196. Porcentaje de pérdida de masa de 6 muestras de cada secado a diferentes temperaturas .....	150
Tabla 197. Prueba ANOVA con alfa de 0.1 de porcentaje de pérdida de masa de 6 muestras de cada secado .....	151
Tabla 198. Prueba ANOVA con alfa de 0.1 de porcentaje de pérdida de masa de 6 muestras a 55 y 60°C..	151
Tabla 199. Prueba ANOVA con alfa de 0.1 de porcentaje de pérdida de masa de 6 muestras a 60 y 65°C..	151
Tabla 200. Prueba ANOVA con alfa de 0.1 de porcentaje de pérdida de masa de 6 muestras a 55 y 65°C..	152
Tabla 201. Porcentaje de pérdida de masa de 6 muestras de cada secado a diferentes pretratamientos .....	152
Tabla 202. Prueba ANOVA con alfa de 0.1 de porcentaje de pérdida de masa de 6 muestras de cada secado con y sin pretratamiento.....	152
Tabla 203. Prueba ANOVA con alfa de 0.1 de porcentaje de pérdida de masa de 6 muestras de cada secado con pretratamiento químico y mecánico.....	153
Tabla 204. Prueba ANOVA con alfa de 0.1 de porcentaje de pérdida de masa de 6 muestras de cada secado con pretratamiento químico y sin pretratamiento.....	153
Tabla 205. Prueba ANOVA con alfa de 0.1 de porcentaje de pérdida de masa de 6 muestras de cada secado con pretratamiento mecánico y sin pretratamiento .....	153

## Lista de figuras

Figura 1. Compuestos fenólicos en manzanas .....	7
Figura 2. Esquema general de un secador de platos o de gabinete .....	10
Figura 3. Esquema general de un secador de camión .....	10
Figura 4. Esquema general de un secador por lotes de circulación transversal .....	11
Figura 5. Esquema general de un secador tipo turbo.....	12
Figura 6. Esquema general de un secador rotatorio .....	13
Figura 7. Alteración de estructura debido a concentración de tejidos.....	17
Figura 8. Procesos de fenómeno de transporte en el secado.....	18
Figura 9. Tipos de humedad.....	20
Figura 10. Isoterma de equilibrio alimentos .....	20
Figura 11. Curva de pérdida de humedad en secado por lotes respecto al tiempo .....	22
Figura 12. Curva típica de rapidez de secado, condiciones de secado constantes .....	22
Figura 13. Etapas de secado en curva de humedad base seca contra tiempo.....	23
Figura 14. Humedad crítica en la curva de humedad base seca contra tiempo.....	24
Figura 15. Influencia de temperatura del aire de secado en la humedad.....	24
Figura 16. Influencia de la velocidad de secado en la humedad.....	25
Figura 17. Cambio de la humedad respecto al tiempo contra el cambio de humedad .....	26
Figura 18. Diagrama de flujo teórico de secado de rodajas de manzana.....	27
Figura 19. Diagrama de flujo teórico de secado de rodajas de manzana con pretratamiento químico .....	27
Figura 20. Diagrama de flujo teórico de secado de rodajas de manzana con pretratamiento mecánico .....	28
Figura 21. Curva experimental de pérdida de humedad de pulpa de cupacu .....	30
Figura 22. Curva experimental de pérdida de humedad y velocidad de secado para manzanas con pretratamiento de impregnación al vacío.....	32
Figura 23. Criterios de inocuidad para frutas frescas y deshidratadas por la RTCA .....	36
Figura 24. Balance de masa general de secado de sólidos húmedos.....	38
Figura 25. Diagrama de balance de energía de secado de sólidos húmedos .....	39
Figura 26. Balance de masa y energía de calentador eléctrico secador.....	40
Figura 27. Diagrama de bloques de línea de producción de snacks por lotes .....	41
Figura 28. Curvas de secado de manzana Gala a temperatura de 55, 60, 65°C en operación a presión atmosférica utilizando secador de bandejas.....	44
Figura 29. Curva de pérdida de humedad respecto al tiempo a diferentes temperaturas .....	44
Figura 30. Curva de secado de rodajas de manzana Gala sin pretratamiento y con pretratamiento químico y mecánico .....	46
Figura 31. Curva de pérdida de humedad de manzana Gala con y sin pretratamiento mecánico y químico ...	46
Figura 32. Diagrama de bloques de propuesta de línea de producción de snacks de manzana en sobres de 10 g en operación por lotes.....	51
Figura 33. Curva de secado 3 a 55°C, velocidad de secado vs humedad en base seca .....	109
Figura 34. Curva de pérdida de Humedad Secado 3 a 55°C vs tiempo .....	110
Figura 35. Curva de cambio de humedad respecto al tiempo contra el cambio de humedad base seca de equilibrio secado 3 a 55°C.....	110
Figura 36. Curva de secado 4 a 60°C, velocidad de secado vs humedad en base seca .....	114
Figura 37. Curva de pérdida de humedad secado 4 a 60°C vs tiempo .....	115
Figura 38. Curva de cambio de humedad respecto al tiempo contra el cambio de humedad base seca de equilibrio secado 4 a 60°C.....	115
Figura 39. Curva de secado 5 a 60°C, velocidad de secado vs humedad en base seca .....	119
Figura 40. Curva de pérdida de humedad secado 5 a 60°C vs tiempo .....	120
Figura 41. Curva de secado 6 a 65°C, velocidad de secado vs humedad en base seca .....	124
Figura 42. Curva de pérdida de humedad secado 6 a 65°C vs tiempo .....	124

Figura 43. Curva de secado 7 a 65°C, velocidad de secado vs humedad en base seca .....	128
Figura 44. Curva de pérdida de humedad secado 7 a 65°C, velocidad de secado vs tiempo .....	129
Figura 45. Curva de secado 8 a 65°C pretratamiento mecánico, velocidad de secado vs humedad en base seca .....	133
Figura 46. Curva de pérdida de humedad secado 8 a 65°C vs tiempo .....	133
Figura 47. Curva de secado 9 a 65°C, velocidad de secado vs humedad en base seca .....	137
Figura 48. Curva de pérdida de humedad secado 9 a 65°C vs tiempo .....	138
Figura 49. Curva de cambio de humedad respecto al tiempo contra el cambio de humedad base seca de equilibrio secado 9 a 65°C .....	138
Figura 50. Curva de secado 10 a 65°C con pretratamiento mecánico, velocidad de secado vs humedad en base seca .....	142
Figura 51. Curva de pérdida de humedad secado 10 a 65°C vs tiempo .....	143
Figura 52. Curva de pérdida de humedad respecto al tiempo contra el cambio de humedad del secado 10 a 65°C con pretratamiento mecánico .....	143
Figura 53. Curva de secado 11 a 65°C con pretratamiento químico, velocidad de secado vs humedad en base seca .....	147
Figura 54. Curva de pérdida de humedad secado 11 a 65°C vs tiempo .....	148
Figura 55. Curva de pérdida de humedad respecto al tiempo contra el cambio de humedad del secado 11 a 65°C con pretratamiento químico .....	148
Figura 56. Balance de masa y energía de Secado 3 a 55°C sin pretratamiento .....	154
Figura 57. Balance de masa y energía de Secado 4 a 60°C sin pretratamiento .....	155
Figura 58. Balance de masa y energía de Secado 5 a 60°C sin pretratamiento .....	155
Figura 59. Balance de masa y energía de Secado 6 a 65°C sin pretratamiento .....	156
Figura 60. Balance de masa y energía de Secado 7 a 65°C sin pretratamiento .....	156
Figura 61. Balance de masa y energía de Secado 8 a 65°C con pretratamiento mecánico .....	157
Figura 62. Balance de masa y energía de Secado 9 a 65°C sin pretratamiento .....	157
Figura 63. Balance de masa y energía de Secado 10 a 65°C con pretratamiento mecánico .....	158
Figura 64. Balance de masa y energía de Secado 11 a 65°C con pretratamiento químico.....	158
Figura 65. Manzanas Gala de muestra utilizadas para el estudio .....	159
Figura 66. Pesaje de manzana gala de muestra para estudio .....	159
Figura 67. Pesaje de volumen de jugo extraído de manzana pelada y descorazonada.....	160
Figura 68. Pesaje de cáscara y corazones de manzanas de muestra de caracterización fisicoquímica .....	160
Figura 69. Gabinetes de deshidratador utilizado para el estudio y respectivas bandejas .....	161
Figura 70. Resultado de humedad en balanza de humedad OHAUS .....	161
Figura 71. Pesaje inicial de muestra de manzana para elaboración de curva de secado .....	162
Figura 72. Pesaje de rodajas de manzana para secado .....	162
Figura 73. Rodajas de manzana posteriores a secado sin pretratamiento.....	163
Figura 74. Rodajas de muestra utilizadas para curva de secado con pretratamiento mecánico.....	163
Figura 75. Secado de manzanas en bandeja monitoreado por termocupla digital .....	164
Figura 76. Rodajas de manzana secas con pretratamiento de mecánico .....	164
Figura 77. Bandeja de rodajas de manzanas sin pretratamiento .....	165
Figura 78. Bandeja de rodajas de manzana secas con pretratamiento.....	165
Figura 79. Muestra de rodaja de manzana previo al pretratamiento químico.....	166
Figura 80. Rodaja de manzana de muestra posterior al pretratamiento químico .....	166
Figura 81. Muestras de Rodaja de manzana secas con pretratamiento químico.....	167
Figura 82. Residuos de rodajas de manzana adheridos a la bandeja en el secado por pretratamiento químico .....	167
Figura 83. Comparación de resultado de rodajas de manzana secadas .....	168

## Resumen

Se planteó evaluar el efecto del pretratamiento en el secado de snacks de manzana por método químico y mecánico para el aumento de eficiencia de secado en línea de producción. Para ello, se realizó la experimentación donde se evaluó diferentes temperaturas de secado de rodajas de manzana y se realizó la evaluación de dos pretratamientos de secado, método químico y mecánico. Para cada una de estas condiciones se obtuvo la curva de secado, la curva de pérdida de humedad respecto al tiempo, los balances de masa y energía y se calculó la eficiencia de secado y eficiencia energética. A partir de los resultados de la experimentación de propuso una línea de producción de snacks de manzana deshidratada. Se determinó que la mejor temperatura de operación para el secado de manzanas entre las temperaturas de 55°C, 60°C y 65°C, fue a 65°C. Dado a que mostró una mejor pérdida de humedad respecto al tiempo, y presentó la mayor eficiencia de secado. Se realizó el pretratamiento químico y mecánico donde mostraron características físicas diferenciadoras de textura y color. La corrida con el pretratamiento mecánico tuvo como resultado una eficiencia de secado, eficiencia energética y velocidad de secado mayor que la del secado sin pretratamiento. La corrida con el pretratamiento químico tuvo la mayor eficiencia de secado y la mayor eficiencia energética de todas las corridas. Estos resultados mostraron que el pretratamiento químico y mecánico tiene un efecto positivo en el aumento de eficiencia de secado y en la velocidad de secado. Siendo mayor el efecto positivo el del pretratamiento químico por lo que se planteó línea de producción utilizando el pretratamiento Químico. Se estimó una capacidad de producción de 48.73 paquetes de snacks de 10 g cada uno de manzana deshidratada por lote, con 3 horas de secado y a partir de 4 kg de manzana fresca. Los balances de masa y energía se plantearon tomando como secador el utilizado para las corridas experimentales y para los demás equipos se utilizó de referencia equipos comercialmente disponible.

**Palabras clave:** Snacks de manzana, secado, pretratamiento, método mecánico, método químico, eficiencia de secado, eficiencia energética, línea de producción.

## Abstract

The purpose of this study was to evaluate the effect of pretreatment on the drying of apple snacks by chemical and mechanical methods to increase drying efficiency in the production line. To achieve this objective, an experiment was conducted to evaluate different drying temperatures for apple slices and to assess two drying pretreatments: chemical and mechanical methods. For each of these conditions, the drying curve, moisture loss curve as a function of time, mass and energy balances were obtained, and drying efficiency and energy efficiency were calculated. Based on the experimental results, a production line for dehydrated apple snacks was proposed. The best operating temperature for drying apples among the temperatures of 55°C, 60°C, and 65°C was determined to be 65°C. This was because it showed a better moisture loss as a function of time and presented the highest drying efficiency. Chemical and mechanical pretreatments were performed, and they showed differentiating physical characteristics of texture and color. The run with the mechanical pretreatment resulted in a higher drying efficiency, energy efficiency, and drying rate than drying without pretreatment. The run with the chemical pretreatment had the highest drying efficiency and the highest energy efficiency of all runs. These results showed that both chemical and mechanical pretreatment have a positive effect on increasing drying efficiency and drying rate. The positive effect of chemical pretreatment was greater, so a production line using chemical pretreatment was proposed. A production capacity of 48.73 packets of 10 g each of dehydrated apple snacks per batch was estimated, with 3 hours of drying and from 4 kg of fresh apples. Mass and energy balances were considered using the dryer used for the experimental runs and commercially available equipment as reference for the other equipment.

**Keywords:** Apple snacks, drying, pretreatment, chemical method, mechanical method, drying efficiency, energy efficiency, production line.

# I. Introducción

Los *snacks* se refieren a un alimento sólido ligero consumido entre comidas, ya sea con la mano o con un utensilio, acompañada con bebidas o sin ellas, sin corresponder a un sustituto de una comida. Un snack, proporciona muchas menos calorías que las contenidas en un almuerzo o cena. Por otro lado, un snack puede ser o no un alimento nutritivo. (Romero et al., 2016). Las frutas deshidratadas han tomado un auge en los últimos años debido a que es un alimento poco perecedero comparado con la fruta fresca. Además, se ha popularizado ya que presenta una alternativa de snack saludable, es de fácil transporte y almacenamiento y es nutritivo (EMR, 2022). Por otro lado, se puede deshidratar una gran cantidad y variedades de frutas que permiten satisfacer una amplia gama de consumidores. El secado de frutas presenta varios desafíos debido a que las frutas tienen un alto contenido de agua, provocando que los secados sean más largos y consuman mucha energía (EMR, 2022).

El secado es una operación en la que se elimina agua por medio de un gas caliente con una alta capacidad de retención de humedad. Existen diferentes tipos de secado, uno de estos tipos son los secadores directos que transfieren el calor por contacto del producto con un gas calentado, generalmente por aire caliente, donde da lugar a la evaporación. Uno de los principales equipos de secado por lotes son los secadores de platos, de gabinete, de compartimiento o de anaqueles, son utilizados para el secado de sólidos que deben ejecutarse sobre platos (Treybal, 1998). El proceso de secado en secadores de bandejas cuenta con eficiencias energéticas entre 0.25-0.4 lo que indica que es una operación de alta demanda de energía (González y Martín, 2022). Los factores que afectan la eficiencia energética de estos equipos son las temperaturas de secado, la humedad relativa del aire, el tamaño y el grosor de los alimentos ingresados al secador y la variedad del alimento. Algunas de las formas de aumentar la eficiencia energética del secado por secador de bandejas son por medio de sistemas de recuperación de calor, sistemas de control de humedad y por medio del pretratamiento del alimento que se ingresa al secador (González y Martín, 2022).

El pretratamiento del alimento consiste en realizar un procedimiento previo al secado que permita, ya sea aumentar la cantidad de producto seco por temporada con los mismos equipos de secado y minimizar las pérdidas de calidad del producto durante el proceso (Ohaco et al., 2011). Existen diferentes tipos de pretratamiento, la impregnación al vacío, deshidratación osmótica, el escaldado, pretratamiento químico y mecánico. Entre los pretratamientos más económicos se puede encontrar los últimos dos, el químico y el mecánico (Ohaco et al., 2011).

Para el tratamiento químico se utilizan diferentes soluciones de compuestos que permitan generar microcanales que permitan un mejor paso de humedad por el sólido. Uno de los ejemplos de las soluciones químicas que se puede utilizar para este pretratamiento es solución de hidróxido de sodio en concentraciones bajas. La FDA (Administración de Medicamentos y Alimentos), permite el uso de hidróxido de sodio como aditivo alimentario a niveles inferiores a 1% (p/v) (ChemicalSafetyFacts, 2023). Para el tratamiento mecánico se utiliza diferentes métodos de daño físico de la piel de la fruta. Esto permite tener una mayor área de contacto con el aire caliente, favoreciendo el secado del sólido (Ohaco et al., 2011).

La curva de secado es una representación gráfica de la relación entre la humedad del producto y el tiempo durante el proceso de secado. La curva de secado puede utilizarse para determinar la velocidad de secado, el tiempo de secado y la humedad final del producto (Muñoz y Vicente, 2000). La velocidad de secado es la cantidad de agua que se evapora de un alimento en un período de tiempo determinado. Es un factor importante en el proceso de secado ya que determina el tiempo que se tarda en secar un alimento. Esta se ve afectada por varios factores tales como la temperatura de secado, la humedad relativa del aire, el tamaño y el grosor del alimento y la variedad del alimento. Estos parámetros son útiles para realizar el análisis y dimensionamiento de una línea de producción. Así como los resultados de los balances de masa y energía del proceso, los cuales permiten entender el comportamiento del proceso. La eficiencia del secado es la relación entre la cantidad de agua que se evapora de un alimento y la cantidad de energía que se consume durante el proceso de secado. Esta se puede expresar como un porcentaje (Muñoz y Vicente, 2000).

## II. Justificación

El cambio climático es un cambio en los patrones climáticos a largo plazo de un lugar. Estos cambios pueden ser naturales, cambios en la actividad solar o causados por la actividad humana. La actividad humana es la principal causa del cambio climático. La quema de combustibles fósiles, como carbón, el petróleo y el gas natural, libera gases de efecto invernadero a la atmósfera. Estos gases atrapan el calor del Sol, lo que hace que la Tierra se caliente. Los efectos del cambio climático ya se están sintiendo en todo el mundo. La temperatura media de la Tierra ha aumentado en aproximadamente 1 grado Celsius desde el siglo XIX. Provocando aumento de nivel del mar, fenómenos meteorológicos extremos, cambio de patrones de precipitación y pérdida de biodiversidad, entre otros (IPCC, 2021).

Reducir eficazmente el consumo mundial de energía es el primer paso y el paso más importante para combatir el cambio climático. Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA) postula que casi la mitad de todas las medidas necesarias para la mitigación del cambio climático se atribuyen a contar con una mayor eficiencia energética. Los sectores claves para hacer el seguimiento de los avances en la eficiencia energética son el transporte, los servicios industriales y en las viviendas. La IEA calcula que el potencial de mitigación mundial para el sector industrial es de 5.5 a 7.5 gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente en 2050 (Romero et al., 2016).

El sector industrial es el segundo mayor productores de emisiones relacionadas con la energía y es el responsable del 33% del consumo de energía de forma primaria. Este aumentando a un ritmo de 3.1% anual en los próximos 25 años. Las iniciativas en materia de eficiencia energética son fundamentales para lograr la sostenibilidad de la industria. Además, que mejorar la eficiencia en el sector de la industria es una de las medidas más rentables para ayudar a los países en desarrollo y emergentes a atender su creciente demanda de energía y atenuar el nexo entre el crecimiento económico y el cambio climático (Green Climate Fund, s.f.).

El secado tiene una eficiencia energética entre 0.25-0.4, lo cual lo hace una operación en la que se consume mucha energía para llevar a cabo el proceso de secado. Los factores que afectan la eficiencia para el secado son la temperatura del secado, la humedad relativa del aire, el tamaño y el grosor de los alimentos y la variedad de alimentos (González y Martín, 2022). La eficiencia de secado en un secador de bandejas depende de los mismos factores y se tienen eficiencias de secado entre 0.2-0.5. La eficiencia de secado de un secador de bandejas es un factor importante para considerar cuando se utiliza este equipo. Una eficiencia de secado más alta significa menos energía para secar un alimento, lo que puede reducir costos operativos y las emisiones de gases de efecto invernadero (González y Martín, 2022).

Otro factor importante para mencionar relacionado al tema de investigación es que la obesidad es un problema de salud pública grave en Guatemala. Según el Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (MSPAS), en 2022, el 38.4% de los adultos mayores de 18 años en Guatemala tienen obesidad y el 28.8% tienen sobrepeso. Esto significa que más de la mitad de los adultos en Guatemala tienen sobrepeso u obesidad. Esto es causado por múltiples factores como la dieta, la actividad física y factores genéticos (MSPAS, 2022). El consumo de alimentos ricos en calorías y grasas y azúcares, como las frituras, las galletas, bebidas azucaradas y alimentos procesados, es uno de los factores que contribuyen a la obesidad. Según el Instituto Nacional de Estadística (INE), en 2022, el 70% de los guatemaltecos consumen snacks no nutritivos (frituras, galletas, dulces...) al menos una vez por semana. El consumo de estos productos está relacionado con un mayor riesgo de obesidad, enfermedades cardíacas, diabetes tipo 2 y otros problemas de salud (INE, 2022).

Por ellos es de suma importancia realizar investigación relacionada a snacks nutritivas. Un producto que últimamente ha tomado auge es la fruta deshidratada. El mercado latinoamericano de frutas deshidratadas alcanzó un valor de USD 4,150 millones en el año 2021. Durante 2023-2028, se anticipa que el mercado crezca con una tasa de crecimiento anual compuesto de 4,77% (EMR, 2022). Esto ya que ofrece una alternativa como snack saludable lo cual ha sido muy bien visto por el mercado. Dado a que permite tener características adecuadas y prácticas. Las frutas deshidratadas son fáciles de transportar y debido a la disminución significativa de agua, disminuye la reproducción de los microorganismos, permitiendo tener una mayor vida útil que las frutas frescas (Serrano et al., 2016).

Sin embargo, los precios de los snacks nutritivos tienden a ser mayor que los snacks poco nutritivos. Los precios más bajos de los alimentos poco saludables están asociados a una mayor probabilidad de que las personas lo elijan. Especialmente influye mayormente en los niños y en los adultos de un nivel socioeconómico más bajo. Esto debido a que esta población es más propensa a comparar alimentos en entornos de venta al por menor con precios bajos como las tiendas de conveniencia. Esto contribuye en gran medida a la obesidad o malnutrición de las personas (Elbel et al., 2011).

Tomando en cuenta lo anterior, los snacks de fruta deshidratada presentan una gran oportunidad de crecimiento por lo que se hace necesario buscar procesos más eficientes en el secado de las frutas para poder disminuir la emisión de gases efecto invernadero y disminuir costos operacionales. Como se mencionó, muchas veces los consumidores tienden a preferir comprar snacks poco nutritivos debido a su bajo precio comparado con snacks nutritivos, al aumentar la eficiencia del secado permitiría disminuir costos de producción lo que podría abrir una puerta para disminuir precios de estos productos. Permitiendo así tener un mayor alcance en el mercado y motivando una alimentación más nutritiva a una mayor población (Elbel et al., 2011).

Una de las formas de aumentar la eficiencia energética es utilizando pretratamientos de secado los cuales consisten en un procedimiento previo al secado que permita disminuir el tiempo de operación o, en otras palabras, aumentar la velocidad de secado. Existen diferentes pretratamientos, para este estudio se tomó en cuenta un método químico utilizando solución hidróxido de sodio y un método mecánico por medio de daño superficial de la piel del fruto para evaluar el efecto en la velocidad de secado (Ohaco et al., 2011). Se eligieron estos dos pretratamientos ya que son prácticos y económicos. Tomando en cuenta que el corte mecánico es sencillo de realizar y la solución de hidróxido de sodio es fácilmente realizable y el reactivo es un reactivo comúnmente utilizado en la industria, fácil de adquirir y de bajo costo. Esto con el fin de realizar una propuesta de línea de producción de snacks nutritivos con el pretratamiento más efectivo para poder obtener una mayor producción de este tipo de alimento y realizarlo de una forma más eficiente.

### **III. Objetivos**

#### **A. Objetivo general**

Evaluar el efecto del pretratamiento en el secado de snacks de manzana por método químico y mecánico para el aumento de eficiencia de secado en línea de producción.

#### **B. Objetivos específicos**

- Realizar el pretratamiento de la manzana por método químico, usando solución de hidróxido de sodio 0.1 N y método mecánico, por cortes longitudinales en la fruta para modificar el tiempo de secado.
- Determinar la velocidad y la eficiencia de secado de manzanas pretratadas utilizando la curva de secado para evaluar el efecto de los tipos de pretratamiento.
- Realizar propuesta de línea de producción de snacks de manzanas, con balances de masa y energía, utilizando el método de pretratamiento más efectivo para el secado de manzanas.

## IV. Marco teórico

### A. Snacks nutritivos

Actualmente, se ha popularizado el consumo de snacks, que se refiere a un alimento sólido ligero consumido entre comidas, ya sea con la mano o con un utensilio, acompañada con bebidas o sin ellas, sin corresponder a un sustituto de una comida. Un snack, proporciona muchas menos calorías que las contenidas en un almuerzo o cena. Por otro lado, un snack puede ser o no un alimento nutritivo. Los snacks poco saludables tienen un bajo valor nutricional y alto contenido de azúcar refinada, grasa saturada o de sal. Se puede dar ejemplo de estos como barras de chocolate, papas fritas, pastelillos, frituras en general. Por otro lado, los snacks saludables o nutritivos son aquellos que presentan características opuestas a los anteriores, ya que deben ser bajos en grasa, azúcar y sodio. Deben contener pocas calorías y entre algunos de los ejemplos de snacks saludables se puede mencionar los granos enteros, las frutas y verduras, nueces y semillas y productos lácteos que sean bajos en grasa y azúcares como los yogures (Romero et al., 2016).

### B. Frutas deshidratadas

Las frutas deshidratadas son aquellas frutas a las que se les ha eliminado el contenido de agua mediante una operación de secado, ya sea utilizando el sol o por deshidratadores o secadores especializados. Estas frutas son una buena fuente de nutrición y los consumidores, que se preocupan por los alimentos que ingieren y su salud, consumen ampliamente como snacks. Reemplazando los snacks, poco saludables que generalmente se tiende a consumir, como las frituras. Entre las principales características que convierten a la fruta seca o deshidratada en una Excelente opción de snack, es que su proceso de preparación permite concentrar los hidratos de carbono, las fibras, las proteínas y las sales minerales, en el grado de que son una Excelente fuente de calcio, sodio, potasio, hierro y magnesio. Estas también son ricas en vitamina A y B (Romero et al., 2016). Ayudando al sistema inmunológico, el fortalecimiento de huesos y ritmo cardíaco. Estos ayudan a perder de masa debido a que se evita consumir snacks con alto contenido de calorías, poco nutritivos. Por otro lado, las frutas deshidratadas son de alto interés en la repostería, en los cereales, productos de panadería, algunos productos lácteos como el yogurt, en snack bars, entre otros productos alimenticios (EMR, 2022).

La demanda de las frutas deshidratadas en América Latina es impulsada por el reciente número de personas que se preocupan por su salud, junto a las crecientes preferencias a los productos con una mejor calidad nutritiva y saludable por parte de los consumidores. También la popularidad de los cereales de desayuno y la merienda de avena, que son alimentos en los que se ha impulsado la inclusión de frutas deshidratadas para aumentar el valor nutricional. También, cabe resaltar que el aumento de problemas de salud como obesidad, la diabetes, la hipertensión arterial y la creciente población geriátrica provoca los consumos de frutas deshidratadas debido a sus propiedades (EMR, 2022). El problema de la obesidad es preocupante ya que figura en enfermedades cardiovasculares, cáncer, diabetes, osteoartritis y enfermedades crónicas del riñón. Por lo que la obesidad se ha convertido en un problema mayor de Salud pública y en 2013, la OMS voto por la resolución para introducir la meta de detener la expansión de la obesidad en 2025 (Romero et al., 2016).

La recomendación actual de comer frutas como snacks entre las comidas crea un conflicto con el estilo de vida de buena parte de los ciudadanos en muchos de los países desarrollados y en las ciudades más avanzadas en desarrollo, donde el estilo de vida cada vez pasar más tiempo fuera de casa y en ritmo con las actividades diarias. Esto dado a que las frutas son un alimento perecedero y tiende a madurar muy rápidamente, porque se debe ingerir pocos días de ser adquiridos. Por lo que surge la necesidad en el mercado de los snacks de frutas deshidratadas como una opción de consumo de frutas frescas. Ya que estos productos tienden a ser menos perecederos y fáciles de transportar (Romero, Díaz y Aguirre, 2016). Esto debido a que la disminución de agua en el alimento disminuye la posibilidad de reproducción de microorganismos, aumentando su vida útil (EMR, 2022).

Entre las principales ventajas que presenta las frutas deshidratadas como snacks se resumen en las siguientes:

- Cuenta con la mitad del volumen y pesan diez veces menos que la fruta original por lo que nos permite tener una mayor facilidad de almacenaje y transporte.
- Es un Excelente complemento nutricional mezclado con leche, batidos o mermeladas.
- Ofrece una gran variedad durante todo el año y no es necesario refrigerarla.
- Mantiene por varios meses todo su valor nutritivo.
- No contiene grasas nocivas ni colesterol.

Entre los principales países importadores se puede destacar la siguiente lista:

- 13,9% Para Estados Unidos de importaciones
- 8.8% Alemania
- 5.8% Rusia
- 5.6% Países Bajos
- 5.4% Reino Unido (Romero et al., 2016).

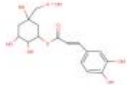
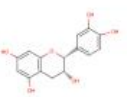
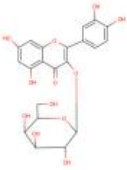
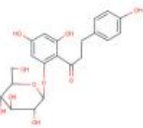
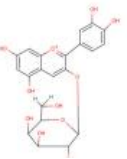
### C. Manzana

La manzana (*Malus pumila*, *Malus sylvestris mil*) es el fruto del manzano, árbol de la familia de las rosáceas. La piel puede ser de color verde, amarilla o rojiza. La pulpa es harinosa o crujiente, presenta un sabor característico que varía entre agrio y dulce. Contiene en su interior varias semillas de color marrón oscuro (Palomo et al., 2009). La manzana ha sido un fruto simbólico a lo largo de la historia que con la sabiduría popular siempre se le ha atribuido virtudes saludables sin conocer su composición química y propiedades nutricionales. Existe más de mil variedades, pero solo se dispone de media docena de ellas en el mercado las cuales son las siguientes:

- Braeburn
- Reineta
- Granny Smith
- Golden
- Starking
- Gala

Estas manzanas se pueden encontrar en la mayoría, desde septiembre hasta junio, exceptuando la Golde Supreme que está disponible de agosto a noviembre o la Golden Delicious que se encuentra prácticamente todo el año. La porción comestible de las manzanas se encuentra en un aproximado de 84 gramos por cada 100 gramos de producto fresco (Palomo et al., 2009). Una de las características beneficiosas de la manzana para la salud es su actividad antioxidante, esta debe se debe a su contenido de fenoles y flavonoides. Los principales fenoles se caracterizan en cinco grupos: ácidos hidrocínámicos, flavanoles, dihidrochalconas y antocianinas. Los principales flavonoides se sintetizan a partir del aminoácido fenilalanina y tirosina, formándose los ácidos cinámico y p-hidroxicinámico, los que al condensarse con acetato dan lugar a la estructura del cinamol de los flavonoides que luego forman formas glicosiladas y sulfatadas. La actividad antioxidante de los flavonoides está dada por los grupos hidroxifenólicos, dobles enlaces y grupos cetónicos (Palomo et al., 2009). En la Figura 1 se observan los compuestos fenólicos.

**Figura 1.**  
*Compuestos fenólicos en manzanas*

Grupo	Ejemplos	Estructura
<b>Ácido hidrocínámico</b>	Ácido clorogénico	 Ácido clorogénico
<b>Flavanoles</b>	Catequina Epicatequina Procianidina B2 y otras	 Epicatequina
<b>Flavonoles</b>	Q 3-galactósido Q 3-glúcósido Q 3-xilósido Q 3-arabinósido Q 3-ramnósido	 Q 3-galactósido
<b>Dihidrochalconas</b>	Floridizina	 Floridizina
<b>Antocianina</b>	Cianidina 3-galactósido	 Cianidina 3-galactósido

*Nota:* Tomado de Palomo et al. (2009).

El contenido de flavonoides en la fruta se ve influenciado por diferentes factores los cuales se pueden destacar los siguiente:

- Forma de cultivo
- Nutrición mineral de la planta
- Zona climática donde se desarrolla el cultivo
- Almacenaje refrigerado
- Tipo de piel o de pulpa

La valoración nutricional de la manzana es buena ya que esta aporta hidratos de carbono fundamentales en forma de azúcares como fructosa, glucosa y sacarosa y contiene cantidades apreciables de fibra, tanto solubles como insolubles, siendo la última la más abundante (FEN, s.f.). Las fibras solubles se pueden mencionar las gomas y las pectinas y la insoluble la celulosa, hemicelulosa y lignina. La manzana aporta cantidades importante de flavonoles, catequinas y procianidinas como se puede observar la Tabla 1:

**Tabla 1.**  
*Composición nutricional de la manzana*

Componente	Por 100 g de porción comestible	Por ración (200 g)	Recomendaciones día-hombre	Recomendaciones día-mujer
Energía (Kcal)	53	89	3000	2300
Proteínas (g)	0.3	0.5	54	41
Colesterol (mg/1000kcal)	12	20.2	<300	<230

Hidratos de carbono (g)	2	3.4	375-413	288-316
Fibra (g)	2	3.4	>35	>25
Agua (g)	85.7	144	2500	2000
Calcio (mg)	6	10.1	1000	1000
Hierro (mg)	0.4	0.7	10	18
Yodo ( $\mu\text{g}$ )	2	3.4	140	110
Magnesio (mg)	5	8.4	350	330
Zinc (mg)	0.1	0.2	15	15
Sodio (mg)	2	3.4	<2000	<2000
Potasio (mg)	120	202	3500	3500
Fósforo (mg)	8	13.4	700	700
Selenio ( $\mu\text{g}$ )	Tr	Tr	70	55
Tiamina (mg)	0.04	0.07	1.2	0.9
Riboflavina (mg)	0.02	0.03	1.8	1.4
Equivalentes niacina (mg)	0.2	0.3	20	15
Vitamina B6 (mg)	0.03	0.05	1.8	1.6
Folatos ( $\mu\text{g}$ )	5	8.4	400	400
Vitamina B12 ( $\mu\text{g}$ )	0	0	2	2
Vitamina C (mg)	10	16.8	60	60
Vitamina A: Eq.Retinol ( $\mu\text{g}$ )	4	6.7	1000	800
Vitamina D ( $\mu\text{g}$ )	0	0	15	15
Vitamina E (mg)	0.2	0.3	12	12

*Nota:* Tabla de Composición de Alimentos. Moreiras et al., 2013. “Tr.”: trazas. “0”: Virtualmente ausente en el alimento. “-“: dato no disponible. Adaptado de FEN (s.f.)

Los grados Brix son una unidad de medida que se utiliza para medir la cantidad de sólidos disueltos en una solución. Un grado Brix equivale a un gramo de sólidos disueltos por 100 gramos de solución. El promedio de grados Brix en la pulpa de la manzana es de 11 a 18%. Sin embargo, el contenido de azúcar en la manzana puede variar según la variedad, el clima y la madurez de la fruta. Las manzanas de variedades dulces, como la Golden Delicious y la Gala, tienden a tener un contenido de azúcar más alto que las manzanas de variedades ácidas, como la Granny Smith y la Fuji. Las manzanas que se cosechan en climas cálidos también tienden a tener un contenido de azúcar más alto que las manzanas que se cosechan en climas fríos. Según un estudio realizado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, el contenido de azúcar promedio en la pulpa de la manzana es de 13,5%. El estudio encontró que las variedades dulces tenían un contenido de azúcar promedio de 15,5%, mientras que las variedades ácidas tenían un contenido de azúcar promedio de 10,5% (FEN, s.f.).

## D. Operación de secado

El secado es la operación en la que se elimina parcial o totalmente, por evaporación, el agua de una sustancia. No se considera secado la eliminación mecánica de humedad por medio del exprimido o centrifugado (Treybal, 1998).

## E. Tipos de secado

Existen diferentes clasificaciones de tipos de secado, según lo mencionado por Treybal (1998):

### ***Clasificación por método de operación***

**Por lotes.** Este tipo de operación tiende a ser más costosa que la operación continua, por lo que se reserva el uso a pequeña escala. Esta operación es intermitente o en forma cíclica en condiciones no estacionara. Al ser por lotes indica que se carga el material que se requiera secar y hasta que termine de secar, se descarga y se vuelve a cargar, así sucesivamente. Cada lote de productos es tratado individualmente en zonas de secado diferentes. La cantidad de agua evaporada se controla por la plataforma variando el volumen y la temperatura de aire de secado. Este puede ser en dos configuraciones:

- **Tangencial:** el periodo de rapidez es constante en este instante que ocurre la evaporación superficial de la humedad no ligada. La rapidez se determina mediante un balance calorífico para la evaporación y la rapidez con la que el calor alcanza la superficie.
- **Transversal:** En un lecho de sólidos resulta un período de rapidez como un período decreciente de la rapidez. El calor de evaporación proviene del gas del gas que se enfría y la humedad en el lecho es función de la posición y el tiempo.

**Continuo.** Este es el método más utilizado en la industria debido a su relación tamaño de secador con producto. Evita tiempos muertos durante el proceso, también en comparación del método por lotes es menos costosa. En este caso el modo en el que funciona es que el material se va transportando a través del secador mientras que una corriente móvil de aire o gas, dependiendo del material utilizado, ira quitando la humedad al sólido. El flujo utilizado en el proceso puede ser:

- **Contracorriente:** el gas más caliente está en contacto con el sólido más seco. El sólido descargado se calienta a la misma temperatura del gas entrante. Esta permite un secado más rápido y utiliza temperaturas altas. La desventaja es que, al manejar temperaturas altas, el material puede dañarse.
- **Paralelo:** El sólido se calentará únicamente a la temperatura de bulbo húmedo del gas, los sólidos sensibles al calor pueden secarse con frecuencia mediante un gas de flujo caliente. Cuando la salida del secador de gas se ha enfriado no daña al sólido. Este tipo de flujo permite un mayor control del contenido de humedad del sólido descargado.

### ***Clasificación según el método de transferencia de calor***

Se cuenta con dos clasificaciones según el método de transferencia de calor:

**Directo.** Los secadores directos transfieren el calor por contacto del producto con un gas calentado, generalmente por aire caliente, donde da lugar a la evaporación. El líquido vaporizado es arrastrado con medio de desecación, con los gases calientes. Este tipo de secadores también se les conoce como secadores por convección.

**Indirecto.** Contrario a los secadores directos, estos no utilizan el contacto directo con el gas para secar el material. Estos dependen el calor que emana de la cáscara del tambor para secar el material por conducción y radiación. Este método cuenta con ciertas ventajas por encima del método directo: Evita que los materiales finos queden atrapados en el gas del proceso. Permite controlar el entorno del proceso y es ideal cuando se trabaja con materiales que pueden ser combustibles o cuando el material no puede entrar en contacto con gases del proceso.

## **F. Principales equipos de secado**

Los equipos de secado se dividen según el tipo de secado según lo mencionado por Treybal (1998):

### ***Equipos por lotes***

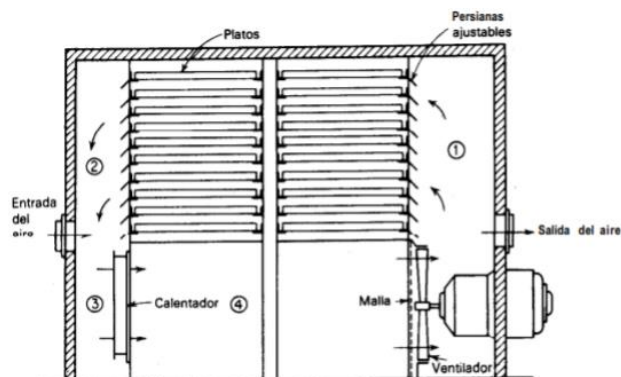
#### **Secadores directos.**

**Secadores de platos o de bandejas.** Los secadores de platos, de gabinete, de compartimiento o de anaqueles, son utilizados para el secado de sólidos que deben ejecutarse sobre platos. En estos equipos se puede

secar sólidos o materiales pastosos, como puede ser las tortas resultantes de algún proceso de filtración (Treybal, 1998). En la Figura 2 se puede observar un esquema general de un equipo de secado por platos que consta de un gabinete de platos móviles sobre los que se debe colocar el sólido o sustancia a secar. Se carga por completo el gabinete con sólidos, se cierra y se introduce una corriente de aire caliente con vapor a secar. Este aire caliente pasa a través de los platos y evapora la humedad del sólido por medio de la circulación cruzada. Para este equipo se puede utilizar gas inerte y puede utilizarse en estado de sobrecalentamiento en dado caso sea un gas combustible o si el oxígeno puede afectar al sólido. Una vez seco el sólido, o se llegó a la humedad deseada se abre el gabinete y se cambia de lote a secar.

**Figura 2.**

*Esquema general de un secador de platos o de gabinete*

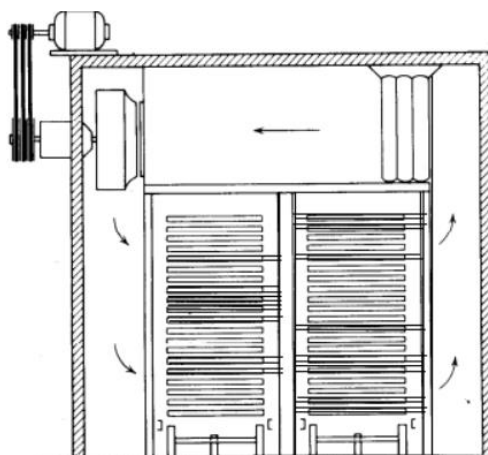


*Nota:* Tomado de Treybal (1998).

**Secador de camión.** El secador de camión es una modificación del secador de platos, en este equipo los platos se encuentran colocados sobre camiones que pueden sacarse y meterse en el gabinete. Este equipo presenta la ventaja de que se puede reducir los tiempos entre los ciclos de secado dado que los camiones pueden cargarse y descargarse fuera del secador. Este diseño que se observa en la Figura 3 también puede presentar modificaciones en su diseño en base al tipo de sólido que se va a secar. Y cabe resaltar que estos equipos, tanto el secador de platos como el de camión pueden utilizar bloques espaciadores para separar una distancia adecuada y deseada de sólidos a secar.

**Figura 3.**

*Esquema general de un secador de camión*

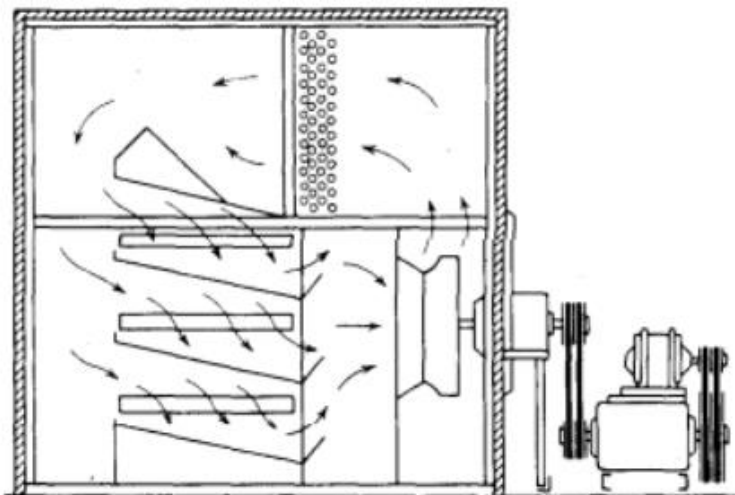


*Nota:* Tomado de Treybal (1998).

**Secador por lotes de circulación transversal.** Los secadores por lotes de circulación transversal se suelen utilizar en el caso se cuente con materiales granulares, donde los sólidos son retenidos por medio de mallas (cuyo mesh es adecuado para evitar el paso de los granos) y de este modo, el aire o el gas pueda pasarse a través de los lechos tal y como se ilustra en la Figura 4.

**Figura 4.**

*Esquema general de un secador por lotes de circulación transversal*



*Nota:* Tomado de Treybal (1998).

Para los tres secadores por lotes de tipo secado directo presentan la dificultad o el problema de la no uniformidad en el contenido de humedad del producto que se extrae en distintas partes del secador. Esto puede deberse a que no hay una circulación uniforme y adecuada de aire dentro del equipo. Para evitar esto se utilizan caudales adecuados de aire sin que exista fluidización del sólido a secar. Para evitar elevar los costos de operación se suele realizar una recirculación de aire dentro de los equipos, introduciendo aire fresco y una parte del aire utilizado. También se puede colocar respiraderos en cada nivel de plato que pueden ajustarse para asegurar la velocidad del aire lo más uniforme posible.

Se puede regular la distancia entre cada plato para obtener una buena distribución de aire y se debe de tener precaución de no sobrecargar cada plato. Se debe comentar que los tres secadores descritos son relativamente baratos de construir y requieren bajos costos de mantenimiento. Sin embargo, su operación es más costosa ya que presenta una baja economía calorífica y altos costos de trabajo, ya que cada vez que se abre y se cierra el secador, se pierde calor con los alrededores y la temperatura del interior disminuye, por lo que debe incurrirse a elevarla nuevamente.

### **Secadores indirectos**

**Secadores de anaqueles al vacío.** Los secadores de anaqueles al vacío son secadores de platos cuyos gabinetes se ajustan con puertas que cierran perfectamente. Estos pueden ser de fierro colado o de acero. Estos pueden operarse a presiones inferiores a la atmosférica. No hay circulación de aire como tal dentro del equipo, los sólidos se hacen pasar por agua tibia o vapor con el fin de proporcionar energía en forma de calor para la evaporación de la humedad dentro del sólido por lo que la conducción es el único mecanismo de transferencia de calor (Treybal, 1998).

**Secadores de charola de agitación.** Los secadores de charola con agitación se pueden utilizar para secar pastas o lodos en lotes pequeños. Se utilizan láminas circulares ligeras de 1 a 2 m de largo y de 0.3 a 0.6 m de diámetro con el fondo plano y lados verticales. Se coloca una chaqueta a cada charola para circular vapor o agua caliente y realizar el calentamiento del sólido.

**Secadores giratorios de vacío.** Los secadores giratorios de vacío son cubiertas cilíndricas con chaqueta de vapor, se encuentran en arreglos horizontales donde se puede secar un lodo o una pasta al vacío. Se realiza una agitación del sólido por medio de una serie de hojas giratorias de agitación unidas a un eje central horizontal que pasa a través de las puntas de la cubierta cilíndrica (Treybal, 1998).

### **Equipos continuos**

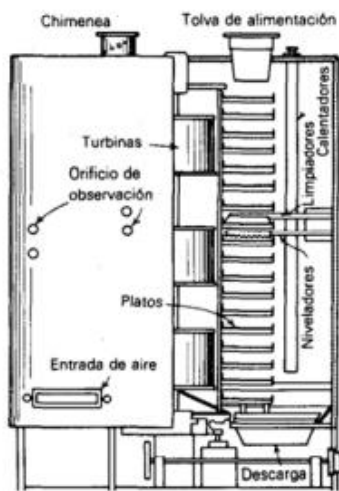
**Secador de túnel.** Son secadores directos, es un secado de camión adaptado para que sea continuo. Son túneles largos en donde a través de él se mueven camiones cargados con platos que acarrear al sólido y se ponen en contacto con una corriente de gas que evapora la humedad. El tiempo de residencia dependerá del tipo de sólido que se trabaje y la humedad final deseada. El secado se puede dar a dos rangos de temperaturas:

- Bajas temperaturas: donde se hace fluir aire calentado por vapor
- Altas temperaturas: donde se utiliza gases de combustión si el sólido lo permite.

**Secador tipo turbo.** Es un secador directo para materiales que generalmente pueden secarse sobre platos: materiales en polvo o granulares, lodos y pastas pesadas, sólidos en perlas o cristalinos. Estos secadores tienen la alimentación en la parte de arriba, el sólido cae al plato superior y este va girando para esparcir el sólido, de esta forma se va secando hasta que cae por una ranura y los tira al siguiente plato como se ilustra en la Figura 5. El gas fluye de forma ascendente, el tiempo de secado es menor que en secadores de túnel.

#### **Figura 5.**

*Esquema general de un secador tipo turbo*



*Nota:* Tomado de Treybal (1998).

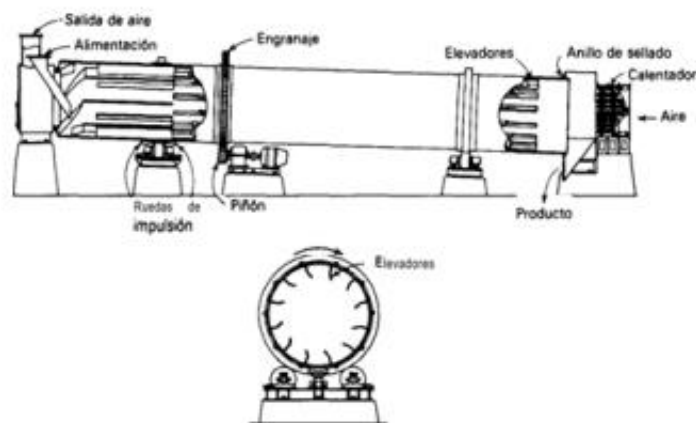
**Secadores de circulación transversal.** El secador cuenta con una banda sinfín móvil que está hecha de platos perforados. El aire caliente se sopla por ventiladores de forma ascendente a través del sólido húmedo y descendente después del secado inicial. Para los materiales que permiten el flujo de gas a través del lecho el secado es mucho más rápido que los tipos túnel.

**Secador rotatorio.** Estos secadores son adecuados para manejar materiales granulares de flujo libre que pueden arrojarse sin temor de romperlos. El sólido se agrega continuamente por un extremo del cilindro giratorio mientras que el aire caliente fluye desde el otro extremo. El cilindro presenta un ángulo respecto a la horizontal, lo que permite el movimiento del sólido a través de él, como se muestra en la Figura 6. El cilindro también tiene elevadores los cuales levantan el sólido u lo dejan caer a través del aire. En la salida del gas se

utiliza un ventilador de extracción para tener un mejor control del flujo de gas. Los tipos principales son: calor directo, flujo a contracorriente; calor directo, flujo paralelo; calor indirecto, flujo a contracorriente y directo-indirecto.

**Figura 6.**

*Esquema general de un secador rotatorio*



*Nota:* Tomado de Treybal (1998).

**Secadores de tambor.** Un tambor metálico giratorio, calentado internamente con vapor, se sumerge en un tanque que contiene la sustancia por secar, una película delgada de la sustancia se retiene sobre la superficie del tambor, la humedad se evapora en el aire que lo rodea mediante el calor transferido a través del metal del tambor. El material seco se desprende continuamente de la superficie del tambor mediante un cuchillo.

**Secador por aspersión.** En estos secadores el líquido que se va a secar se atomiza y se introduce en una cámara grande de secado, en donde las gotas se dispersan en una corriente de aire caliente. Las partículas del líquido se evaporan rápidamente y se secan antes que puedan llegar a las paredes del secador, el polvo seco que se obtiene cae al fondo cónico de la cámara y luego es extraído mediante una corriente de aire hasta un colector de polvo.

**Lechos fluidizados.** Las características principales de estos lechos incluyen el flujo tangencial del sólido y el gas del secado en un tiempo de residencia controlable.

**Secadores neumáticos.** Si la velocidad del gas en un lecho fluidizado incrementa a la velocidad de las partículas sólidas individuales, estas son levantadas del lecho y acarreadas junto con el gas fluidizante. Estas mezclas de partículas de sólido y gas son características de los secadores instantáneos y neumáticos. Los sólidos granulares, al fluir libremente, se dispersan en una corriente de gas caliente que fluye con rapidez, con un tiempo de exposición de unos segundos. Estos breves tiempos de secado limitan el método a los casos en que sólo se tiene humedad superficial, en donde no es importante la difusión interna de la humedad dentro del sólido (Treybal, 1998).

## G. Pretratamiento de secado de alimentos

Buscando mejorar la calidad de alimentos y ralentizar procesos indeseables como la descomposición por crecimiento de microorganismos, se realiza el secado o deshidratación de un alimento. Sin embargo, se puede utilizar diferentes tipos de pretratamiento de secado. Con el fin de aumentar la cantidad de producto seco por temporada con los mismos equipos de secado y minimizar las pérdidas de calidad de producto, este se puede tratar química y mecánicamente. Estos pretratamientos permiten aumentar la velocidad de secado en la superficie de frutos cerosos (Ohaco et al., 2011).

### ***Pretratamientos Químicos***

Son aquellos que permiten crear micro canales que disminuyen la impermeabilidad, aumentando así la velocidad de secado. Algunos también minimizan las reacciones enzimáticas o no enzimáticas que producen degradación de la calidad del producto. Entre los pretratamientos químicos más comunes consisten en sumergir los frutos frescos en soluciones de ésteres de ácidos grasos como soluciones de oleato de etilo con carbonato de potasio por varios segundos o en soluciones de hidróxido de sodio, pudiendo afectar el sabor del producto. Para todos los tratamientos previos al secado de frutas se han informado disminuciones de tiempo de secado que oscilan entre 20-40% (Ohaco et al., 2011).

### ***Pretratamientos físicos o mecánicos***

Son aquellos pretratamientos que consisten en producir algún tipo de daño mecánico sobre la piel de los frutos, que produce grietas en la capa impermeable facilitando la llegada de humedad desde el interior de los frutos hasta la superficie de estos. Reducción de tamaño: La reducción del tamaño del material en partículas más pequeñas aumenta la superficie expuesta al aire caliente, lo que acelera la tasa de secado. Algunos métodos comunes de reducción de tamaño incluyen la molienda, el corte y el triturado. Cambio de forma: Cambiar la forma del material a una forma más plana o delgada también aumenta la superficie expuesta al aire caliente, lo que mejora la eficiencia del secado. Aumento de la porosidad: Aumentar la porosidad del material facilita la difusión del aire caliente y la humedad dentro del material, lo que acelera el proceso de secado. Algunos métodos comunes para aumentar la porosidad incluyen la perforación, la creación de canales y la eliminación de aire. Mezcla: La mezcla del material con un material inerte, como arena o harina, puede mejorar la eficiencia del secado al aumentar la fluidez del material y reducir la formación de grumos. Para todos los tratamientos previos al secado de frutas se han informado disminuciones de tiempo de secado que oscilan entre 20-40% (Ohaco et al., 2011).

### ***Otros tipos de pretratamientos***

**La impregnación al vacío.** Este tratamiento es uno de los tratamientos que se puede aplicar a los alimentos mínimamente procesados para disminuir los niveles de oxígeno presentes en oxígeno. También para incorporar a la estructura, antioxidantes, conservantes, azúcares y ácidos que permiten tener mejores cualidades organolépticas. Esta operación causa una alteración estructural y fisiológica, debido al intercambio de gas presente en los poros por el líquido externo, afecta los niveles de respiración de frutas mínimamente procesadas y por ello afecta a la vida útil de los productos tratados. Este intercambio sucede cuando se sumerge el producto en una fase líquida para someterlo a una baja presión y así expandir el gas para que salga, luego al restituir la presión atmosférica el producto se comprime, favoreciendo la penetración del líquido exterior en los poros (Fito, 1994).

**Deshidratación osmótica.** Esta es una técnica de deshidratación parcial de alimentos que consiste en la inmersión de estos en soluciones acuosas de solutos (ya sea sales o azúcares) de alta presión osmótica. La fuerza impulsadora requerida para el flujo del agua es la diferencia de potencial químico entre la disolución y el flujo intracelular. Si la membrana celular es perfectamente semipermeable, entonces el soluto es incapaz de difundir hacia el interior de las células. Sin embargo, en los alimentos es difícil encontrar una membrana perfectamente semipermeable, debido a la complejidad de su estructura, por lo que sucede una difusión del soluto del alimento u viceversa. Esta es una lixiviación de los componentes del alimento hacia la solución. Por esto, el fenómeno muestra dos procesos simultáneamente en contracorriente, los cuales son: el movimiento del agua desde el alimento hacia la solución hipertónica, en el que se puede arrastrar algunos de los componentes disueltos del alimento junto con el agua extraída, por el otro lado la impregnación del alimento con los solutos provenientes de la solución. La deshidratación osmótica se caracteriza por presentar dos etapas: una dinámica y otra en equilibrio. En la etapa dinámica, las velocidades de transferencia de materia disminuyen hasta que llega al equilibrio. El proceso osmótico termina cuando se alcanza este equilibrio, es decir, cuando la velocidad

netamente de transporte de materia se anula. El agua se elimina principalmente por difusión y flujo capilar, mientras que la impregnación del alimento con solutos y la lixiviación de los componentes del alimento se producen únicamente por difusión (Della Rocca y Mascheroni, 2011).

**Escaldado.** Este es un tratamiento térmico que se aplica a productos, generalmente vegetales, A diferencia de otros procesos, el escaldado no destruye los microorganismos ni alarga el tiempo de vida útil de los alimentos. Este tratamiento forma parte de una etapa previa a otros procesos cuyo principal objetivo es inactivar enzimas y ablandar el producto para favorecer el envasado (Nowacka y Wedzik, 2016).

**Ultrasonido o microondas.** Este puede definirse como el tratamiento que utiliza ondas acústicas inaudibles de una frecuencia superior a 20kHz. Este tratamiento realiza principalmente efectos mecánicos y se produce ciclos de expansión y compresión en forma alterna. Durante los ciclos de expansión, se forman burbujas crecientes en el medio y cuando estas alcanzan un volumen al que no pueden absorber más energía, implosionan violentamente, provocando microcorrientes colapsan con las moléculas de líquido y realizar una inactivación microbiana. Las ondas ultrasónicas causan compresiones y expansiones rápidas de las células de la planta, lo que induce a formación de burbujas, provocando cambios en la viscosidad, tensión superficial por la destrucción de las paredes celulares, permitiendo la formación de canales microscópicos y radicales libre de esta forma. Aunque no es un proceso térmico, también puede considerarse que parte de la energía puede absorberse en forma de calor elevando la temperatura en cierta medida (Nowacka y Wedzik, 2016).

## H. Secado de alimentos

La presencia de agua en los alimentos contribuye de forma importante a su deterioro, por lo tanto, la disminución de contenido de agua en un alimento reduce la posibilidad de su alteración biológica y también, de forma apreciable, las velocidades de otros mecanismos de deterioro. Aunque el objetivo principal de los procesos de conservación por medio de la reducción de agua es la prolongación de la vida útil de los alimentos, también disminuye considerablemente la masa de estos, por lo que permite ahorros importantes en el almacenamiento y transporte de los productos (Casp y Abril, 1998).

Sin embargo, la eliminación de agua presenta dos problemas importantes:

- El riesgo de la alteración de la calidad nutricional y sobre todo organoléptica del producto tratado
- El notable consumo de energía

Por lo que la falta de selectividad de la eliminación de agua puede producir pérdidas de aromas más volátiles en el agua, sobre todo si se realiza al vacío. Y en cuanto al consumo energético, unas técnicas de eliminación de agua son menos costosas que otras, pero no son precisamente las menos costosas las que alteran la calidad de producto (Casp y Abril, 1998).

### *Modificaciones producidas en el alimento por la deshidratación*

Según lo indicado por Casp y Abril (1998). El secado es una de las formas de aumentar la duración de la conservación del producto, sin embargo, también provoca modificaciones físicas de su calidad tales como de aspecto, textura, gusto y composición nutricional. Las degradaciones del producto están ligadas principalmente a la duración y temperatura del secado. Para cada uno de los productos se puede definir una temperatura máxima admisible a la que se recomienda no sobrepasar para evitar ya que muchas reacciones fisicoquímicas son actividades por la temperatura y en consecuencia el secado provoca aceleración de dichas. Estas modificaciones son inevitables, pero según la composición del alimento y los parámetros de secado se favorecen unas reacciones y se limitarán otras. Por lo que es importante conocer cuáles de estas reacciones van a constituir el factor predominante de la alteración, con el fin de ajustar de mejor manera las condiciones de secado.

Las principales alteraciones observadas en los productos deshidratados son de forma química o física.

**Alteraciones químicas.** Las principales alteraciones de naturaleza química pueden producirse debido al renacimiento, reacción de Millard y actividad enzimática.

**Reacciones de oxidación de lípidos.** Es responsable de la rancidez, del desarrollo de malos sabores y pérdida de vitaminas liposolubles y pigmentos. Ejemplo de alimentos que se ven afectados por estas reacciones son la carne de cerdo, de aves, pescados, papas, entre otros.

**Pardeamiento enzimático.** La actividad enzimática puede proceder de enzimas endógenas presentes de forma natural en la materia prima o en enzimas termorresistentes procedentes de microorganismos. Si estas enzimas no son inactivadas por el calor puede producirse reacciones enzimáticas en alimentos con bajo contenido de agua. Debido a que es necesaria la presencia de agua líquida para el transporte del sustrato hacia la enzima. Por ello es que conviene aplicar un pretratamiento que permita detener estas reacciones desde el comienzo del secado en deshidratación de frutas y hortalizas como puede ser el escaldado. Los productos más afectados por este tipo de reacciones son los plátanos las manzanas y hortalizas como las papas.

**Reacciones de Millard.** Llamado también pardeamiento no enzimático afecta a frutas y productos cárnicos y en algunos lácteos. Estas reacciones son favorecidas cuando se tiene un alto nivel de ácido en el producto, rico en ácido ascórbico, en glúcidos y en proteínas.

**Alteraciones de los constituyentes de los productos.** Entre las principales alteraciones de ellos productos a nivel de sus constituyentes se puede destacar los siguientes:

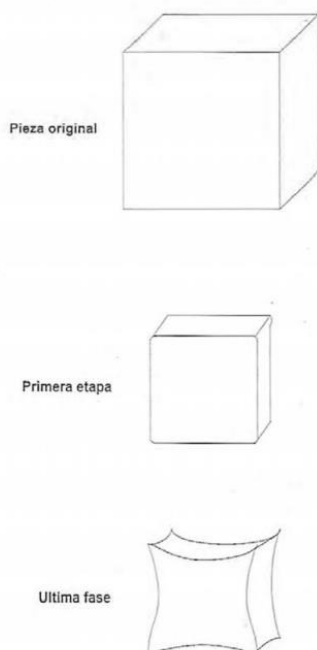
- **Pérdida de vitaminas.** Depende el tipo de secado seleccionado, el cuidado de la ejecución y es mayor cuando no se hace una inactivación de enzimas. Entre las vitaminas que pueden perderse está la tiamina, riboflavina y niacina. La vitamina C también se ve afectada debido a su sensibilidad a temperaturas.
- **Efectos en proteínas.** Debido a desnaturalización especialmente en membranas, reduciendo la rehidratabilidad.
- **El color.** El color de los alimentos varía con el secado ya que, al tener alteraciones químicas y físicas, se modifica su capacidad de dispersar, absorber y transmitir luz.
- **Los carotenoides.** Estos son pigmentos liposolubles presentes en las hojas verdes y en vegetales rojos y amarillos, esto hace susceptibles a degradación de lípidos por oxidación (Casp y Abril, 1998).

### **Alteraciones de naturaleza física**

**Cambios de estructura.** El tejido celular animal o vegetal, en estado vivo presenta una turgencia típica. Las paredes celulares están bajo tensión y el contenido celular bajo compresión. La pared celular posee resistencia y elasticidad que hace capaz de admitir determinados esfuerzos y volver a su estado original. Pero superado este límite, la modificación de la estructura se hace irreversible. En la figura 7 se puede apreciar los cambios que se producen durante el secado de las piezas vegetales: Se toma una pieza en forma de cubo, que está en condición de turgencia aún después del escaldado. El contenido celular está sometido a presión y la membrana celular está bajo tensión. Si se expone este cubo a una corriente de aire caliente, el primer efecto es la evaporación de agua desde la superficie húmeda. La concentración de solutos en la superficie aumenta, el agua de las soluciones diluidas de las capas más profundas se mueve hacia la superficie, a través de las paredes celulares como consecuencia del gradiente de concentraciones. Esta pérdida de fluido celular provoca una concentración del volumen de la célula.

La primera etapa en la concentración de los tejidos es la depresión de la capa superficial de células, produciendo un encogimiento hasta un núcleo húmedo e incompresible. A medida que prosigue el secado, las células de las capas superficiales se aplastan cada vez más, el cubo pierde sus ocho vértices y se convierten en redondeados. Continuando con el secado, el encogimiento o concentración empieza a manifestarse en toda la pieza, los ocho vértices del cubo se habrán secado y endurecido mientras que el centro permanece húmedo y plástico. Las últimas fases de concentración tienen lugar en el centro principalmente y la pieza adopta formas como la indicada en la figura, aunque lo normal es que presente formas distorsionadas irregularmente.

**Figura 7.**  
Alteración de estructura debido a concentración de tejidos



*Nota:* Tomado de Casp y Abril (1998).

**Otras alteraciones de naturaleza física.** El agua no es la única sustancia que cambia de posición dentro del producto cuando se deshidrata. En un tejido vivo, el agua está como solución de muchos constituyentes, algunos de los cuales son pequeñas moléculas como los azúcares, mientras que otros presentan estructuras moleculares complejas. Durante el secado algunas de estas sustancias disueltas experimentan movimiento de migración. Se produce con la deshidratación, la pérdida irreversible del flavor característico del alimento. Al evaporarse el agua del producto, inevitablemente arrastra trazas de casi todos los componentes volátiles del alimento fresco. Algunos de estos son responsables del aroma y flavor los cuales se pierden durante el secado. Sin embargo, si se forma una capa delgada de producto seco en la superficie durante los primeros momentos del secado, los componentes volátiles quedan retenidos porque la capa de alimento actúa como una película semipermeable que se deja atravesar por el vapor de agua.

### **Actividad del agua**

El agua contenida en un alimento ya sea de origen animal o vegetal, está más o menos disponible para participar en reacciones químicas, físicas y microbiológicas dependiendo del alimento tratado. Esta disponibilidad varía de un producto a otro según su composición, algunas estructuras o moléculas permiten retener más agua que otras. Además, varían por cada producto debido a que se comporta de diferente forma según el nivel de maduración que se tiene en el alimento o fruto.

Según Casp y Abril (1998) la actividad del agua expresa la disponibilidad, es decir el grado de libertad del agua en el producto. Es la relación entre la presión parcial del agua en el alimento y la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura. A continuación, se puede ver la Ecuación 1.

$$a_w = \frac{\text{Presión parcial alimento}}{\text{Presión parcial vapor agua}} = \frac{\% \text{Humedad relativa}}{100} \quad (1)$$

Este es uno de los parámetros, junto a la temperatura, que mayor influencia tiene en las reacciones de deterioro de un alimento. La actividad de agua se define como la relación entre un estado de referencia que es el agua pura. Cuando este valor es uno, indica que el agua se encuentra en estado libre. Si, por lo contrario, el está ligada al sustrato seco por fuerzas de unión fisicoquímica, el valor será entre 0-1 y es tanto más bajo cuando mayores son las fuerzas de unión. Por lo contrario, tiende a 1 cuando se aproxima al estado libre. En los alimentos, la actividad del agua de un producto es siempre inferior a 1. Esto significa que los constituyentes del producto fijan parcialmente el agua disminuyendo así la capacidad de evaporarse (Casp y Abril, 1998).

## I. Fenómenos de transporte en el secado

En cuanto a la operación de secado, se cuenta con cuatro procesos de transporte los cuales corresponde a los siguientes según lo indicado por Casp y Abril (1998).

**Transmisión de calor desde el gas hasta la superficie del producto.** Esta puede realizarse tanto por conducción como por convección o radiación, dependiendo del equipo de secado utilizado.

**Trasmisión de calor desde la interfase sólido-gas hasta el interior del sólido.** Este solo se puede dar por medio de la conducción, en régimen no estacionario ya que las condiciones en cualquier punto varían con el tiempo.

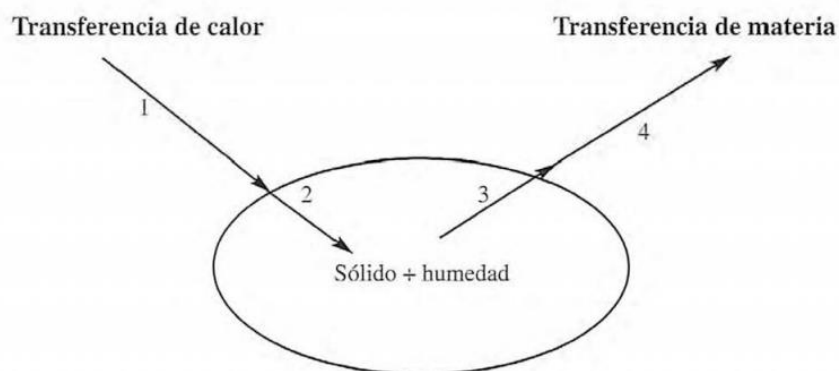
**Transmisión de materia a través del sólido.** Esto por medio de la difusión o capilaridad, aprovechando los capilares existentes en el sólido. La difusión tiene lugar en el secado de productos con humedades de orden de 25% mientras que la capilaridad se presenta en los niveles altos de humedad (65% o más) siempre y cuando en la estructura interna exista capilares.

**Transferencia de vapor desde la interfase sólido-gas hacia el gas.** Los sistemas más usuales emplean la convección como mecanismo de transferencia de calor y aire como vehículo de esta energía, por lo tanto, la transferencia de calor dependerá, en este caso de la temperatura del aire, de su humedad de su caudal de la superficie expuesta del sólido y la presión.

Este proceso se logra visualizar de mejor forma en la Figura 8 donde se observa la interacción del sólido y humedad con los fenómenos de transferencia de calor y transferencia de materia.

**Figura 8.**

*Procesos de fenómeno de transporte en el secado*



*Nota:* Tomado de Casp y Abril (1998).

Es necesario tomar en cuenta que los cuatros procesos de transporte citados ocurren simultáneamente. Sin embargo, puesto a que la velocidad de secado será proporcional al más lento de ellos, en la mayoría de los casos dicho proceso será el de transporte de materia y calor en el interior del sólido (Casp y Abril, 1998).

## J. Transferencia de masa en el secado

### *La humedad*

El grado de presión de vapor que ejerce la humedad contenida en un sólido húmedo depende de la naturaleza de la humedad, la naturaleza del sólido y la temperatura. Por lo tanto, si un sólido húmedo se expone a una corriente continuada de gas fresco que contiene una presión parcial dada de vapor, el sólido perderá o ganará la humedad del gas, hasta igualar la presión parcial del gas. Por ello, el sólido y el gas estarán en equilibrio y el contenido de humedad del sólido se conoce como su contenido de humedad en el equilibrio en las condiciones predominantes (Treybal, 1998).

La humedad en el equilibrio para una especie dada de sólido puede depender del tamaño de partícula o la superficie específica, si la humedad antes de cualquier otra forma está físicamente absorbida. Diferentes sólidos tienen diferentes curvas de humedad en el equilibrio. Generalmente, los sólidos inorgánicos, que son insolubles en el líquido y que no muestran propiedades de adsorción, muestran contenidos relativamente bajos de humedad en el equilibrio. Por lo contrario, los materiales celulares, esponjosos, especialmente los de origen vegetal, generalmente muestran elevados contenidos de humedad en el equilibrio. La presión parcial en el equilibrio para un sólido es independiente de la naturaleza del gas seco, siempre que este último sea inerte frente al sólido u sea de la misma presión en ausencia de gas no condensable (Treybal, 1998).

Se utilizan diferentes términos para describir el contenido de humedad en las sustancias, los cuales se explicarán a continuación según la definición proporcionada por Treybal (1998):

**Contenido de humedad, base húmeda.** El contenido de humedad de un sólido o solución generalmente se describe en función del porcentaje de masa de humedad. Ecuación 2:

$$X_h = \frac{\text{kg humedad}}{\text{kg sólido húmedo}} * 100 = \frac{\text{kg humedad}}{\text{kg sólido seco} + \text{kg humedad}} * 100 = \frac{100 * X}{1 + X} \quad (2)$$

Donde X representa el contenido de humedad, base seca

**Contenido de humedad, base seca.** Se expresa como kilogramos de humedad por cada kilogramo de sólido seco (X). Ecuación 3:

$$X = \frac{\text{kg humedad}}{\text{kg sólido seco}} = \frac{X_h}{1 - X_h} \quad (3)$$

**Humedad en el equilibrio.** Es el contenido de humedad de una sustancia que está en equilibrio con la presión parcial dada de vapor ( $X^*$ ).

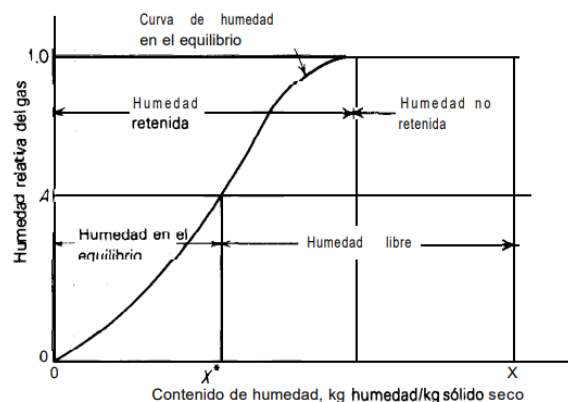
**Humedad ligada.** Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura.

**Humedad no ligada.** se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura.

**Humedad libre.** Es aquella humedad contenida por una sustancia en exceso de la humedad en el equilibrio. Solo puede evaporarse la humedad libre, el contenido de humedad libre de un sólido depende de la concentración del vapor en el gas. Ecuación 4:  $X_L = X - X^*$  (4)

Estas relaciones se pueden observar en la siguiente Figura 9 para un contenido de humedad X expuesto en un gas de humedad relativa A.

**Figura 9.**  
*Tipos de humedad*

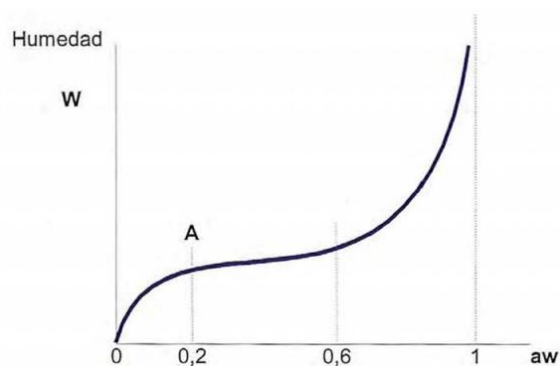


*Nota:* Tomado de Treybal (1998).

Desde el punto de vista de los alimentos como material de secado y de la actividad del agua se cuenta con la isoterma de equilibrio que muestran la humedad respecto a la actividad de agua del alimento tomando de referencia la Figura 10, se describe las diferentes secciones (Treybal, 1998). En la primera sección  $a_w < 0.2$ , EL producto contiene muy poca agua, actúa con fuerza de Van der Waals muy intensas y las moléculas de agua presentes están muy ligadas a los puntos activos, como los grupos polares de las moléculas o como los puentes de hidrógeno. El contenido de humedad representa teóricamente la absorción de la primera capa de moléculas de agua (punto A en la isoterma) se llama valor monocapa y está generalmente alrededor de 0.2-0.4 y por debajo de un contenido de humedad de 0.1g agua/g sólido (Casp y Abril, 1998).

En la segunda sección  $0.2 < a_w < 0.6$ , es una zona intermedia, el agua se encuentra bajo forma de capas polimoleculares que recubren parcialmente la superficie del sustrato seco del sustrato seco, las moléculas de agua están ligadas más débilmente que las capas anteriores. La entalpía de vaporización. En la última sección  $a_w > 0.6$ , se puede destacar que corresponde a la fracción de agua libre que se encuentra en estado líquido y que es retenida en la superficie del sustrato seco solamente por fuerzas de capilaridad. Es esta la única fracción de agua verdaderamente disponible para las reacciones químicas, enzimáticas, entre otras. En estas condiciones el crecimiento microbiano es la causa más importante de deterioro de los alimentos, a veces se le llama el agua biológica. Con contenidos de agua altos, la mayor parte de los componentes solubles del sistema están en solución (Casp y Abril, 1998).

**Figura 10.**  
*Isoterma de equilibrio alimentos*



*Nota:* Tomado de Casp y Abril (1998).

Por último, hay que recordar que existe una relación entre la actividad de agua y la velocidad de alteración de los alimentos, con valores de  $a_w$  de 0,8-0,85, se produce la alteración de prácticamente todos los alimentos en una o dos semanas, con valores de 0,75 se produce ya un retraso del deterioro, que es muy notable para valores  $a_w$  de 0,7 a los que es posible realizar almacenamientos prolongados. Cuando la actividad de agua alcanza valores de 0,62 prácticamente desaparece la actividad microbiológica. Y se debe mencionar que las isotermas de equilibrio cambia conforme a la temperatura a la que se realice la deshidratación (Casp y Abril, 1998).

### ***La velocidad de secado por lotes***

Según Casp y Abril (1998) para fijar horarios de secado en el equipo es necesario saber el tiempo que requerirá para secar una sustancia a partir de un contenido de humedad a otro en condiciones específicas. También se debe calcular el efecto que tendrá las diferentes condiciones de secado en el tiempo de secado. El conocimiento del mecanismo de secado es tan incompleto que, salvo pocas excepciones, es necesario con este fin confiar al menos en algunas mediciones experimentales. Las mediciones de la rapidez de secado por lotes son relativamente fáciles y proporcionan mucha información no solo para la operación por lotes, sino que también para la continua.

Por ello se deben llevar a cabo las pruebas de secado. Con respecto a la sustancia, la rapidez de secado puede determinarse suspendiendo la muestra en un gabinete o tubería, en una corriente de aire, para un balance. Entonces la masa de la muestra secada puede medirse como una función en el tiempo. Deben observarse ciertas precauciones para que los datos sean de máxima utilidad. La muestra no debe ser muy pequeña. Más aun, las siguientes condiciones deben tomarse en cuenta:

- La muestra debe soportarse en forma similar sobre un plato o estructura
- Debe tener la misma relación de superficie que se seca a la que no se seca
- Debe sujetarse a condiciones similares de transferencia de calor por radiación
- El aire debe tener la misma temperatura, humedad y velocidad (con la misma velocidad y dirección con respecto a la muestra)
- Si es posible se debe realizar varias pruebas sobre muestras de diferente espesor
- Debe obtenerse la masa seca de la muestra.

La exposición de la muestra a aire de temperatura, humedad y velocidad constantes constituye el secado en condiciones constantes de secado (Treybal, 1998).

### ***Curva de rapidez de secado***

A partir de los datos obtenidos durante las pruebas, se puede graficar una curva de contenido de humedad como función del tiempo. Esta curva permite determinar el tiempo necesario para secar grandes lotes en las mismas condiciones de secado (Treybal, 1998). Se puede obtener mucha información si los datos se convierten en fluxes de secado expresado de la siguiente forma Ecuación 5 donde se describe el flux de secado:

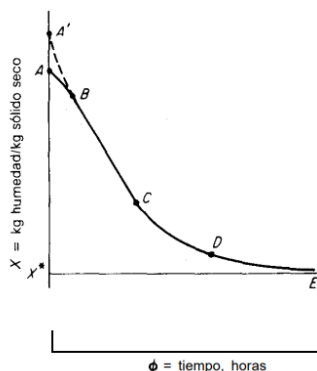
$$N = \frac{\text{Masa}}{\text{tiempo} \cdot \text{área}} \quad (5)$$

Donde N representa el flux de secado

Este se grafica contra el contenido de humedad para lograr obtener la curva de rapidez de secado. Y se logra por medio de las pendientes de las tangentes trazadas en la curva de contenido de humedad en el tiempo, correspondiente a la Figura 9, una vez calculado esto, se logra obtener las gráficas de la curva de pérdida de humedad como la que se muestra en la Figura 11.

**Figura 11.**

Curva de pérdida de humedad en secado por lotes respecto al tiempo



Nota: Tomado de Treybal (1998).

También se puede realizar a partir de la curva, varios cambios en el contenido de humedad para cambios correspondientes de tiempo o expresado por la Ecuación 6 donde muestra la expresión de velocidad de secado o flux de secado:

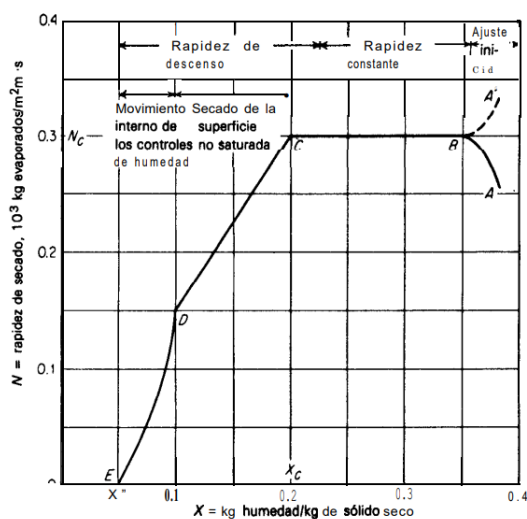
$$N = -\frac{S_s}{A} * \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (6)$$

Donde  $S_s$  es la masa de sólido seco,  $A$  la superficie húmeda sobre la que sopla el gas y a través de la cual tiene lugar la evaporación y  $t$  representa el tiempo (Casp y Abril, 1998).

Generalmente hay tres partes principales en la curva de rapidez, un periodo de ajuste inicial, un periodo de rapidez constante y uno de rapidez decreciente o de descenso, como se señala en la figura. Aunque a menudo los sólidos diferentes y condiciones distintas de secado dan lugar a curvas de formas muy diferentes en el periodo decreciente de la rapidez, la curva ilustrada en la Figura 12 tiende a ocurrir con frecuencia (Treybal, 1998).

**Figura 12.**

Curva típica de rapidez de secado, condiciones de secado constantes

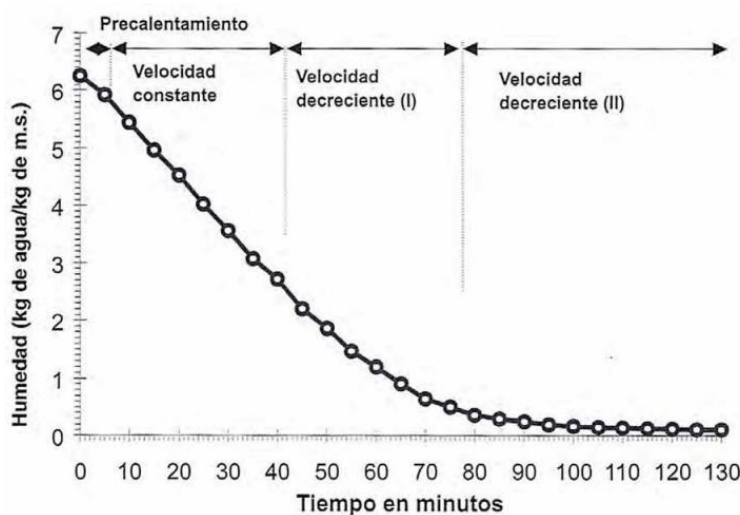


Nota: Tomado de Treybal (1998).

También se puede analizar desde el punto de vista de la curva de la humedad base seca contra el tiempo de secado que se muestra en la Figura 13, donde cada punto corresponde a la humedad en un tiempo determinado de secado.

**Figura 13.**

*Etapas de secado en curva de humedad base seca contra tiempo*



*Nota:* Tomado de Casp y Abril (1998).

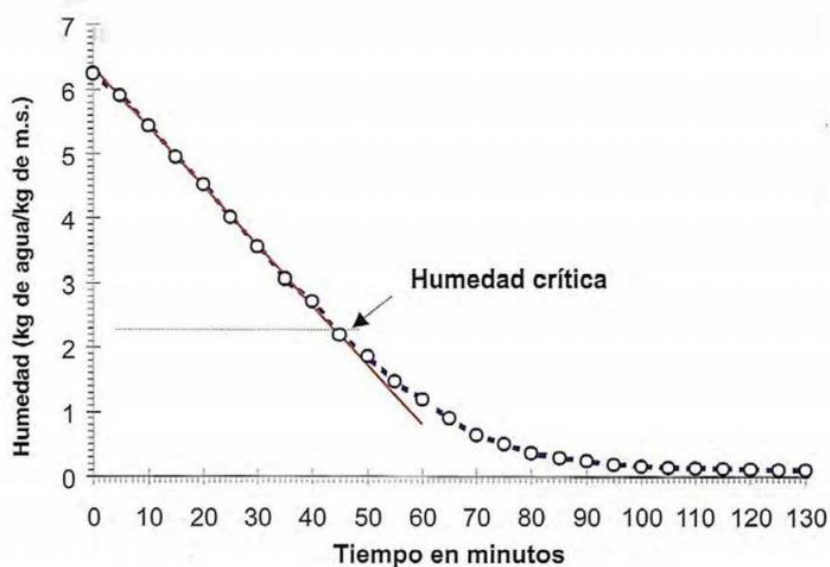
Según Casp y Abril (1998) se puede distinguir las siguientes etapas importantes:

**Precalentamiento o etapa de ajuste.** Transcurre mientras el producto y el agua contenida se calienta ligeramente, hasta alcanzar la temperatura de bulbo húmedo característica de ambiente secante. El producto por secar al principio está frío, su presión de vapor es igualmente baja, por lo que la velocidad de transferencia es muy lenta. Por el contrario, el gradiente de temperatura entre el aire caliente y la superficie seca del producto es elevada por consecuencia la transferencia de calor es alta. La cantidad de calor transferida a la superficie de producto es superior a la cantidad de calor arrastrado por la poca agua evaporada donde existe un desequilibrio. El excedente de calor se utiliza entonces para calentar la superficie de producto, por lo que produce un gradiente de temperatura que terminará cuando se alcance el equilibrio estacionario. Este es un periodo corto en comparación al tiempo total de secado.

**Etapas de velocidad constante.** Durante este se produce una reducción importante de contenido de agua, el agua de imbibición se elimina con un flujo constante. La evaporación se efectúa en la superficie del producto, a temperatura constante para la evaporación del agua. Este periodo continúa mientras la superficie del producto esté alimentada por agua líquida libre desde el interior, fundamentalmente por capilaridad. En la mayoría de los casos esta etapa de velocidad de secado constante finalizará cuando el contenido medio de humedad del producto alcance el valor de la humedad crítica el cuál se observa en la Figura 14.

**Figura 14.**

*Humedad crítica en la curva de humedad base seca contra tiempo*

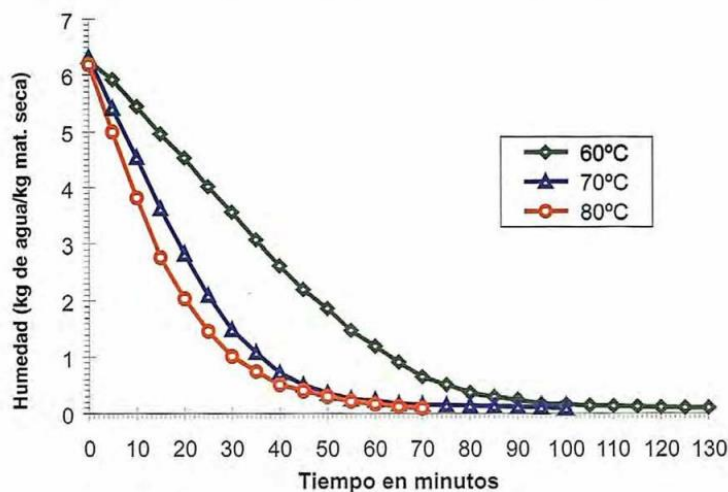


*Nota:* Tomado de Casp y Abril (1998).

La humedad crítica no es una propiedad del alimento, sino depende del tamaño de partícula y las condiciones del aire de secado. Por otro lado, en la etapa de velocidad constante, el principal mecanismo de transporte de masa es la capilaridad del agua líquida, aunque puede existir alguna difusión de líquido. El mecanismo interno de flujo de humedad no afecta a la velocidad de secado en esta etapa, es aire el que impone la velocidad de secado que incrementa al incrementar la temperatura y la velocidad del aire. Como se puede observar en las Figuras 15 y 16.

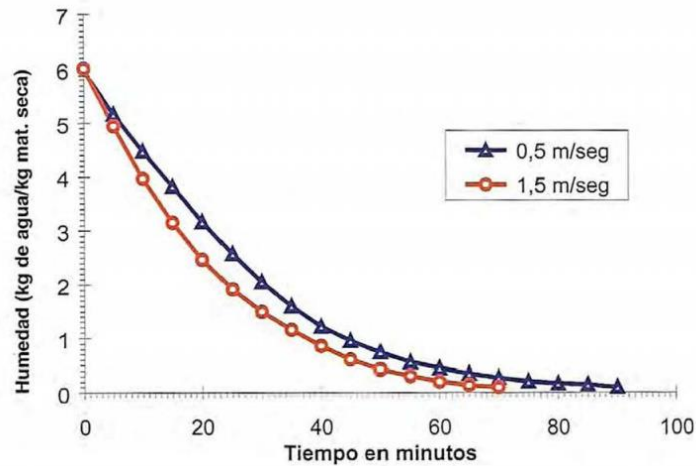
**Figura 15.**

*Influencia de temperatura del aire de secado en la humedad*



*Nota:* Tomado de Casp y Abril (1998).

**Figura 16.**  
Influencia de la velocidad de secado en la humedad



Nota: Tomado de Casp y Abril (1998).

Por otro lado, el diámetro de los poros y los capilares disminuyen y la pérdida de masa es aproximadamente igual al volumen de agua evaporada. El flujo de agua líquida arrastra solutos que se depositan en la superficie, si no son volátiles, produciendo el fenómeno llamado “case hardening” que afecta a la eliminación de agua en los periodos posteriores. Cuando la superficie externa del producto deja de estar saturada, comienza uno o varios periodos de velocidad de secado decreciente y la temperatura se incrementa continuamente desde la de bulbo húmedo hasta la del fluido calefactor.

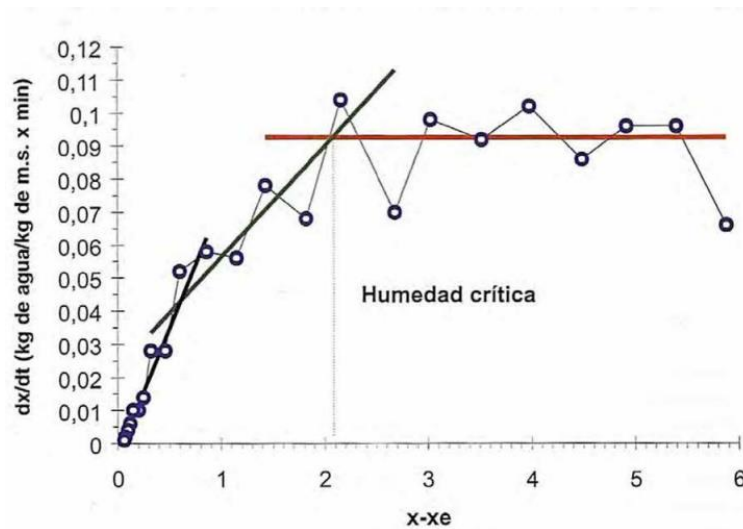
**Etapa de velocidad decreciente (i).** Comienza cuando la superficie del producto en contacto con el aire de secado alcanza el umbral de higroscopicidad (para los materiales higroscópicos). Desde el punto de vista macroscópico, esto corresponde cuando se alcanza la humedad crítica. La zona de evaporación que se encontraba en la superficie se desplaza hacia el interior del producto. La brusca reducción de la superficie efectiva de transferencia, debido a una insuficiente alimentación de agua libre, es la causa de la disminución de velocidad de secado. La migración del agua es cada vez más difícil y como consecuencia la transferencia de masa se convierte en el factor limitante. Los depósitos de solutos obstruyen los poros, el agua ligada migra bajo forma de vapor y la distancia a recorrer por el frente de vapor es cada vez mayor, todos estos factores frenan rápidamente la transferencia interna de agua. En esta etapa, el mecanismo de transporte de masa predomina la difusión de vapor, desde la zona de evaporación hasta la superficie del producto.

**Etapa de velocidad decreciente (ii) o etapa de velocidad final.** Esta etapa existe únicamente en materiales higroscópicos. El flujo másico se reduce más rápidamente que el periodo anterior. El conjunto del producto está en el dominio de la higroscopía. En el alimento no queda más que agua ligada que se evacua muy lentamente por difusión. Esta fase se termina cuando el producto alcanza su humedad de equilibrio y de las condiciones de secado.

Las etapas de velocidad decreciente se aprecian de forma más clara si se representa la velocidad de secado contra la humedad por encima del equilibrio. La variación de humedad con respecto al tiempo  $dx/dt$ . En dicha gráfica puede verse el tramo horizontal correspondiente a la velocidad constante y los tramos de velocidad decreciente. La humedad crítica coincide con el punto de intersección de la recta de velocidad constante con la del primer tramo de velocidad decreciente. Esto se puede observar en la Figura 17.

**Figura 17.**

*Cambio de la humedad respecto al tiempo contra el cambio de humedad*



*Nota:* Tomado de Casp y Abril (1998).

## K. Eficiencia energética

A la energía se le define como la capacidad de realizar un trabajo que poseen los cuerpos, cualquier que sea su causa. Dado a que la energía permanece latente en el cuerpo. Mientras no se manifiesta no se manifiesta explícitamente en forma de trabajo, su medida se lleva a cabo evaluando el trabajo que puede generar, o bien determinando el trabajo que ha sido necesario realizar para llevar al cuerpo o sistema su estado actual. La energía, es una magnitud homogénea con el trabajo.

Las formas de energía que existen son las siguientes:

- Cinética
- Potencial
- Térmica
- Química
- Electromagnética o luminosa
- Eléctrica
- Inherente a la masa (González, 2009).

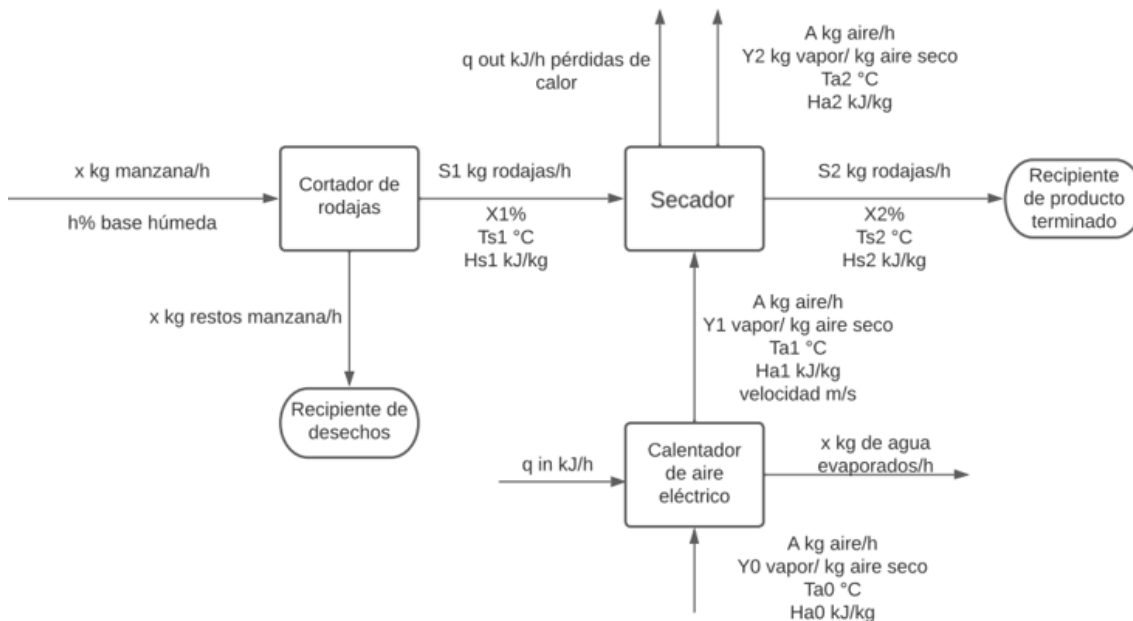
El postulado del primer principio de la termodinámica, la energía no se crea ni se destruye, simplemente se transforma. La energía puede transformarse en una forma a otra. Aunque pueda transformarse no significa que sea este un proceso fácil y tampoco que una de las conversiones no sea más costosa que otra. Por lo que el rendimiento es un factor fundamental que marca la rentabilidad y eficiencia de los diversos tipos de energía.

La eficiencia es una virtud o facultad para lograr un efecto. También es la acción con que se logra ese efecto. En el área de la física, la eficiencia física se refiere a la energía que se invierte en comparación a la energía obtenida en un proceso o dispositivo. Es la correcta utilización de recursos disponibles para la obtención de resultado o lograr objetivos planteados. En cuanto a la eficiencia energética, esta es la eficiencia de producción, distribución y uso de la energía necesaria para garantizar calidad total, es parte del conjunto de problemas que afectan la competitividad de las empresas o instituciones. Esta implica el desarrollo de una actividad productiva o prestación de servicio con el máximo de resultados socialmente útiles con el menor gasto de aportadores energéticos técnicamente posible y la menor contaminación ambiental por la utilización de estos (Monterroso y Cifuentes, s.f.).

## L. Diagrama de flujo teórico

**Figura 18.**

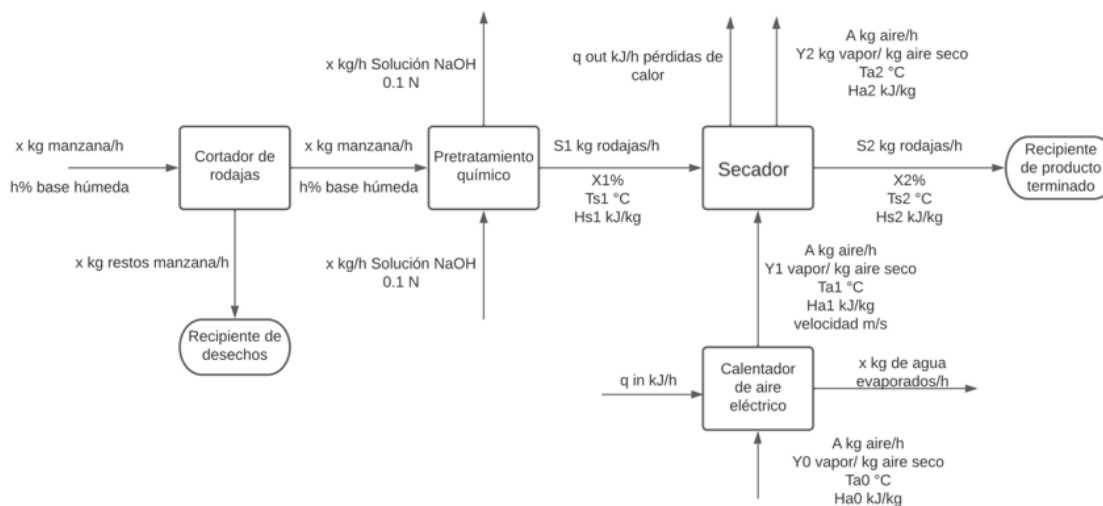
Diagrama de flujo teórico de secado de rodajas de manzana



Nota: Elaboración propia

**Figura 19.**

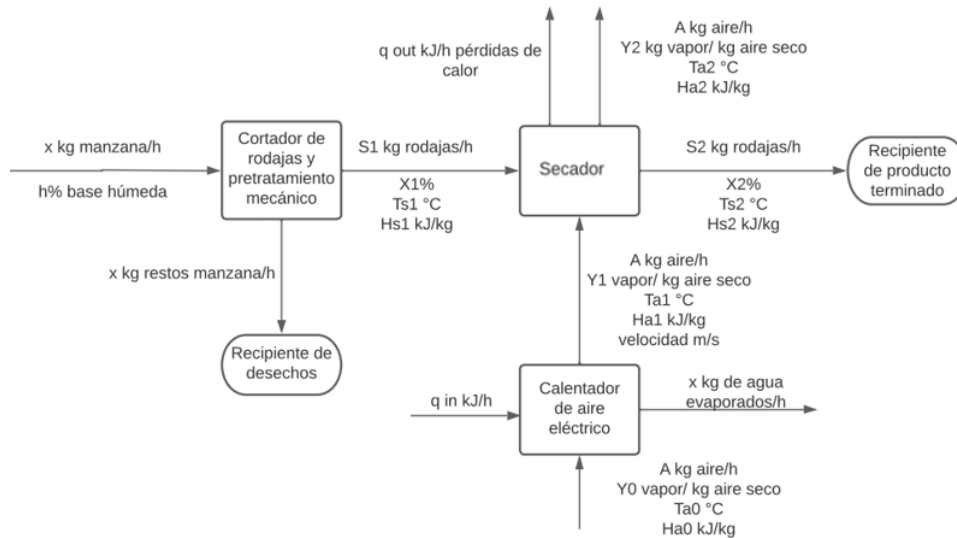
Diagrama de flujo teórico de secado de rodajas de manzana con pretratamiento químico



Nota: Elaboración propia

**Figura 20.**

Diagrama de flujo teórico de secado de rodajas de manzana con pretratamiento mecánico



Nota: Elaboración propia

## M. Análisis de varianza (ANOVA)

Según Field (2013) el análisis de varianza es una técnica estadística que se utiliza para comparar las medias de dos o más grupos. ANOVA es una prueba de hipótesis que se utiliza para determinar si la diferencia entre las medias de los grupos es estadísticamente significativa. El análisis ANOVA se puede utilizar para comparar las medias de grupos que se divide en función de una variable categórica y continuas. Este análisis se basa en el supuesto de que las varianzas de los grupos son iguales. La interpretación de los resultados se basa en que el valor  $p$  es menor al alfa supuesto (correspondiente a la confiabilidad a la que se hace el análisis), se rechaza la hipótesis nula. Esto significa que ha evidencia suficiente para concluir que al menos una de las medias de los grupos es diferente. Además, La prueba  $F$  es una prueba de hipótesis. La hipótesis nula es que las medias de los grupos son iguales. La hipótesis alternativa es que las medias de los grupos son diferentes. Si el valor  $p$  de la prueba  $F$  es menor que el nivel de significación, entonces se rechaza la hipótesis nula. Esto significa que existe una diferencia significativa entre las medias de los grupos.

El ANOVA se puede utilizar en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo:

- En ciencias sociales, el ANOVA se puede utilizar para comparar los resultados de diferentes grupos de tratamiento.
- En ciencias naturales, el ANOVA se puede utilizar para comparar los resultados de diferentes experimentos.
- En ingeniería, el ANOVA se puede utilizar para comparar los resultados de diferentes diseños.

Los pasos para realizar un ANOVA:

- Definir la variable independiente y las variables dependientes. La variable independiente es la variable que se cree que está causando la diferencia en las medias de los grupos. Las variables dependientes son las variables que se están midiendo.
- Recolectar los datos. Se deben recolectar datos para cada grupo.
- Establecer hipótesis. La hipótesis nula es que no hay diferencia entre las medias de los grupos. La hipótesis alternativa es que hay una diferencia entre las medias de los grupos.

- Calcular la F-estadístico. La F-estadístico es una medida de la magnitud de la diferencia entre las medias de los grupos.
- Calcular el p-valor. El p-valor es la probabilidad de obtener una F-estadístico al menos tan grande como la observada si la hipótesis nula es verdadera.

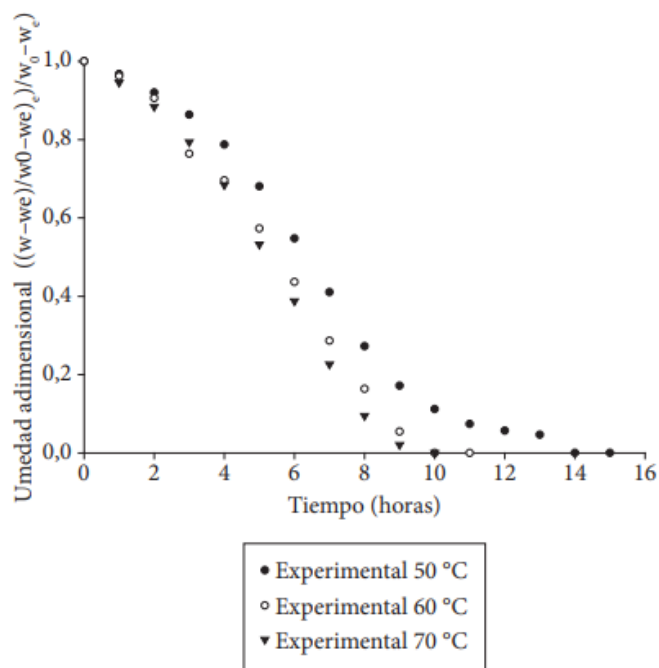
## V. Antecedentes

La caracterización de la manzana gala ha tenido amplia investigación. Díaz y Rodríguez (2019) presentan un estudio de las propiedades fisicoquímicas de la manzana Gala de diferentes orígenes. El estudio se llevó a cabo en España y se analizaron manzanas Gala de tres orígenes diferentes: España, Chile y Sudáfrica. Las manzanas Gala de los tres orígenes presentaron un contenido de humedad de aproximadamente 85%, un pH de aproximadamente 4.0 y un contenido de azúcares de aproximadamente 10%. Sin embargo, las manzanas Gala de Sudáfrica presentaron un contenido de vitamina C ligeramente superior al de las manzanas Gala de España y Chile. La composición química que encontraron fue de composición química encontrada fue de carbohidratos: 10%, fibra dietética: 2.4 g/100 g, Vitamina C: 12 mg/100 g, potasio: 125 mg/100 g, fósforo: 25 mg/100 g, calcio: 14 mg/100 g, hierro: 0.2 mg/100 g. En cuanto al contenido de humedad: 85%. Para el pH: 4.0 y el color característico: rojo o amarillo.

La elaboración de curvas de secado se ha analizado ampliamente. Esto debido al interés de entender el comportamiento del secado para preparar snacks nutricionales. Se tiene claro que la cinética del secado es influida directamente por la temperatura del aire utilizado para secar. Y que el empleo de uso de aire a temperaturas mayores reduce el tiempo necesario para llegar a una misma humedad de producto. También se sabe que, a un mismo tiempo de proceso, cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la velocidad de secado. Además, se ha evaluado diferentes temperaturas tales como el secado a 50°C, 60°C y 70°C. Donde se pueden observar graficas del comportamiento de la humedad en base seca sobre el tiempo en horas, en la Figura 21. Y se puede visualizar que, a una mayor temperatura, la curva tiende a inclinarse más al eje de la gráfica y a menores temperaturas, tiende a alejarse del eje central (Giraldo, et al., 2010).

### Figura 21.

*Curva experimental de pérdida de humedad de pulpa de cupacu*



*Nota:* Tomado de Giraldo, et al. (2010)

Awad y El-Enany (2007) estudiaron el efecto de la temperatura de secado en la calidad de las rodajas de manzana. Los autores secaron las rodajas de manzana a tres temperaturas diferentes: 60, 70 y 80°C. Midieron la coloración, la textura y el contenido de vitamina C de las rodajas de manzana después de haber sido secadas.

Los resultados mostraron que la temperatura tuvo un efecto significativo en la coloración, la textura y el contenido de vitamina C. Las rodajas que se secaron a 60°C tenían el mejor color y textura, pero el contenido de vitamina C más bajo. Las rodajas que se secaron a 70°C tenían un contenido de vitamina C intermedio pero un color y textura más pobres. Las rodajas de manzana secadas a 80°C tenían el contenido de vitamina C más alto pero el color y textura más pobres. Los autores determinaron que la mejor de las temperaturas estudiadas para el secado es de 60°C. A esta temperatura, las rodajas de manzana conservan su mejor color y textura y tienen un contenido de vitamina C adecuado (Awad y El-Enany, 2007).

Esto se ve demostrado igualmente Gascón (2014) estudió las condiciones de secado de frutas confitadas para su uso como ingrediente alimentario donde se evaluó piña y albaricoque. En este estudio se encontró que la pérdida de masa en 10 gramos de muestra era mayor cuanto mayor es la temperatura de secado. Donde se analizaron los datos por medio de la ecuación de Fick la cual tiene los parámetros de Humedad de equilibrio, la cual aumentaba cuando aumenta la temperatura, al igual que el parámetro cinético  $k$ . Por otro lado, Salazar (2007) investigó y comprobó que el tiempo de secado es un factor muy relevante al momento de secar frutas y obtener una calidad de fruta seca muy buena en particular en la crujencia de la hojuela de manzanas. El tiempo de secado a parte de la temperatura es el factor más influyente en el proceso de secado. Por lo que como el problema fue analizar cuál es el lapso en el que las hojuelas obtienen su mejor crujencia de acuerdo con 6 pruebas realizadas, las cuales consistían en periodos de tiempo de 1 hora alternadamente hasta 6 horas y en donde se iba retirando las diferentes muestras a cada hora transcurrida, se concluyó que la muestra con el periodo de tiempo de 5 horas a 55°C fue el más adecuado de acuerdo con el análisis sensorial realizado a un grupo de estudiantes (Salazar, 2007).

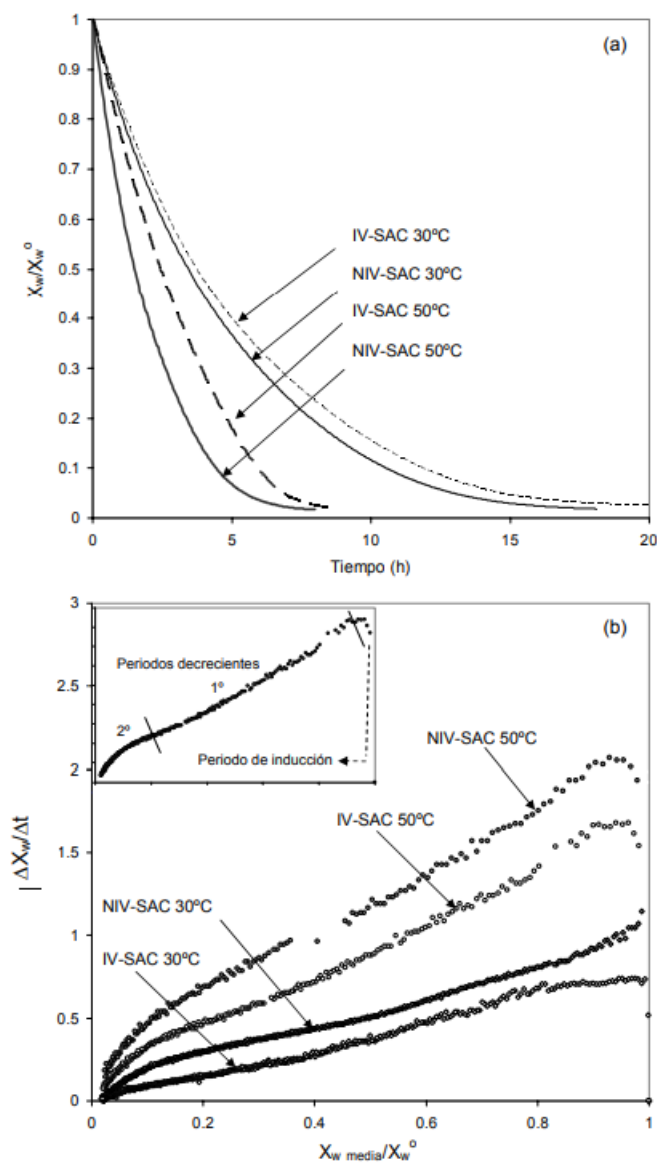
En cuanto a otro estudio, se observó un comportamiento de la curva de pérdida de masa contra tiempo en donde destacaba que la pérdida de masa está influenciada directamente por la temperatura y el empleo de temperaturas elevadas reduce el tiempo necesario para secar láminas de frutas. Para un mismo tiempo de proceso cuanto mayor es la temperatura, menor es el tiempo de secado. También que la temperatura del aire caliente desempeña un papel importante en el proceso de deshidratado ya que su valor acelera la eliminación de humedad dentro de los límites posibles. En cuanto a la curva de secado se logró observar las etapas de secado. Primero la etapa de estabilización presentada la primera hora de secado, luego la etapa de secado a velocidad constante y luego un periodo de velocidad decreciente. Por otro lado, se concluyó que, a mayor temperatura de secado, la humedad crítica aumenta y la humedad de equilibrio disminuye (Soto, 2013).

Contreras (2006) estudió el efecto de las condiciones de secado en la velocidad del proceso de secado de manzanas y fresas. Realizó diferentes corridas a diferentes condiciones, aplicando aire de secado de diferentes temperaturas y diferente combinación de pretratamientos. Realizó corridas a 30°C y 50°C y pretratamiento por impregnación a vacío, secado convectivamente y la combinación de secado convectivo y por microondas. Las curvas experimentales obtenidas del secado de manzana se asemejan a las presentadas anteriormente, en donde se puede observar el mismo comportamiento. Donde se observa que en la curva de relación humedad contra tiempo, a mayor temperatura, más acercada al eje se encuentra la curva. Por otro lado, en la curva de velocidad de secado se observa que, a mayor temperatura, mayor velocidad en un mismo tiempo. Además, muestra que el pretratamiento de impregnación conlleva una disminución de la velocidad del proceso.

En cuanto a las etapas de secado, las gráficas muestran un periodo de inducción o acople, seguido por dos periodos de velocidad decreciente. Donde no se observó etapa de velocidad constante. La primera gráfica muestra la curva de humedad contra tiempo en donde las corridas con impregnación al vacío se identifican con "IV" y las que no se impregnaron al vacío "NIV", seguido por el tipo de secado, que corresponde a secado convectivo "SAC" y con la temperatura de secado respectivo de cada corrida. Esto se observa en la Figura 22.

**Figura 22.**

Curva experimental de pérdida de humedad y velocidad de secado para manzanas con pretratamiento de impregnación al vacío



Nota: Tomado de Contreras (2006)

Siguiendo con el tema de pretratamiento de secado, Ohaco et al (2011) estudiaron el efecto de pretratamiento químico y mecánico sobre el tiempo de secado de frutos de rosa mosqueta. En todos los casos se observó una disminución significativa de tiempos de secado desde 26 hasta el 58% menos y por ende el aumento de la productividad de los equipos secado 2.38 veces. Dentro de los tratamientos químicos estudiados en este trabajo se encontró que el uso de soluciones de hidróxido de sodio no mejora significativamente el proceso de secado, pero la solución oleato de etilo reduce a la mitad el tiempo de secado, pero le confiere un olor residual al producto final muy fuerte por lo que se vuelve indeseable utilizar este método. En cuanto a los tratamientos físicos, se observó que se tiene reducciones del tiempo de secado similares a los que genera el uso de oleato de etilo, pero sin incorporar productos químicos al producto final. Por lo que resulta una mejor opción para la industria alimentaria.

Por otro lado, también se encontró en otra investigación Aredo et al. (2012) donde se compara el secado convectivo y osmótico en la pérdida de vitamina C de Aguaymanto con y sin pretratamiento con NaOH. En donde se encontró que el pretratamiento con NaOH influyó en la transferencia de masa ya que se tuvo una diferencia entre la pérdida de humedad en las muestras. Además, también se encontró que las muestras sin pretratamiento perdieron menos vitamina C. Las pérdidas de vitamina C se explican por el carácter hidrosoluble de la vitamina que se pierde por lixiviación. Y se notó que el pretratamiento con NaOH dio menor pérdida de ácido ascórbico tanto en el secado convectivo como en el osmoconvectivo. En la experimentación se halló que los tratamientos con NaOH tardaron en llegar a la humedad deseada en 440min y 600min, por secado convectivo y deshidratación osmótica, respectivamente mientras que las muestras sin tratamiento 510min y 620min respectivamente, confirmando que el pretratamiento con NaOH influye positivamente en la transferencia de masa durante el secado y mediante la disminución del tiempo de exposición al secado hay menores pérdidas de vitamina.

En otro estudio de López et al. (2013) se evaluó el efecto de diferentes pretratamientos químicos como etapa previa para el proceso de hidrólisis enzimática en yuca. Los resultados fueron que el pretratamiento con hidróxido de sodio produce la mayor liberación de azúcares durante la hidrólisis enzimática del material vegetal, obteniéndose mejores resultados al utilizar hojas y un tamaño de partícula de 0,6mm, en cuanto a la concentración de material y reactivo no se encontraron diferencias estadísticamente significativas. El NaOH causa un aumento de la superficie interna de la celulosa y disminuye el grado de polimerización y cristalinidad, lo que provoca el rompimiento de la estructura de la lignina, además remueve sustituciones de acetil y ácidos urónicos, que bajan la accesibilidad de la enzima a la superficie de la hemicelulosa y celulosa. El hidróxido de sodio, amoníaco y la cal han recibido la mayor atención como agentes de pretratamiento, debido a su bajo costo siendo un proceso económico, tanto en químicos como en el reciclado del agua, y en parte por la disminución en la dosificación de enzimas que son generalmente necesarias para convertir la celulosa en glucosa.

Los autores López y Sánchez (2018) investigaron el efecto de diferentes pretratamientos químicos en el secado de manzanas. Los pretratamientos se utilizaron para modificar las propiedades fisicoquímicas de las manzanas, lo que podría mejorar la calidad de las manzanas secas. Los resultados mostraron que los pretratamientos químicos pueden reducir el tiempo de secado, mejorar la textura y el color de las manzanas secas, y aumentar el contenido de antioxidantes. El estudio se llevó a cabo con manzanas de la variedad Golden Delicious, que fueron divididas en cuatro grupos: manzanas sin pretratamiento químico, manzanas pretratadas con ácido cítrico (1%), pretratadas con hidróxido de sodio (0,1%) y pretratadas con ácido cítrico (1%) + hidróxido de sodio (0,1%).

Los pretratamientos químicos se aplicaron durante 30 segundos a temperatura ambiente. Después del pretratamiento, las manzanas se secaron en un secador convección durante 24 horas. Los resultados del estudio mostraron que los pretratamientos químicos tuvieron un efecto significativo sobre las propiedades fisicoquímicas de las manzanas secas. Los pretratamientos químicos redujeron el tiempo de secado en un promedio de 10%. Los pretratamientos químicos también mejoraron la textura de las manzanas secas, haciéndolas más crujientes y consistentes. Además, los pretratamientos químicos aumentaron el contenido de antioxidantes de las manzanas secas, lo que podría mejorar su valor nutricional. En particular, el pretratamiento combinado con ácido cítrico e hidróxido de sodio fue el más efectivo en reducir el tiempo de secado en -14,2% y mejorar la textura 2,7% y el contenido de antioxidantes 12,5%, de las manzanas secas. Los resultados del estudio sugieren que los pretratamientos químicos pueden ser una herramienta eficaz para mejorar la calidad de las manzanas secas. Los pretratamientos químicos pueden reducir el tiempo de secado, mejorar la textura y el color de las manzanas secas, y aumentar el contenido de antioxidantes (López y Sanchez, 2018).

En cuanto al tema de eficiencias de secado para un secador de bandejas, Abughaly y Salem (2020) investigaron el efecto de la velocidad del aire en la eficiencia de un secador de bandejas para el secado de rodajas de mango. El estudio se llevó a cabo con rodajas de mango de 3 mm de espesor que se secaron a una temperatura de 60 °C y una humedad relativa del aire del 50%. Los resultados del estudio mostraron que la velocidad del aire tuvo un efecto significativo en la eficiencia del secador de bandejas. El tiempo de secado se redujo a medida que aumentaba la velocidad del aire. Por ejemplo, el tiempo de secado se redujo de 12 horas a

8 horas cuando la velocidad del aire se aumentó de 0,5 m/s a 1,5 m/s. La eficiencia del secador de bandejas también se evaluó en términos de la tasa de secado, que es la cantidad de agua que se elimina del producto por unidad de tiempo. Los resultados mostraron que la tasa de secado también aumentó a medida que aumentaba la velocidad del aire. Los autores concluyeron que la velocidad del aire es un factor importante que afecta la eficiencia del secador de bandejas para el secado de rodajas de mango. La velocidad del aire debe ser optimizada para obtener un tiempo de secado más corto y una mayor eficiencia del secador.

Según el artículo de López y Sánchez (2020), la eficiencia de secado del secador de bandejas puede variar entre el 20% y el 50%, dependiendo de los factores del proceso de secado, como la temperatura del aire, la humedad relativa del aire, la velocidad del aire, y el tamaño y la forma del producto. En general, la eficiencia del secador de bandejas se puede aumentar optimizando estos factores. Por ejemplo, aumentar la temperatura del aire puede mejorar la transferencia de calor y humedad, lo que puede reducir el tiempo de secado y aumentar la eficiencia del secador. Sin embargo, aumentar la temperatura del aire también puede conducir a una pérdida de nutrientes. Reducir la humedad relativa del aire puede ayudar a prevenir el deterioro del producto durante el secado. El tamaño y la forma del producto también pueden afectar la eficiencia del secador de bandejas. Por ejemplo, los productos pequeños y de forma uniforme se secan más uniformemente que los productos grandes y de forma irregular. Los secadores de bandejas con mayor eficiencia de secado pueden producir productos secos de mayor calidad con un menor consumo de energía.

En cuanto a la eficiencia energética, Cárdenas y Rodríguez (2018) investigó la eficiencia energética de los secadores de bandejas. El estudio se llevó a cabo con secadores de bandejas comerciales que se utilizaron para secar ciruelas. Los resultados del estudio mostraron que la eficiencia energética del secador de bandejas varió entre el 25% y el 40%, dependiendo de los factores del proceso de secado, como la temperatura del aire, la humedad relativa del aire, la velocidad del aire, y el tamaño y la forma del producto. Los autores encontraron que la eficiencia energética del secador de bandejas se puede aumentar utilizando un sistema de control automático para regular la temperatura y la humedad del aire. Los sistemas de control automático pueden ayudar a optimizar los parámetros del proceso de secado, lo que puede conducir a una reducción en el tiempo de secado y un aumento en la eficiencia energética del secador. Los autores concluyeron que los secadores de bandejas con mayor eficiencia energética pueden ayudar a reducir los costos operativos y contribuir a la sostenibilidad ambiental.

Para la propuesta de línea de producción de manzana deshidratada, Fernández et al. (2022) presentan una propuesta de línea de producción de manzana deshidratada. La propuesta incluye las siguientes etapas: Recepción y clasificación de la materia prima, las manzanas se reciben en la planta y se clasifican según su tamaño, color y condición. Pretratamiento: Las manzanas se lavan, se pelan y se cortan en rodajas. Secado: Las manzanas se secan en un secador de convección a una temperatura de 60 °C y una humedad relativa del aire del 50%. Empaque: Las manzanas deshidratadas se empacan en bolsas de plástico o cartón. Almacenamiento: Las manzanas deshidratadas se almacenan en condiciones adecuadas para garantizar su calidad. La propuesta se basa en un análisis de los factores que afectan la calidad de las manzanas deshidratadas, como el tipo de manzana, el tamaño de las rodajas, la temperatura y la humedad del aire. Los autores encontraron que el secado por convección es la tecnología más adecuada para el secado de manzanas deshidratadas, ya que permite obtener un producto de alta calidad.

## VI. Metodología

### A. Descripción

Los pasos generales de este trabajo se describirán brevemente y posteriormente se detallará el proceso a seguir para cada uno de los pasos. El secador es un deshidratador semiindustrial ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, realizar durante la mañana y a condiciones atmosféricas, en la Ciudad de Guatemala.

1. Realizar una caracterización de la materia prima para determinar las características fisicoquímicas de la manzana previas al secado y realizar la misma evaluación al final del secado para comparar resultados previos y posteriores del tratamiento.
2. Realizar el secado de manzanas sin pretratamiento a 3 diferentes temperaturas citadas en literatura para evaluar la eficiencia de secado de manzana a distintas temperaturas y realizar el secado de manzanas pretratadas a la temperatura con mejor tiempo de secado se obtenga.
3. Realizar el secado de manzanas utilizando dos tratamientos, el pretratamiento químico y el pretratamiento mecánico.
4. En cuanto al tratamiento de los datos, realizar las pruebas en cuadruplicado y realizar análisis estadístico descriptivo utilizando pruebas de hipótesis y ANOVA, dependiendo del caso para compararlo con los valores experimentales o entre los mismos resultados.
5. Recolectar los datos en hojas de Excel y hacer el análisis en dichas hojas.

Los aspectos por evaluar serán los siguientes: Selección de materia prima, Caracterización de materia prima, Pretratamiento de materia prima, Secado de manzanas y Determinación de curva de secado para manzanas, determinación de velocidad de secado para todos los tratamientos, balances de materia y energía y propuesta de línea de producción.

#### 1. Selección de materia prima

- 1.1 Buscar uniformidad en la muestra de manzanas. Por ello para cada corrida de secado comprar una libra de manzanas tipo gala importada del supermercado el día anterior para asegurar la frescura de la fruta.
- 1.2 Buscar manzanas de diámetros similares para evitar variación en el área superficial de la rodaja de manzana.
- 1.3 Buscar que las frutas sean de un mismo lote y de un mismo color.
- 1.4 Lavar y secar las manzanas seleccionadas que serán utilizadas para las corridas. Utilizando una solución de jabón y agua, posteriormente secar las manzanas para evitar aumentar la cantidad de agua de la manzana.

#### 2. Caracterización de materia prima

Para todas las manzanas:

- 2.1 Buscar uniformidad en la muestra de manzanas. Por ello para cada corrida de secado comprar una libra de manzanas tipo gala importada del supermercado el día anterior para asegurar la frescura de la fruta.
- 2.2 Medir el diámetro ecuatorial y polar de la fruta utilizando un vernier digital marca TRUPER y cortar la manzana por la mitad para medir el diámetro interno.

Posteriormente se realizarán las pruebas de características fisicoquímicas:

- 2.3 Masa: realizar la medición de la masa de la muestra de las manzanas frescas y de las manzanas peladas y descorazonadas.

Relación de radios: medir el diámetro de mayor y el diámetro menor de la manzana, Según Parra et al. (1998) se describe por la Ecuación 7.

$$\text{Relación} = \frac{\text{Diámetro mayor}}{\text{Diámetro menor}} \quad (7)$$

- 2.4 Jugosidad: Extraer el jugo de 4 manzanas, peladas y descorazonadas con una licuadora de mesa y se expresará el resultado de la siguiente forma. Según Sepiel et al. (2009) se describe por la Ecuación 8.

$$\text{Jugosidad} = \frac{\text{masa de jugo extraído}}{\text{masa de pulpa}} \quad (8)$$

- 2.5 Sólidos solubles: se debe medir por medio del uso de un refractómetro de mano de Brix. Colocar una muestra de jugo dentro del lente de medición. Realizar la medición por medio de observar los grados Brix marcados colocando el lente a contraluz (Seipel et al., 2009).
- 2.6 Medición de pH: utilizar un potenciómetro para medir el pH de la pulpa en forma de puré (Seipel et al., 2009).
- 2.7 Acidez titulable: Realizar una titulación potenciométrica con hidróxido de sodio 0.1 N. Se toma 5-15 gramos de jugo, adicionar dos gotas de fenolftaleína como indicador y se titula con la solución de hidróxido de sodio. Verificar el cambio de color natural del jugo del fruto a color violeta, suspendiendo la titulación y tomando el dato de NAOH utilizado. Según Sepiel et al. (2009) el contenido de ácido se determina por la Ecuación 9.

$$\text{Porcentaje de ácido} = \frac{\text{Vol NaOH utilizado} * \text{Normalidad solución} * \text{Factor ácido málico}}{\text{Peso de la muestra}} * 100 \quad (9)$$

Tomar en cuenta que el factor de ácido málico corresponde a 0.067. el volumen de NaOH debe estar expresado en mililitros y que la masa de muestra debe ser expresado en gramos.

- 2.8 Realizar también pruebas de microbiología para determinar la presencia de microorganismos en la manzana siguiendo la metodología expuesta por el RTCA para la fruta deshidratada y para la fruta fresca. Realizar prueba de presencia de *Escherichia coli* y para *Salmonella spp.* Tomando en cuenta los siguientes criterios:

### Figura 23.

Criterios de inocuidad para frutas frescas y deshidratadas por la RTCA

<b>4.1.1. Subgrupo del alimento: enteros empacados.</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Categoría</b>	<b>Tipo de riesgo</b>	<b>Límite Permitido</b>
<i>Salmonella spp</i>	10	C	Ausencia/25 g
<i>Escherichia coli O157:H7</i>	10		Ausencia/25g

<b>4.2.2. Subgrupo del alimento: Frutas y vegetales desecados o deshidratados.</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Categoría</b>	<b>Tipo de riesgo</b>	<b>Límite Permitido</b>
<i>Escherichia coli</i>	6	B	10 <sup>2</sup> UFC/g
<i>Salmonella spp</i>	10		Ausencia/25 g

Nota: Tomado de RTCA, 2017.

### 3. Cortado de rodajas de manzana

- 3.1 Como primer paso lavar y secar las manzanas a utilizar.
- 3.2 Realizar el cortado de rodajas de manzana sin pelar, esto con ayuda de una mandolina ajustable.
- 3.3 Medir el grosor de las muestras utilizando un vernier digital marca TRUPER asegurando que el grosor sea el mismo para cada rodaja. Procurando que este proceso se realice lo más próximo a el secado o al pretratamiento según sea el caso, esto para evitar la oxidación de la fruta por el contacto con el oxígeno presente en el aire.
- 3.4 También tomar 9 rodajas que serán utilizadas como muestra para la elaboración de la curva de secado. Medir grosor en tres diferentes puntos de la rodaja, medir diámetro mayor y menor de cada rodaja y determinar la masa inicial de cada una de las muestras.
- 3.5 También, tomar el valor de masa de la manzana cortada total para comparar la pérdida de masa total.

#### **4. *Pretratamiento de secado de materia prima***

Para el pretratamiento de la materia prima se dividirá en dos métodos. Seguir los pasos correspondientes al método a realizar.

##### ***Método químico***

- Preparar una solución de concentración de 0.1 N de hidróxido de sodio.
- Se debe colocar una bandeja metálica empacada de tal forma que no permita el paso de la solución, por lo que se envolvió en papel encerado asegurándose que permitirá colocar la solución en dicha bandeja.
- Luego lavar adecuadamente una bandeja perforada metálica para colocar las rodajas sobre ellas y sumergirlas en la solución por 30 segundos.
- Asegurarse que las rodajas tengan un contacto adecuado con la solución por ambas caras.
- Luego escurrir la bandeja con las rodajas pretratadas y lavarlas con agua destilada utilizando una piseta.
- Por último, colocar una cama de papel absorbente para eliminar el exceso de humedad en las rodajas (Ohaco et al., 2011).

##### ***Método mecánico***

- Realizar cortes en la cutícula superficial de los frutos. Esto se realiza con ayuda de la mandolina ya que contaba con cuchillas especiales para dejar un daño superficial en la rodaja.
- Tomar en cuenta que las cuchillas están separadas por 0.1 cm y para la altura del daño debe ser de 1 mm (Ohaco et al., 2011).

#### **5. *Arranque del secador de bandejas***

- 5.1 En cuanto al arranque del equipo se debe encender por medio del switch on/off.
- 5.2 Al presionarlo se debe encender una luz verde, se debe elegir el set point en la pantalla digital y se selecciona las temperaturas con las que se utilizará el secador.
- 5.3 Se deben prender los ventiladores de extracción como los de recirculación. Y en ese momento se iluminarán las dos luces amarillas.
- 5.4 Se enciende las tres resistencias con ayuda de los interruptores on/off. En este momento se encenderán las 3 luces rojas.
- 5.5 Se deberá dejar calentando el secador por 15-20 minutos antes de comenzar el secado. Esto para contar con un secado uniforme con las bandejas y el secador precalentados.
- 5.6 Medir la velocidad, la temperatura y la humedad del aire entrante al secador para posteriores cálculos.
- 5.7 Se debe colocar las termocuplas a 5 cm de la superficie de las bandejas.

#### **6. *Proceso de secado***

- 6.1 Medir la humedad inicial de una de las rodajas a muestrear y se pesará individualmente cada rodaja y se enumerará en la bandeja.
- 6.2 Se debe medir el consumo energético con el multímetro y se debe tomar el tiempo de secado al ingresar las bandejas al secador.
- 6.3 Durante el proceso de secado: se debe tomar la temperatura y humedad del aire en la salida y también las temperaturas dentro del horno. Esto se debe hacer cada vez que se tome una muestra para pesarla.
- 6.4 Durante los primeros 20 minutos, se debe tomar muestra cada 10 minutos de cada rodaja a muestrear para pesarla durante la primera hora.
- 6.5 Luego se tomará cada 15 minutos dos veces y luego se tomará cada 30 minutos hasta llegar al porcentaje de humedad no varíe en 3 diferentes muestras.
- 6.6 Luego apagar el equipo.
- 6.7 Recolectar la información en una hoja de cálculo de Excel y se tomará fotografías para evidencia de resultados.

## 7. Curva de secado

Para realizar la curva de secado se debe realizar lo siguiente:

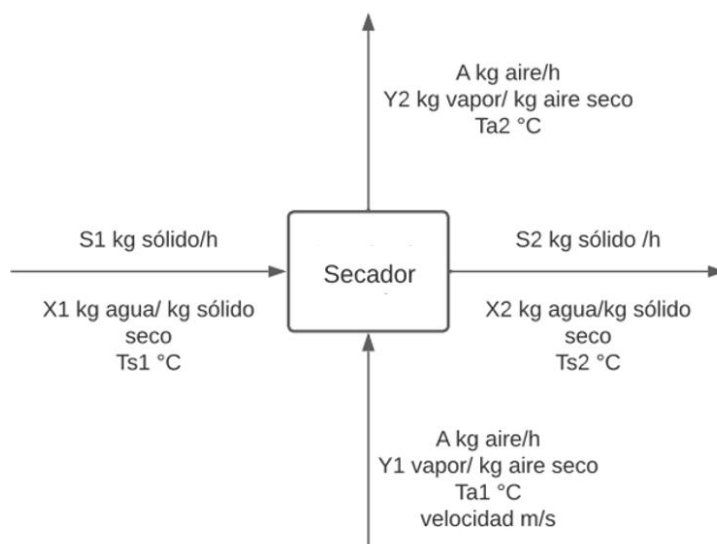
- 7.1 Obtener la humedad base seca utilizando los datos experimentales de masas respecto al tiempo. Utilizando las humedades e iniciales obtenidas de las muestras.
- 7.2 Obtener la relación de sólido seco y el área superficial de cada muestra.
- 7.3 Obtener el flux de secado o velocidad de secado utilizando la relación calculada anteriormente, la base seca y el intervalo de tiempo en cada una de las mediciones.
- 7.4 Graficar el flux de secado contra la humedad en base seca.

## 8. Balance de masa y energía de secado experimentales

Para los balances de masa y energía, utilizar las ecuaciones descritas a continuación para las corridas experimentales en las figuras correspondientes.

### Figura 24.

Balance de masa general de secado de sólidos húmedos



Nota: Elaboración propia

Tomar en cuenta que para el balance de masa del secador se debe tomar en cuenta la Ecuación 10 donde se especifica a continuación:

Entradas=Salidas

$$S_1 \cdot X_1 + A \cdot Y_1 = S_2 \cdot X_2 + A \cdot Y_2 \quad (10)$$

Donde:

S: Flujo másico del sólido húmedo en kg/h

X: humedad base seca del sólido en kg de agua/kg de sólido seco

A: Flujo másico del aire utilizado en kg/h

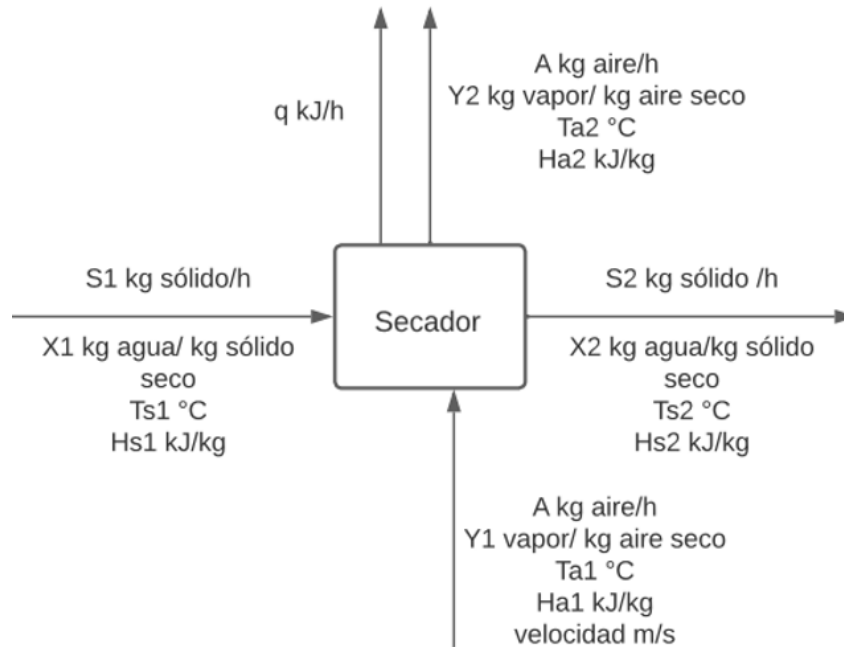
Y: Humedad base seca del aire en kg de vapor/kg de aire seco

Ta: Temperatura del aire en °C

Ts: Temperatura del sólido en °C

**Figura 25.**

Diagrama de balance de energía de secado de sólidos húmedos



Nota: Elaboración propia

Tomar en cuenta que para el balance de energía del secador se debe tomar en cuenta la Ecuación 11 donde se especifica a continuación:

Entradas=Salidas

$$A \cdot H_{a1} + S_1 \cdot H_{s1} = A \cdot H_{a2} + S_2 \cdot H_{s2} + Q_{\text{perdido}} \quad (11)$$

Donde:

$Q_{\text{perdido}}$ : pérdida de energía térmica por el sistema de secado en kJ/h

$H_a$ : Entalpía del aire en kJ/kg de aire seco

$H_s$ : Entalpía del sólido en kJ/kg de sólido seco

También se debe calcular la entalpía del aire a cualquier temperatura por medio de la Ecuación 10 que se describe de la siguiente forma:

$$H_a = c_s(T_a - T_0) + Y \cdot H_l$$

Donde:

$c_s$ : Calor húmedo del aire en kJ/kg de aire seco\*°C

$H_l$ : calor latente de vaporización del agua en kJ/kg agua

Se debe calcular el calor húmedo del aire por medio de la Ecuación 11:

$$c_s = 1.005 + 1.88Y$$

Y para finalizar el balance se debe calcular la entalpía de un sólido a cualquier temperatura, ya sea inicial o final por medio de la Ecuación 12:

$$H_s = C_{ps}(T_s - T_0) + X * C_p(T_s - T_0) \quad (12)$$

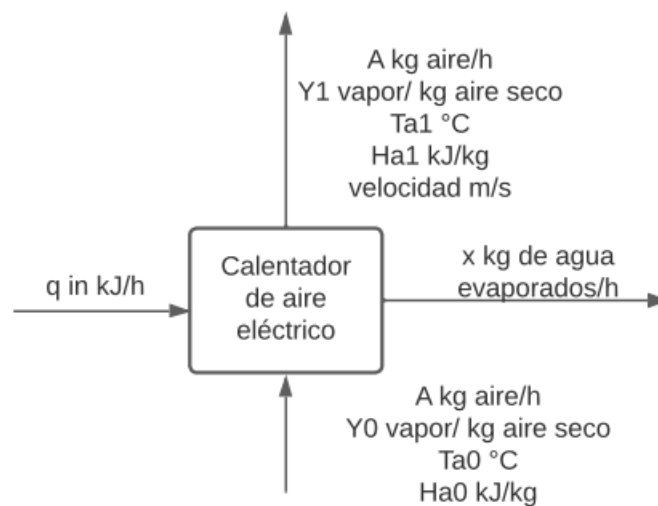
Donde:

$C_{ps}$ : calor específico del sólido en kJ/kg sólido\*°C

$C_p$ : Calor específico del agua en kJ/kg agua\*°C

**Figura 26.**

*Balance de masa y energía de calentador eléctrico secador*



*Nota:* Elaboración propia

Para el balance de masa del calentador eléctrico de aire se debe tomar en cuenta la Ecuación 15 que se describe a continuación:

$$\begin{aligned} & \text{Entradas} = \text{Salidas} \\ & A * Y_1 - A * Y_0 = x \frac{\text{kg agua evaporados}}{h} \quad (15) \end{aligned}$$

Adicional se debe tomar en cuenta el balance de energía del calentado eléctrico de aire que se describe por la Ecuación 16:

$$Q_{in} = A * C_{p_a} * (T_{a1} - T_{a0}) \quad (16)$$

Donde:

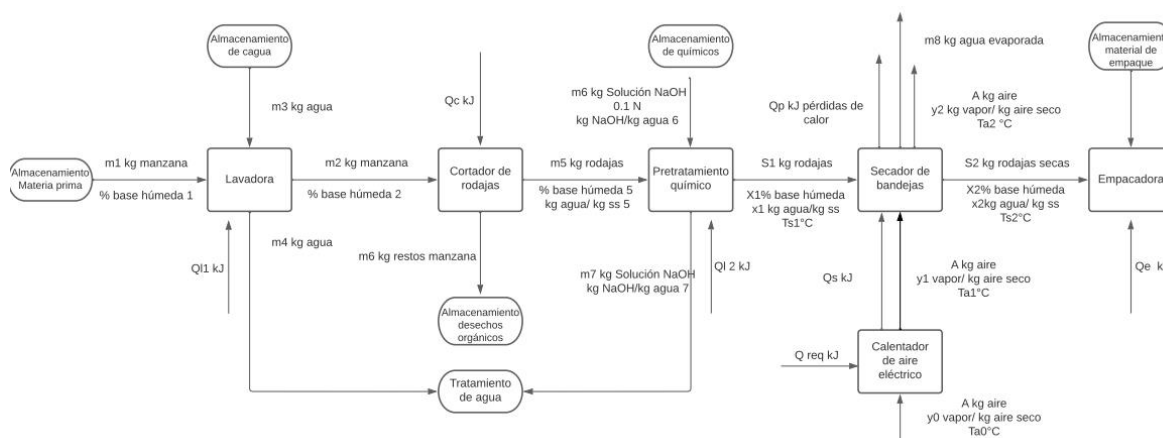
$Q_{in}$ : calor necesario para calentar el aire en kJ/h

Cpa: capacidad calorífica del aire en kJ/kg K

## 9. Diagrama de línea de producción

**Figura 27.**

Diagrama de bloques de línea de producción de snacks por lotes



Nota: Elaboración propia

Las ecuaciones del balance de masa y energía se encuentran en el apartado 8.

## B. Fundamento estadístico

En cuanto al análisis de datos, realizar pruebas ANOVA donde se comparará las medias de datos dependiendo sea el caso. Para este trabajo se utilizó un valor de alfa de 0.1 y se realizó la prueba por medio de la hoja de cálculo de Excel. Para la comparación de para medias de porcentaje de pérdida de masa en 6 muestras de cada secado a diferentes temperaturas se debe realizar la prueba en la forma que se indica en la Tabla 2.

**Tabla 2.**

Análisis ANOVA para la comparación de medias de porcentaje de pérdida de masa a diferentes temperaturas

Aspecto para evaluar	Hipótesis
Diferencia entre el porcentaje de pérdida total de masa de las 6 muestras de cada secado a las diferentes temperaturas 55, 60 y 65°C	Las medias de porcentaje de pérdida de masa de las tres temperaturas son iguales $\mu_{55} = \mu_{60} = \mu_{65}$
Diferencia de medias entre el porcentaje de masa de las 6 muestras de los secados a 55 y 60°C	Las medias de humedades base seca de las temperaturas son iguales $\mu_{55} = \mu_{60}$
Diferencia de medias entre el porcentaje de masa de las 6 muestras de los secados a 60 y 65°C	Las medias de humedades base seca de las temperaturas son iguales $\mu_{60} = \mu_{65}$
Diferencia de medias entre el porcentaje de masa de las 6 muestras de los secados a 55 y 65°C	Las medias de humedades base seca de las temperaturas son iguales $\mu_{55} = \mu_{65}$

Nota: Elaboración propia.

Para la comparación de medias de porcentaje de pérdida de masa en 6 muestras de cada secado a diferentes pretratamientos se debe realizar la prueba en la forma que se indica en la Tabla 3.

**Tabla 3.**

*Análisis ANOVA para la comparación de medias de porcentaje de pérdida de masa a diferentes pretratamientos*

<b>Aspecto para evaluar</b>	<b>Hipótesis</b>
Diferencia entre el porcentaje de pérdida total de masa de las 6 muestras de cada secado con pretratamiento químico, mecánico y sin pretratamiento.	Las medias de porcentaje de pérdida de masa de los tres secados son iguales $\mu_{PQ} = \mu_{PM} = \mu_{SP}$
Diferencia de medias entre el porcentaje de masa de las 6 muestras de los secados sin pretratamiento y con pretratamiento mecánico	Las medias de humedades base seca de las temperaturas son iguales $\mu_{SP} = \mu_{PM}$
Diferencia de medias entre el porcentaje de masa de las 6 muestras de los secados con pretratamiento mecánico y químico	Las medias de humedades base seca de las temperaturas son iguales $\mu_{PM} = \mu_{PQ}$
Diferencia de medias entre el porcentaje de masa de las 6 muestras de los secados sin pretratamiento y pretratamiento químico	Las medias de humedades base seca de las temperaturas son iguales $\mu_{SP} = \mu_{PM}$

*Nota:* Elaboración propia.

Por otro lado, cabe resaltar que las curvas de secado y las curvas de pérdida de humedad se debe tener promedios de los datos de las 6 muestras analizadas durante cada corrida. Además, se debe utilizar 6 muestras ya corresponde al 20% de las muestras totales debido a que por cada manzana se tenía alrededor de 30 rodajas. Además, las curvas se analizaron de forma visual y analítica.

## VII. Resultados

Como parte de la evaluación del efecto del pretratamiento de snacks de manzana por los diferentes métodos (químico y mecánico) fue necesario conocer las condiciones y características de la materia prima, la manzana gala, por lo que se analizaron 13 aspectos de la materia prima y se obtuvieron los resultados indicados en la Tabla 4.

**Tabla 4.**  
*Resultados de caracterización de materia prima de manzana gala*

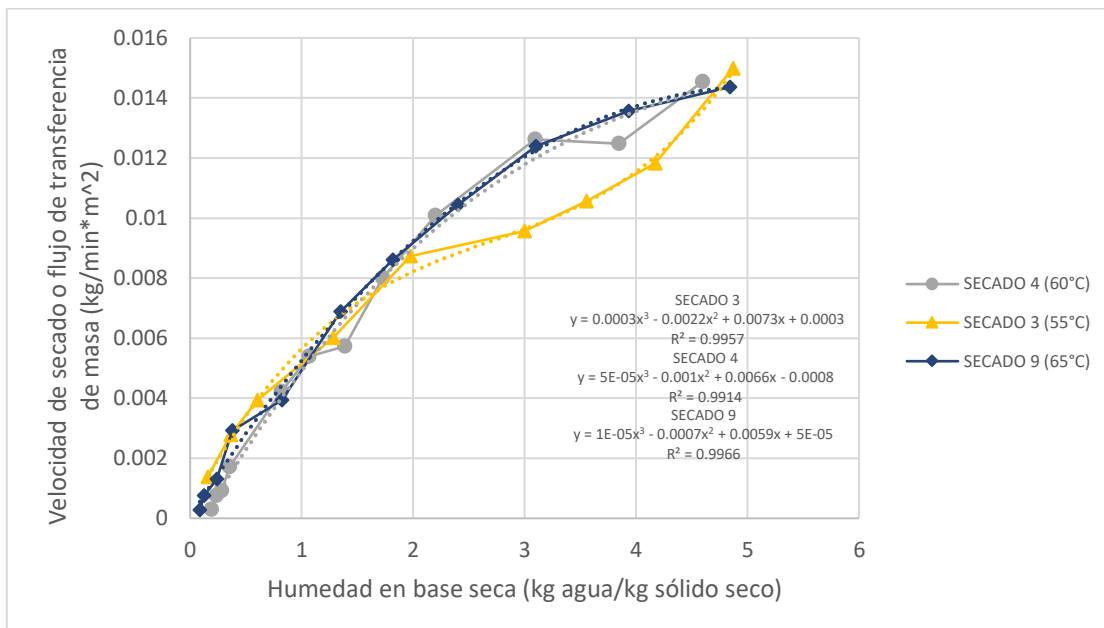
Aspecto	Promedio	Propagación de error ( $\pm$ )	Desviación estándar ( $\pm$ )	Conformidad con norma
Masa de manzana fresca	180.1 g	0.12 g	8.71 g	-
Diámetro ecuatorial de manzana fresca	74.30 mm	0.01 mm	1.74 mm	-
Diámetro polar	67.97 mm	0.01 mm	3.01 mm	-
Masa manzanas descorazonadas y peladas	137.1 g	0.10 g	8.74 g	-
Relación de diámetros	1.15	$1.76 \times 10^{-4}$	0.12	-
Jugosidad	0.41 g/g	$0.8 \times 10^{-3}$ g/g	0.06 g/g	-
Jugo extraído por manzana	51 mL	1.0 mL	2.6 mL	-
Sólidos solubles (grados Brix)	13.62°	0.10°	1.11°	Dentro de parámetros de norma NMX-045-1982
pH jugo de manzana	3.72	0.01	0.01	Dentro de parámetros de norma NMX-045-1982
Acidez titulable (% ácido málico)	0.48%	0.01%	0.03%	Dentro de parámetros de norma NMX-045-1982
<i>Escheriachia coli</i>	Ausente	-	-	Dentro de parámetros de norma RTCA 67.0450:17, 2017
<i>Salmonella spp</i>	Ausente	-	-	Dentro de parámetros de norma RTCA 67.0450:17, 2017

*Nota:* Se realizó el análisis a temperatura de 24.3°C y presión de 1.0 atm en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, los datos originales se encuentran en las tablas 14-24, los datos calculados donde se tiene la descripción de las 4 corridas para los aspectos que requerían cálculos se encuentran en las tablas 109-111. Elaboración propia.

Tomando en cuenta que se tenía el objetivo de aumentar la eficiencia de secado, se realizó un análisis del comportamiento del secado a diferentes temperaturas 55, 60 y 65° la cuales fueron las que más se repitieron en la bibliografía para el secado de manzana. A partir de los datos experimentales se obtuvo la curva de secado y la curva de pérdida de humedad respecto al tiempo, con el fin de poder comparar los resultados de las corridas a diferentes temperaturas. Esto se observa en la Figura 28 y 29. Donde se observa el comportamiento de las corridas de forma gráfica y en la Tabla 5 se indica la diferencia de eficiencia de secado y eficiencia energética de cada temperatura de operación.

**Figura 28.**

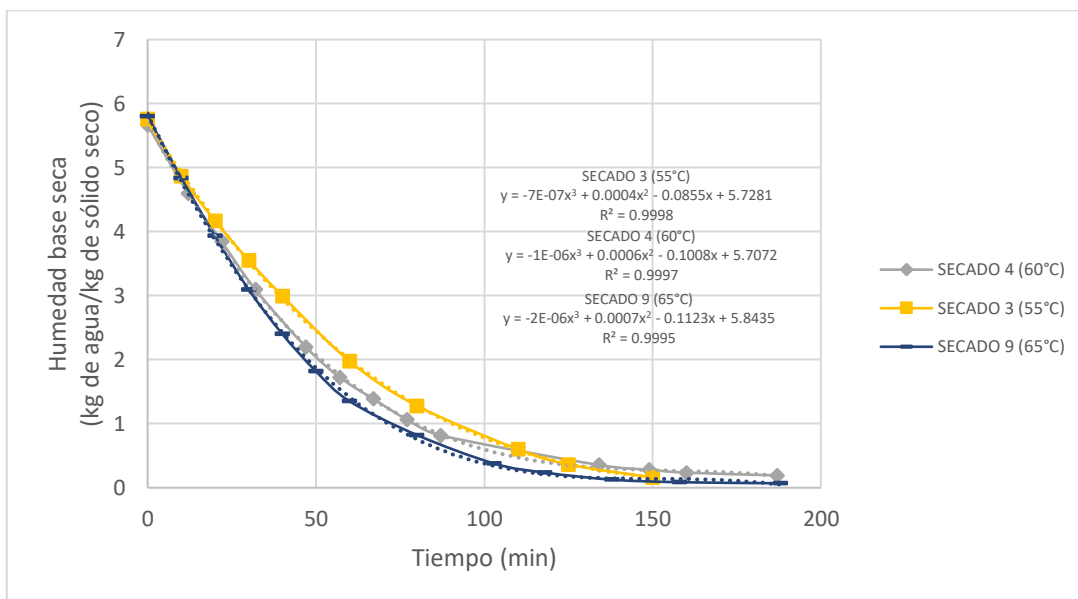
Curvas de secado de manzana Gala a temperatura de 55, 60, 65°C en operación a presión atmosférica utilizando secador de bandejas



*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la tabla 117 y 118 para el secado 3, 126 y 127 para el secado 4 y 171 y 172 para el secado 9. Graficando los promedios de las 6 muestras de las corridas. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación; respectivamente para cada corrida. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 20.5°C secado 3, 20.5°C secado 4 y 24.3°C secado 9. Elaboración propia.

**Figura 29.**

Curva de pérdida de humedad respecto al tiempo a diferentes temperaturas



*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 117 para el secado 3, 126 para el secado 4 y 171 para el secado 9. Graficando los promedios de las 6 muestras de las corridas. La línea punteada corresponde a la

regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación; respectivamente para cada corrida. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 20.5°C secado 3, 20.5°C secado 4 y 24.3°C secado 9. Elaboración propia.

**Tabla 5.**

*Eficiencia de secado, consumo de energía por calentamiento de aire y eficiencia energética de secado a diferentes temperaturas*

Secado No.	Eficiencia de secado	Consumo de calentamiento	de	Eficiencia energética
3 (55°C)	5.50±0.03%	84.78±0.44%		15.22±0.07%
4 (60°C)	9.30±0.04%	89.70±0.45%		15.30±0.07%
9 (65°C)	12.65±0.04%	84.17±0.37%		15.83±0.05%

*Nota:* Los datos calculados se encuentran en la Tabla 120 para el secado 3, 129 para el secado 4 y 174 para el secado 9. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 20.5°C secado 3, 20.5°C secado 4 y 24.3°C secado 9. Elaboración propia.

Tomando en cuenta los resultados anteriores, se planteó la comparación entre los resultados por medio de un análisis ANOVA para determinar si se contaba con diferencia significativa entre las medias de pérdida de masa en las corridas a diferentes temperaturas como se indica en la Tabla 6.

**Tabla 6.**

*Prueba ANOVA para medias de porcentaje de pérdida de masa en 6 muestras de cada secado a diferentes temperaturas utilizando alfa 0.1*

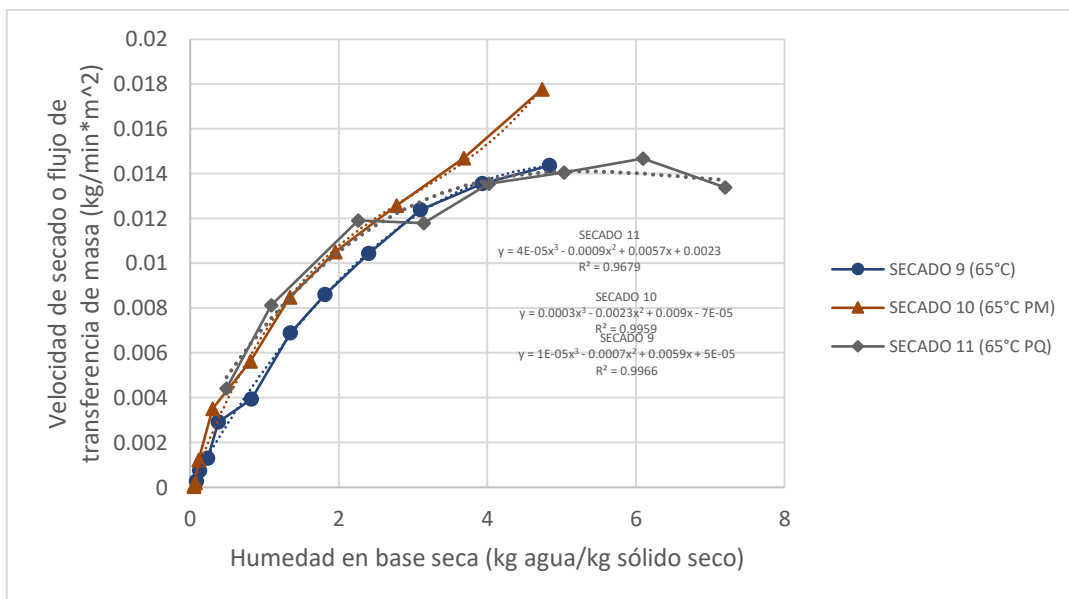
Aspecto evaluado	F crítico	F	Conclusión
Diferencia entre el porcentaje de pérdida total de masa de las 6 muestras de cada secado a las diferentes temperaturas 55, 60 y 65°C	2.6951	5.3429	Se rechaza la hipótesis planteada, existe diferencia significativa
Diferencia de medias entre el porcentaje de masa de las 6 muestras de los secados a 55 y 60°C	3.2850	0.1557	Se acepta la hipótesis planteada
Diferencia de medias entre el porcentaje de masa de las 6 muestras de los secados a 60 y 65°C	3.2850	20.9294	Se rechaza la hipótesis planteada, existe diferencia significativa
Diferencia de medias entre el porcentaje de masa de las 6 muestras de los secados a 55 y 65°C	3.2850	6.1750	Se rechaza la hipótesis planteada, existe diferencia significativa

*Nota:* Los datos utilizados para la prueba se encuentran en la Tabla 195, los datos originales de cada corrida corresponden al Tabla 42 para el secado 3 (55°C), Tabla 50 para el secado 4 (60°C) y 90 para el secado 9 (65°C). Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 20.5°C secado 3, 20.5°C secado 4 y 24.3°C secado 9. Elaboración propia.

Tomando en cuenta los resultados anteriores, se procedió a realizar el pretratamiento de la manzana por método mecánico, por cortes longitudinales en la fruta y por el método químico por medio de una solución de hidróxido de sodio 0.1N y los datos experimentales se utilizaron para modelar el comportamiento del secado en la curva de secado y la curva de pérdida de humedad que se muestra en la Figura 30 y 31. Así como los resultados de la eficiencia de secado y energética indicadas en la Tabla 7.

**Figura 30.**

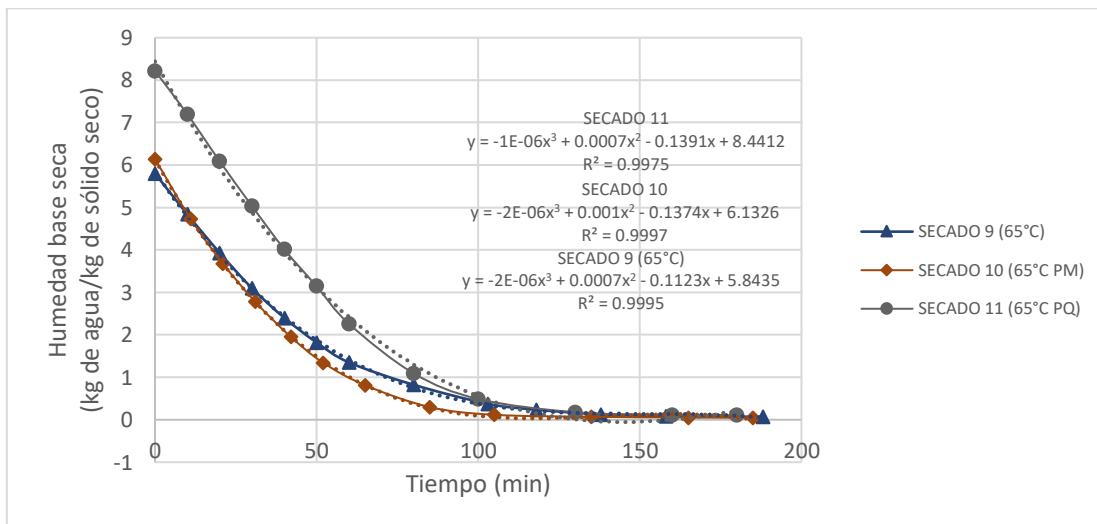
Curva de secado de rodajas de manzana Gala sin pretratamiento y con pretratamiento químico y mecánico



*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 171 y 172 para el secado 9, 180 y 181 para el secado 10 y 189 y 190 para el secado 11. Graficando los promedios de las 6 muestras de las corridas. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación; respectivamente para cada corrida. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C secado 9, 24.3°C secado 10 y 23.8°C secado 11. Elaboración propia.

**Figura 31.**

Curva de pérdida de humedad de manzana Gala con y sin pretratamiento mecánico y químico



*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 171 para el secado 9, 180 para el secado 10 y 189 para el secado 11. Graficando los promedios de las 6 muestras de las corridas. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación; respectivamente para cada corrida. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C secado 9, 24.3°C secado 10 y 23.8°C secado 11. Elaboración propia.

**Tabla 7.**

*Eficiencia de secado, consumo de energía por calentamiento de aire y eficiencia energética de secado a diferentes condiciones*

Secado No.	Pretratamiento	Eficiencia de secado	Consumo de calentamiento	Eficiencia energética
9	No	12.97±0.04%	86.28±0.38%	13.72±0.05%
10	Mecánico	15.91±0.05%	82.20±0.36%	17.80±0.06%
11	Químico	17.04±0.05%	81.10±0.36%	18.90±0.07%

*Nota:* Los datos calculados se encuentran en la Tabla 174 para el secado 9, 183 para el secado 10 y 192 para el secado 11. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C secado 9, 24.3°C secado 10 y 23.8°C secado 11. Elaboración propia.

Tomando en cuenta los resultados anteriores, se planteó la comparación entre los resultados por medio de un análisis ANOVA para determinar si se contaba con diferencia significativa entre las medias de pérdida de masa en las corridas con pretratamiento y sin pretratamiento como se indica en la Tabla 8. Y también se realizó una comparación de las características físicas de las rodajas que se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 8.**

*Prueba ANOVA para medias de porcentaje de pérdida de masa en 6 muestras de cada secado con y sin pretratamiento utilizando alfa 0.1*

Aspecto evaluado	F crítico	F	Conclusión
Diferencia entre el porcentaje de pérdida total de masa de las 6 muestras de cada secado con pretratamiento químico, mecánico y sin pretratamiento.	2.6951	131.78	Se rechaza la hipótesis planteada, existe diferencia significativa
Diferencia de medias entre el porcentaje de masa de las 6 muestras de los secados sin pretratamiento y con pretratamiento mecánico	3.2850	84.84	Se rechaza la hipótesis planteada, existe diferencia significativa
Diferencia de medias entre el porcentaje de masa de las 6 muestras de los secados con pretratamiento mecánico y químico	3.2850	168.05	Se rechaza la hipótesis planteada, existe diferencia significativa
Diferencia de medias entre el porcentaje de masa de las 6 muestras de los secados sin pretratamiento y pretratamiento químico	3.2850	557.40	Se rechaza la hipótesis planteada, existe diferencia significativa

*Nota:* Los datos utilizados para la prueba se encuentran en la Tabla 200, los datos originales de cada corrida corresponden a la Tabla 42 para el secado 9 (65°C), Tabla 50 para el secado 4 (60°C) y 90 para el secado 9 (65°C). Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 20.5°C secado 3, 20.5°C secado 4 y 24.3°C secado 9. Elaboración propia.

**Tabla 9.**

*Comparación de resultado características físicas de rodajas secadas a diferentes pretratamientos*

No. Secado	Pretratamiento	Aspecto de superficie de rodaja	Color de rodaja	Textura
9	No	Superficie lisa con deformaciones del secado	Blanca-amarillenta con el centro o parte del corazón con de color amarillento	Textura lisa y porosa en ciertos puntos. La cáscara tiene una textura más dura que la pulpa. La rodaja es flexible
10	Mecánico	Superficie pardeada por el daño mecánico realizado en la superficie.	Blanca con líneas de color amarillentas y centro de color más notorio que el resto de la rodaja	Textura rugosa, semejante al secado sin pretratamiento, pero con algunas grietas en la superficie. La cáscara

		Deformaciones por secado		tiene una textura más dura que la pulpa. La rodaja es flexible
11	Químico	Superficie lisa con deformaciones del secado y con líneas semejantes a venas en la superficie	Amarillento-marrón con líneas tipo venas de un color marrón	Textura lisa y uniforme. La superficie se siente menos gruesa que los otros secados. La cáscara tiene una textura más dura que la pulpa. La rodaja se quebranta

*Nota:* Se realizó un análisis cualitativo de las rodajas de manzana secadas por cada uno de los tratamientos y se comparó con la corrida 9, a la que no se le realizó pretratamiento. Las rodajas se pueden observar en la figura 83. Elaboración propia.

Tomando en cuenta los resultados anteriores, se planteó la línea de producción de snacks de manzana en sobres de 10 gramos y se realizó el escalamiento y modelado de la línea de producción obteniendo así los balances de masa y energía descritos en la Tabla 10 y 11.

**Tabla 10.**

*Balance de masa para línea de producción de sobres de 10 gramos de snacks por lote de producción*

Entrada/Salida	Equipo	Aspecto	Masa (kg)	Temperatura (°C)	Humedad relativa	Humedad en base seca (kg de agua/kg base seca)
Entrada	lavadora	Manzanas	4.00		85.00%	5.803
Salida	lavadora	Manzanas	4.06		86.50%	6.14
Entrada	lavadora	Agua	230.00			
Salida	lavadora	Agua	229.94			
Entrada	Cortador de rodajas	Manzanas	4.06	24.00	86.50%	6.14
Salida	Cortador de rodajas	Restos Manzanas	0.12	24.00	86.50%	6.14
Entrada	Pretratamiento químico	Rodajas de manzanas	3.94	24.00	86.50%	6.14
Salida	Pretratamiento químico	Rodajas con pretratamiento	4.05	24.00	89.15%	8.22
Entrada	Pretratamiento químico	Solución NaOH	230.92			
Salida	Pretratamiento químico	Solución NaOH	230.79			
Entrada	Secador	Rodajas de manzana	4.05	24.00	89.15%	8.22
Salida	Secador	Rodajas de manzana secas	0.49	57.00	9.39%	0.10
Entrada	Calentador eléctrico	Aire frío	1462.86	24.00	54.00%	0.01
Salida	Calentador eléctrico	Aire caliente	1462.86	65.00	19.50%	0.04
Salida	Secador	Aire	1462.86	58.47	35.00%	0.07

*Nota:* Este balance de masa se modeló utilizando las condiciones de secado de la corrida 11, correspondiente al secado con pretratamiento químico. Se tomó las condiciones de entrada del aire, las condiciones de entrada y salida de sólido, condiciones ambientales y tiempo de secado (3 horas). Tomando como base de cálculo un lote de producción de 4 kg de manzana iniciales y utilizando el mismo secador de bandejas, marca Precision Quincy EC-404-6. Los datos utilizados se pueden observar en la Tabla 194. Elaboración propia.

**Tabla 11.**

*Balance de energía para línea de producción de sobres de 10 gramos de snacks por lote de producción*


Equipo	Consumo/Pérdida	Energía (kJ)	Porcentaje del total de energía
Lavadora	Consumo	660	3.4%
Cortadora	Consumo	1,620	8.2%
Pretratamiento (inmersión)	Consumo	333	1.7%
Calentador de aire eléctrico	Consumo	15,592	79.3%
Secador	Consumo	8,044	-
	Pérdida	1,772	-
Empacadora	Consumo	1,440	7.3%




*Nota:* Este balance de energía se modeló utilizando las condiciones de secado de la corrida 11, correspondiente al secado con pretratamiento químico. Se tomó las condiciones de entrada del aire, las condiciones de entrada y salida de sólido, condiciones ambientales y tiempo de secado (3 horas). Tomando como base de cálculo un lote de producción de 4 kg de manzana iniciales y utilizando el mismo secador de bandejas, marca Precision Quincy EC-404-6 y equipos propuestos especificados en la Tabla 12. Se omitió el secador debido a que se tomó en cuenta en conjunto al calentador eléctrico. Se utilizó el cálculo 35, en anexos. Los datos utilizados se pueden observar en la Tabla 194. Elaboración propia.

Tomando en cuenta los balances de masa y energía se propuso los equipos que se adecuaron al proceso los cuales se describen en la Tabla 12.

**Tabla 12.**

*Equipos propuestos para la línea de producción de snacks de manzana en sobres de 10 g en operación por lotes*

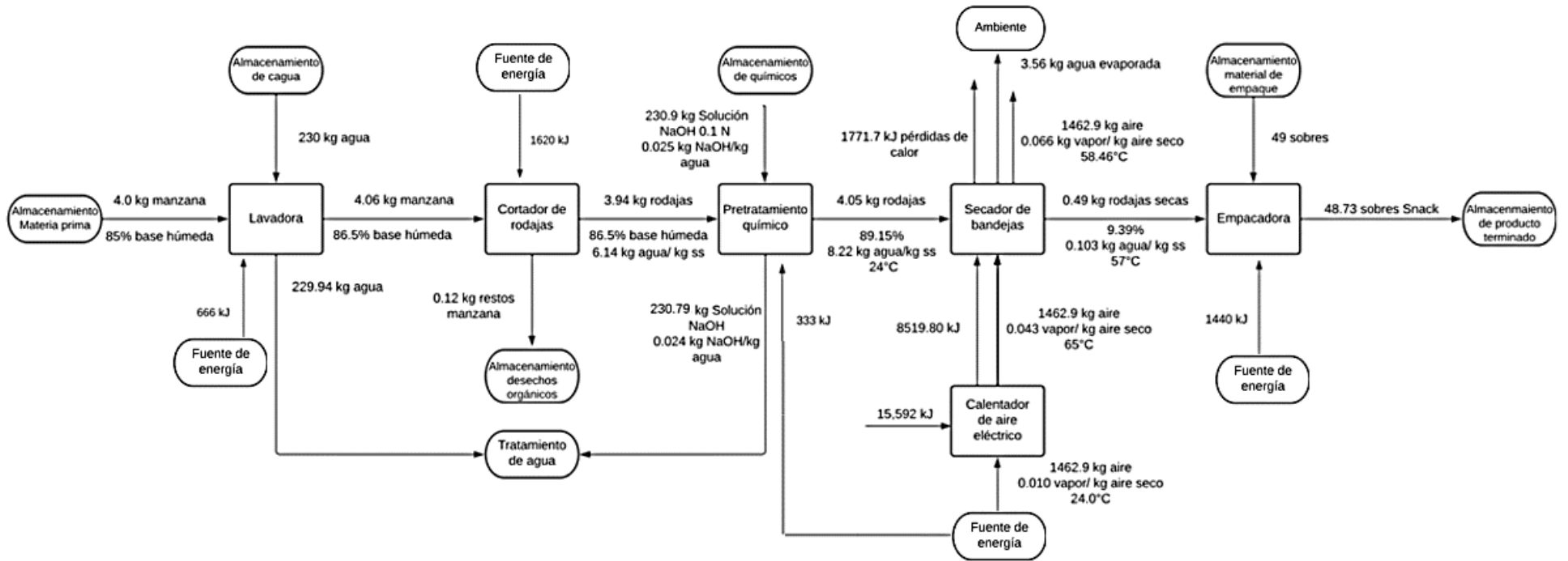
Equipo	Cant.	Marca y modelo propuesto	Descripción	Especificaciones	Imagen del equipo
Lavadora y pretratamiento químico	2	KRONEN DS1000 mobil	Lavado, inmersión y desinfección de vegetales y frutas. La DS1000 es un baño de burbujas compacto móvil. La unidad básica cuenta con una unidad básica generadora de burbujas configurable.	Potencia eléctrica: 0.37 kW Tensión: 220 V Frecuencia: 60 Hz Volumen total: 230 L Medidas: 850 x 670 x 1270 mm Peso: 100 kg (Kronen, s.f.).	

Cortadora de rodajas	1	KRONEN KSM 100	Cortadora para procesar cantidades menores de verduras, lechigas y frutas duras. La caja de cuchillas tiene 2 aberturas de llenado. Puede cortar en curvos, bastoncitos, ondulado, rodajas	Potencia: 0.9 kW Tensión: 220 V Frecuencia: 60 Hz Medidas: 1003 x 856 x 1235 mm Peso: 80 kg Grosor de corte: hasta 10 mm Capacidad máxima: 300 kg/h (Kronen, s.f.).	
Secador de bandejas	1	Precision Quincy EC-404-6	Secador de bandejas con carrito movable	Potencia: 3 kW Tensión: 220 V Frecuencia: 60 Hz Intervalo de purga: 2.6 min (Kronen, s.f.).	
Empacadora	1	KRONEN Empacador a Mini	Permite empaquetar en porciones y de manera eficiente alimentos. Según la configuración estándar, produce bolsas tipo almohada o de fondo plano.	Potencia: 1.2 kW Tensión: 220 V Frecuencia: 60 Hz Presión de aire (opcional): 6 Bar Medidas: 1330 x 650 x 1140 mm Ancho del film: Max 160 mm Ancho de la bolsa: Max 160 mm Capacidad máxima: 65 bolsas/min (Kronen, s.f.).	

*Nota:* Estos equipos se tomaron de referencia para realizar los balances de masa y energía. El secador de bandejas corresponde al utilizado para esta investigación, ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias. Elaboración propia.

Con la información descrita en las Tablas anteriores, se realizó un diagrama de la línea de producción. El diagrama comienza por el ingreso de la materia prima, las manzanas, a la lavadora, donde se tiene un ingreso de agua y energía, al salir de la lavadora pasa por el cortador de rodajas, donde se presentan pérdidas que se dirigen a desechos orgánicos, se realiza el pretratamiento químico que consta en la inmersión de las rodajas en solución de hidróxido de sodio 0.1 N y se tiene una salida de agua que se dirige al tratamiento de agua, luego las rodajas pretratadas se colocan en el secador de bandejas donde se realiza la deshidratación por 3 horas por medio de aire caliente, luego del tiempo de secado, las manzanas deshidratadas se dirigen a la empacadora, que finalmente nos entrega los sobres de 10 gramos de manzana deshidratada. Los datos de referencia utilizados para este diagrama se encuentran en la Tabla 194.

**Figura 32:**  
*Diagrama de bloques de propuesta de línea de producción de snacks de manzana en sobres de 10 g en operación por lotes*



Nota: Elaboración propia

## VIII. Discusión

El objetivo principal del trabajo fue evaluar el efecto del pretratamiento en el secado de snacks de manzana por método químico y mecánico para el aumento de eficiencia de secado en línea de producción. Para ello se plantearon los objetivos específicos de realizar el pretratamiento de la manzana por método químico, usando solución de hidróxido de sodio 0.1 N y método mecánico, por cortes longitudinales en la fruta para modificar el tiempo de secado, determinar la velocidad y la eficiencia de secado de manzanas pretratadas utilizando la curva de secado para evaluar el efecto de los tipos de pretratamiento y realizar propuesta de línea de producción de snacks de manzanas, con balances de masa y energía, utilizando el método de pretratamiento más efectivo para el secado de manzanas. Para esto se desarrolló la experimentación comenzando por la caracterización de la materia prima. Luego se procedió a realizar los secados con los diferentes tratamientos de temperatura y pretratamientos y finalmente se realizó la propuesta de la línea de producción.

Durante la caracterización de la materia prima se tomó en cuenta los principales aspectos fisicoquímicos estudiados en la literatura para las manzanas y los aspectos microbiológicos para determinar la presencia de microorganismos patógenos que pueden encontrarse en la fruta. Tomando en cuenta que en Guatemala es un país en vías de desarrollo, en el cual se cuenta con prácticas agrícolas inadecuadas, deficiencias en infraestructura de almacenamiento y manipulación y limitaciones en el control y el aseguramiento de inocuidad, es importante realizar los análisis microbiológicos para descartar presencia de microorganismos patógenos. Tales como lo son *Escheriachia coli* y *Salmonella spp*, los cuales son los principales que se podrían encontrar en frutas y vegetales (Seipel et al., 2009).

Por otro lado, el primero de los aspectos fisicoquímicos que fue evaluado fue la masa de manzana fresca, el resultado obtenido promedio fue de  $180.1 \pm 0.12$  g sin embargo este tuvo una desviación estándar de 8.71g siendo significativa. Esto sucede debido a que las manzanas fueron seleccionadas de forma al azar en el lote. Tomando en cuenta que el crecimiento de la manzana depende de factores variados como el agua, los nutrientes obtenidos, tipo de suelo, clima, entre otros, este valor se espera que cuente con una alta desviación debido a la influencia de dichos factores. Además, se realizó la medición de los diámetros ecuatoriales (perpendicular al tallo de las manzanas) y polares (paralelo al tallo) los cuales tuvieron como resultado  $74.30 \pm 0.01$  mm y  $67.97 \pm 0.01$  mm, respectivamente, con una desviación estándar de 1.74 mm y 3.01 mm. Al igual que al resultado de masa de manzana, se observar que la variación en los diámetros es recurrente debido a que también se ve afectada por los factores de crecimiento. También hay que destacar que las manzanas cuentan con una forma específica que no se asemeja como tal a una esfera por lo que se contó con variaciones tanto de forma como de masa en las manzanas.

En cuanto al proceso de pelado y descorazonado se observó que  $22.34 \pm 1.41\%$  de la masa total de las manzanas correspondían a la cáscara y al corazón de la manzana, siendo este porcentaje significativo debido a que corresponde a el porcentaje de materia prima no utilizado para la extracción de jugo para la caracterización de la manzana. La masa de las manzanas peladas y descorazonadas fue en promedio de  $137.1 \pm 0.10$ g con una desviación estándar de 8.74g. Esto se debió a que las manzanas tenían variaciones de masa iniciales (manzanas frescas) y que 2 manzanas no contaban con el corazón alineado, provocando que se tuvieran que remover dos veces el corazón y perdiendo más materia prima en el proceso. Este aspecto, se debe a factores de crecimiento de la manzana en la que algunas logran tomar una forma “simétrica” mientras que otras manzanas no cuentan con la simetría debido a que el corazón de la manzana se encuentra inclinado o desviado.

Para el resultado de la relación de diámetros de la manzana se obtuvo un promedio de  $1.15 \pm 1.76 \times 10^{-4}$  con desviación estándar de 0.12. Este resultado muestra cuantas veces el diámetro menor corresponde al diámetro mayor. Cabe resaltar que esto afecta al momento de realizar las rodajas de manzanas ya que las rodajas son de diferente tamaño, afectado los resultados de la evaluación en las curvas de secado, sin embargo, esto se discutirá más adelante. También se calculó la jugosidad de la manzana obteniendo el resultado de  $0.41 \pm 0.8 \times 10^{-3}$  g/g con una desviación de 0.06 g/g. Este aspecto es importante ya que nos permite observar el contenido de

agua que cuenta la manzana. Sin embargo, al momento de extraer el jugo de la manzana, la pulpa resultante aún cuenta con humedad residual, esto se debe tomar en cuenta en este resultado y por ello, la humedad de la manzana se puede observar de mejor manera en el comportamiento de la curva de secado. Y cabe mencionar que se obtuvo un promedio de  $51 \pm 1.0$  mL de jugo por manzana con una desviación estándar de 2.6 mL, mostrando que si se cuenta con variación en el contenido de jugo por manzana.

En cuanto a los grados Brix obtenidos que fue de  $13.62 \pm 0.10^\circ$  con desviación estándar de 1.11°, el resultado se encuentra dentro de los rangos establecidos por la norma NMX-045-1982 la cual especifica que una manzana debe contener entre 11.0-14.0°. Por lo que la manzana evaluada cumple con las características esperadas. También se obtuvo el pH del jugo de manzana el cual correspondió a  $3.72 \pm 0.1$  con desviación estándar de 0.01 mostrando que también cumple con la norma NMX-045-1982, la cual indica que se debe encontrar dentro del rango de 3.5-4.0, mostrando que el jugo de manzana es de carácter ácido. También, se determinó la cantidad de ácido málico contenido en la muestra el cual tuvo como resultado  $0.48 \pm 0.01\%$  que se encuentra en conformidad con las características mencionadas en la misma norma. Por último, se realizó la evaluación microbiológica de la manzana la cual tuvo resultados satisfactorios, cumpliendo con la norma RTCA 67.0450:17, 2017, mostrando la ausencia de *Escherichia coli* y de *Salmonella spp.* Los cuales son bacterias patógenas no deseadas en la manzana para evitar enfermedades en los consumidores.

Luego de la caracterización de la materia prima se procedió a realizar los secados a diferentes temperaturas con el objetivo de evaluar el comportamiento del secado. Esto se realizó a las temperaturas de 55, 60 y 65°C, tomando en cuenta que estas temperaturas fueron las que más se evaluaban en la literatura. Las rodajas utilizadas tuvieron un grosor promedio de 3 milímetros, se determinó que se utilizaría este grosor ya que la literatura utilizaba en promedio este grosor y de esta forma, poder comparar los datos experimentales con la teoría (Awad y El-Enany, 2007). Se realizaron en total 11 corridas de las cuales se seleccionó una corrida representativa de cada uno de los tratamientos para comparar entre sí los resultados. Para la temperatura de 55°C se seleccionó la corrida 3, para la temperatura de 60°C se seleccionó la corrida 4 y para la temperatura de 70°C la corrida 9. Y se procedió a realizar el análisis de los resultados, individualmente y por comparación de los tratamientos para determinar la temperatura con mejor desempeño. Para cada una de las corridas se determinó la muestra utilizada para modelar la curva de secado sería de 10 rodajas cada corrida, siendo 6 las cuales se utilizarían directamente en la medición a diferentes tiempos de secado y 4 que se medirían únicamente al inicio y al final del secado, ya que la medición de 6 muestras es más manejable que una de 10 para cada intervalo de tiempo y disminuir el tiempo que las muestras estuvieran fuera del secador. Se determinó el tamaño de muestra con un nivel de confianza de 95% de una población, con un margen de error de 0.3 de una población de 60 rodajas, siendo el resultado 10 rodajas de muestra.

Se obtuvo la curva de secado como se muestra en la Figura 28 donde se observa el comportamiento de la velocidad de secado en relación con la humedad en base seca. El secado 3 a 55°C tuvo un comportamiento diferente al secado a 60°C y 65°C, mostrando un decaimiento de velocidad de secado mayor a las otras dos temperaturas. También se puede notar que tiene una inflexión más notoria. Como se observa en la Figura 35, en anexos, el decaimiento de la velocidad de secado (cambio de humedad respecto al tiempo contra la humedad en el equilibrio) es notorio y es acelerado, donde se puede observar tres etapas principales, una etapa de decaimiento acelerado, una etapa constante corta de 3 a 2 agua kg/kg sólido seco, seguida por otro decaimiento acelerado. Esto se pudo deber a que a esta temperatura la capacidad de retención de humedad por parte del aire es menor que a temperaturas más altas, por lo que sólido fue perdiendo humedad de forma más lenta en comparación a los otros tratamientos, ya que la velocidad de secado fue disminuyendo con el tiempo. Esto concuerda con el resultado de la Figura 29 en la que se puede visualizar que el secado 3 contuvo en promedio, una mayor cantidad de humedad en el mismo tiempo que las otras temperaturas, ya que la curva se encuentra más elevada y alejada al eje central de la gráfica.

En cuanto al secado 4 a 60°C, en la Figura 28, se puede observar que tuvo un comportamiento semejante al secado a 65°C. En esta curva logramos visualizar dos puntos en los que se puede considerar que se tiene la fase de velocidad constante y luego observamos una disminución de velocidad con comportamiento semejante al de 55°C y 65°C. Esto se puede visualizar de mejor manera en la Figura 38, en anexos, donde se

observa tres etapas de secado, la etapa de velocidad constante y dos etapas de velocidad decreciente donde la final fue más pronunciada que la primera. Al observar la Figura 29, se cuenta con una diferencia entre la retención de humedad entre las temperaturas, ya que la curva se encuentra más elevada que la del secado 9 y menos elevada que la del secado 3. Esto se pudo deber, al igual que el secado 3, a que el aire cuenta con mayor retención de humedad a una mayor temperatura, por lo que al ser mayor temperatura que la del secado 3, se observa una mayor pérdida de humedad en un mismo tiempo, pero menor a la del secado 9 dado a que en el secado 9 se operó a una mayor temperatura que en el secado 4. Esto debido a que la transferencia de masa aumenta al contar con un gas más caliente, permitiendo extraer una mayor humedad.

Por último, observando la curva de secado a 65°C, secado 9, cuenta con un comportamiento más suavizado que las otras dos pruebas, en esta curva no se logra visualizar la fase de velocidad constante tan claramente en la Figura 28. Al visualizar la Figura 49 puede observar que cuenta con una etapa constante y dos etapas de decaimiento, siendo la primera menos pronunciada que la etapa de decaimiento final. Por otro lado, al visualizar la Figura 29, se puede notar que la curva del secado a 65°C es la que retuvo menor cantidad de humedad en un mismo tiempo que las otras dos. Siendo esta la más baja y apegada al eje central de las tres pruebas. Esto concuerda con lo observado en la teoría, ya que espera una mayor velocidad de secado a temperaturas mayores. Las gráficas experimentales obtenidas por Contreras (2006) que se pueden visualizar en la sección de antecedentes. Además, cabe destacar que las curvas obtenidas muestran coeficientes de regresión polinomial grado 3, arriba de 0.9995 para la Figura 29, mostrando una alta descripción del comportamiento experimental utilizando las ecuaciones obtenidas.

Por otro lado, al visualizar la Tabla 5, se puede observar las diferencias entre las eficiencias de secado entre las tres temperaturas, la razón de la energía invertida en el secado y la energía eléctrica consumida. Donde la mayor eficiencia de secado se obtuvo a la mayor temperatura, siendo el secado 9 con  $12.65 \pm 0.04\%$  y la menor eficiencia fue con el secado 3, siendo de  $5.50 \pm 0.03\%$ . Concordando con los resultados de las gráficas discutidos anteriormente. Estas eficiencias son bajas debido a que, comparado con el consumo energético que se tiene para calentar el aire de temperatura ambiente a temperatura de secado, el consumo para secar el sólido es más bajo. Además, se debe resaltar que no se operó el secador de bandejas llenando la capacidad completa de las bandejas del secador, provocando que el consumo por calentamiento de aire sea representativamente mayor al del secado y por ende teniendo bajas eficiencias de secado al igual que la eficiencia energética, la que corresponde a la diferencia del consumo total de energía menos la energía por calentamiento. Esto se ve representado en los resultados de consumo de calentamiento, donde se describe el porcentaje de energía eléctrica utilizado para calentar el aire. El secado 3 tuvo un consumo de  $84.78 \pm 0.44\%$ , el secado 4 de  $89.70 \pm 0.45\%$  y el secado 9 de  $84.17 \pm 0.37\%$ . Se puede destacar que, al tener un mayor flujo de aire y mayor temperatura, se tiene un mayor consumo de energía para el calentamiento. Por último, la eficiencia energética muestra que, a menor temperatura, mayor eficiencia energética se tiene, esto concordando con lo mencionado anteriormente relacionado a la velocidad de secado.

Para corroborar que la temperatura con mejor desempeño de secado de las tres temperaturas evaluadas, se decidió realizar una comparación de medias de porcentaje de pérdida de masa entre las 6 muestras utilizadas para la curva de secado utilizando la prueba ANOVA en Excel. En esta prueba se obtuvo como resultado un F crítico de 3.2850 y F de 5.3429, por lo que se rechazó la hipótesis que la medias son iguales. Tomando en cuenta lo anterior, se procedió a realizar las pruebas ANOVA entre las tres temperaturas, de forma binomial. Se realizó la prueba entre las temperaturas de 55 y 60°C, donde se obtuvo el resultado de F crítico 3.2850 y el F de 0.1557, concluyendo que no existía diferencia significativa. Luego se realizó la prueba entre el secado a 60 y 65°C, donde se obtuvo los resultados de F crítico de 3.2850 y F de 20.9294, concluyendo que existe diferencia significativa entre las medias, siendo mayor la de 65°C. Por último, se realizó la prueba entre las temperaturas 55°C y 65°C, donde se obtuvo el resultado de F crítico de 3.2850 y F de 6.1750 donde se concluyó que existe diferencia significativa entre las medias, siendo mayor, nuevamente la media de la temperatura 65°C. Concluyendo que la temperatura de secado de 65°C tuvo mejores resultados en las curvas de secado, en la curva de pérdida de humedad respecto al tiempo, en la eficiencia de secado y en las pruebas ANOVA con porcentaje de pérdida de masa que las otras dos temperaturas. Por lo que se decidió utilizar esta temperatura para realizar el estudio del pretratamiento.

Dado a que se cuenta con una alta variedad de pretratamientos de secado para alimentos, se eligió dos de estos pretratamientos tomando como criterios principales la facilidad de aplicación y el costo que requería realizar el pretratamiento. A partir de estos dos criterios se determinó que los métodos evaluados serían el método mecánico y el método químico. Se realizó el pretratamiento mecánico que constaba en realizar daño mecánico en la cutícula superficial de las rodajas utilizando la mandolina con cuchillas especiales para el daño superficial de la manzana, estas cuchillas se regularon para que realizaran el daño mecánico en la rodaja de 1 mm de altura y la separación entre cada corte, de cada cuchilla, fue de 4 milímetros. Para el pretratamiento químico se realizó un remojo de 30 segundos en una solución de hidróxido de sodio a temperatura ambiente y luego se lavó con agua destilada. Este tiempo de remojo se determinó tomando en cuenta que fue el tiempo sugerido y utilizado en otras investigaciones y de esta forma poder comprar los resultados obtenidos este trabajo de investigación, limitando la cantidad de viables sometidas a evaluación (López y Sanchez, 2018). Las corridas de referencia que se utilizaron para realizar el análisis de resultados tanto de forma individual como comparativa fue el secado 10 para el pretratamiento mecánico y el secado 11 para el pretratamiento químico, ambos realizados a una temperatura de secado de 65°C y, de igual forma se tomó como referencia el secado 9 a 65°C sin pretratamiento.

En las curvas de secado de manzana con y sin pretratamiento en la Figura 30 se puede observar que, en primer lugar, se tuvo un comportamiento diferente entre el secado sin pretratamiento (secado 9) y los secados con pretratamiento (secado 10 y 11). Como se puede observar, el secado con pretratamiento mecánico, secado 10, tuvo una velocidad de secado inicial muy alta que fue disminuyendo de forma acelerada. Por otro lado, la Figura 31 se puede observar que el secado 10 fue el secado que tendió a acercarse más al eje central de la gráfica mostrado que a un mismo tiempo, se contaba con menor humedad que en el secado sin pretratamiento. Al visualizar la curva de cambio de humedad respecto al tiempo contra el cambio de humedad en la Figura 52, en anexos, se puede observar que no se cuenta con una fase de velocidad constante, sino que se cuenta con tres etapas de decaimiento, siendo el último el más pronunciado. Por lo que se puede entender que la velocidad de secado fue disminuyendo aceleradamente. Sin embargo, se puede observar en la Tabla 7, que el secado 10 tuvo una mejor eficiencia de secado, siendo de  $15.91 \pm 0.05\%$ , que el secado 9 sin pretratamiento, de  $12.65 \pm 0.04\%$ . Tuvo un menor consumo de calentamiento de aire debido que se requirió menos energía para realizar el secado y por ende se cuenta con una mejor eficiencia energética, de  $17.80 \pm 0.06\%$ , que el secado 9, de  $13.72 \pm 0.05\%$ . Mostrando que el pretratamiento químico si tiene un efecto positivo en el secado. Esto se puede deber a que, al realizar el daño físico de la superficie de la manzana, se aumenta el área de contacto del sólido con el aire. Permitiendo así tener una mejor migración de agua en el sólido. Aumentando la transferencia de masa y permitiendo extraer una mayor cantidad de agua del sólido en menos tiempo como se observa en la Figura 30.

Por otro lado, al observar el comportamiento de la curva del secado 11, se puede observar que se cuenta con un comportamiento singular. Esto ya que, al inicio del secado se tiene un comportamiento de velocidad constante, no mostrado en otros secados, y luego se tiene una etapa de secado donde disminuye la velocidad de forma acelerada, luego vuelve a ser constante y finalmente tiene un comportamiento de disminución de velocidad de secado acelerado. Es importante mencionar que, a una misma humedad, se cuenta con una mayor velocidad de secado que el secado 10 y 9, luego de la humedad de 2.2 kg agua/kg sólido seco. Esto se puede observar al igual en la curva de pérdida de humedad, Figura 31, donde se observa que se comienza a una alta humedad, debido a que se tuvo contacto con la solución de hidróxido de sodio. Además, esta humedad disminuye de forma acelerada hasta llegar a una humedad similar a la del secado 10 y 9.

En la Figura 55, se puede observar las etapas o fases de secado donde se tiene un comportamiento diferente al de los otros secados. Se observa la etapa de velocidad constante prolongado de 6-2 kg de agua/kg sólido seco y dos etapas de decaimiento de velocidad. En la Tabla 7 se puede destacar que el pretratamiento químico fue el que mayor eficiencia de secado tuvo de todas las corridas, de  $17.04 \pm 0.05\%$ . Tuvo el menor consumo de calentamiento de aire siendo de  $81.10 \pm 0.36\%$  y la mayor eficiencia energética de las corridas siendo esta de  $18.90 \pm 0.07\%$ . Esto se puede deber a que el pretratamiento químico permitió cambiar el pH de la manzana, provocando cambios estructurales y permitiendo así, liberar agua retenida o ligada y provocando mejores resultados de secado. Esto ya que abre microcanales donde permite un mejor flujo de agua dentro del sólido. También, el aumento la transferencia de masa dentro del sólido (de la parte interna del sólido a la parte

expuesta al gas secante) y la transferencia de masa del agua del sólido con el gas secante (Bates y Sharples, 2009).

El pretratamiento de las manzanas con hidróxido de sodio provoca la hidrólisis de pectinas, desnaturalización de proteínas, solubilización de polisacáridos y reacción con compuestos fenólicos. En cuanto a la hidrólisis de pectinas, el NaOH rompe las uniones éster entre la pectina y el ácido galacturónico, liberando pectina soluble y aumenta así la porosidad de la matriz celular. La desnaturalización de proteínas provoca ya sea solubilización o precipitación por lo que se cambia la estructura de estas. Por último, la reacción de los compuestos fenólicos provoca un cambio de coloración de la piel de la manzana, lo cual se desarrollará más adelante. Estas reacciones pueden causar cambios significativos a nivel molecular y estructural, que ayuda a la liberación de agua retenida o ligada, permitiendo tener un mayor secado (Bates y Sharples, 2009).

Complementando, se realizó la comparación de medias de porcentaje de pérdida de masa entre las 6 muestras utilizadas para la curva de secado con y sin pretratamiento, de igual forma que el análisis realizado para las diferentes temperaturas. En la primera prueba se obtuvo como resultado un F crítico de 2.695 y F de 131.78, por lo que se rechazó la hipótesis que la medias son iguales. Tomando en cuenta lo anterior, se procedió a realizar las pruebas ANOVA de forma binomial. Se realizó la prueba entre el secado sin pretratamiento y con pretratamiento mecánico, el resultado fue F crítico 3.2850 y el F de 557.40, concluyendo que existía diferencia significativa entre medias. Luego se realizó la prueba entre el secado con pretratamiento químico y mecánico, donde se obtuvo los resultados de F crítico de 3.2850 y F de 84.84, concluyendo que existe diferencia significativa entre las medias, siendo mayor el pretratamiento químico. Por último, se realizó la prueba entre el pretratamiento químico y sin pretratamiento, donde se obtuvo el resultado de F crítico de 3.2850 y F de 168.05, se concluyó que existe diferencia significativa entre las medias, siendo mayor, nuevamente la media del pretratamiento químico.

Sin embargo, el resultado anterior era de esperarse ya que el pretratamiento químico comenzó con una humedad inicial mayor a la de los demás secados. Permitiendo así tener una mayor disponibilidad de agua para perder durante el secado y, por ende, se tuvo un mayor porcentaje de pérdida de masa en las muestras. Por otro lado, el secado mecánico que comenzó con una humedad similar a la del secado sin pretratamiento. Si mostró diferencias significativas entre las medias de pérdida de masa, mostrando que el pretratamiento mecánico si permitió mejorar la transferencia de masa del sólido al aire por medio de la exposición de mayor área al aire. Por lo que, de igual forma se pudo observar que ambos pretratamientos tuvieron un efecto positivo en cuanto a la pérdida de humedad, la eficiencia de secado, la eficiencia energética y tuvieron un menor consumo de energía para el calentamiento del aire utilizado durante el secado.

Otro punto por considerar, son los resultados de las características físicas de las rodajas secadas a diferentes pretratamientos. Esto se observa en los resultados de la Tabla 9 y en la Figura 83. En primer lugar, el secado con pretratamiento mecánico mostró una superficie pardeada debido al daño mecánico. Esto era de esperarse ya que al realizar el daño mecánico también se expuso esta superficie al contacto con el aire el cual oxida compuestos fenólicos por la presencia de oxígeno en el aire. La oxidación de estos compuestos es catalizada por una enzima (polifenoloxidasas) que está presente en las células y cuando estas tienen un daño físico, son liberadas y reaccionan para formar compuestos conocidos como melaninas que tiene pigmentos marrones (Bates y Sharples, 2009). En cuando al color de las partes que no tuvieron daños mecánicos, este fue semejante al color del secado sin pretratamiento. Además, se mostró el mismo fenómeno de deformación por el secado debido a la turgencia del tejido vegetal, esto ya que se tiene las paredes celulares bajo tensión y el contenido celular bajo compresión. Por último, la textura tuvo un cambio ya que se tenía una textura rugosa debido al daño mecánico que formaron grietas en la superficie.

En cuanto al secado con pretratamiento químico, este se realizó utilizando una concentración de NaOH de 0.1 N ya que esta concentración fue la utilizada para frutas según la literatura y dado a que la FDA (Administración de Medicamentos y Alimentos) permite el uso de hidróxido de sodio como aditivo alimentario a niveles inferiores a 1% (p/v). Por lo que la concentración se encuentra dentro del rango permitido (ChemicalSafetyFacts, 2023). Al realizar el pretratamiento con la solución de NaOH 0.1N, se observó un cambio de coloración de la pulpa de la manzana. Esto se puede observar en la figura 79 y 80, en anexos. Al

igual que lo mencionado anteriormente respecto a la activación de la enzima polifenoloxidasas, es afectada por el pH expuesto (Bates y Sharples, 2009). Por otro lado, en cuanto al producto seco, este si tuvo un cambio significativo en cuanto las características físicas de las rodajas secas de la corrida 9.

El aspecto de la superficie contaba con una superficie lisa y líneas semejantes a venas. Estas fueron más visibles en el centro de la manzana o el corazón de la manzana. Estas “venas”, llamados vasos vasculares, son responsables de llevar oxígeno, nutrientes y agua a través de la fruta y debido al bajo porcentaje de agua en estas muestras, se lograron visualizar de mejor manera en las muestras con pretratamiento químico. El color de las rodajas si fue diferente al obtenido en los otros secados, mostrando un color más oscuro que los demás debido a que la coloración cambió desde el pretratamiento químico mencionado anteriormente (Bates y Sharples, 2009). Por último, la textura también mostró cambios significativos ya que se tuvo una textura de menor grosor y se notaba que contaba con una menor humedad que las otras muestras. Además, estas rodajas se quebrantaban debido al bajo nivel de agua con el que se contaba, cosa que no se mostró en los demás secados. Esto se pudo deber a que el pretratamiento químico permitió extraer mayor porcentaje de agua por medio de la alteración del pH de la manzana y libreando, posiblemente, agua ligada, provocando cambios estructurales que dieron lugar a la textura obtenida (Bates y Sharples, 2009).

Con las eficiencias obtenidas en las corridas, se observa que el proceso de secado es de alta demanda energética por lo que lo ideal es tratar de disminuir la energía utilizada para el secado. Como se pudo observar, a una mayor temperatura, se tiene una mayor eficiencia de secado y los pretratamientos si tuvieron un mejor desempeño que el secado sin pretratamiento que se puede visualizar en la Tabla 7 y 8. Por lo que se confirmó que los pretratamientos tienen un efecto positivo en la eficiencia de secado. Siendo el tratamiento químico el que mostró mejores resultados en la eficiencia de secado, consumo de calentamiento, eficiencia energética, aunque cabe resaltar los cambios de características físicas en las rodajas de manzana. Por lo que se recomendaría realizar un estudio organoléptico del producto.

Tomando en cuenta los resultados discutidos anteriormente, se procedió a realizar el planteamiento de la línea de producción de snacks de manzana utilizando el pretratamiento químico. Para esta línea de producción se determinó que las etapas del proceso son el lavado de las manzanas para evitar la presencia de patógenos, el corte de manzanas, el pretratamiento químico por inmersión, el secado y finalmente el empaque del sólido seco en bolsas de 10 g de producto, peso neto. Se realizó un análisis de las presentaciones comercialmente disponibles para determinar el formato ideal de empaque. Se encontró que la presentación más utilizada es la de 10 gramos de peso neto, por lo que se tomó como referencia. Entre otras presentaciones disponibles se encuentran las de 25 gramos, 50 gramos y hasta 1 kilogramo. La elección del formato final depende del uso que se le dará al producto. Tomando en cuenta que se buscaba desarrollar una línea de snacks, se seleccionó la presentación de 10 gramos ya que es una presentación común, ligera y ocupa poco espacio de almacenamiento.

Se obtuvo el balance de materia y energía presentado en la Tabla 11 y 12, respectivamente y se plasmaron gráficamente en un diagrama de bloques del proceso. Se utilizó como base las condiciones obtenidas experimentalmente en la corrida 11, correspondiente al pretratamiento químico. Se propuso la línea utilizando el mismo secador de bandejas utilizado para la práctica. Suponiendo un llenado completo del secador, utilizando una carretilla de con capacidad de 18 estantes para bandejas, 2 bandejas por estante. Tomando en cuenta que este es un valor de número de estantes de bandejas comercialmente utilizado. Se calculó que se tendría capacidad de secar 4 kg de manzana/lote con un tiempo de secado de 3 horas. Se planteó el uso de los equipos especificados en la Tabla 12. Estos equipos fueron seleccionados a partir del requerimiento de la línea tomando en cuenta la capacidad máxima de volumen de secado. Se obtuvo el balance de energía a partir de los requerimientos energéticos de los equipos propuestos.

Analizando los consumos y pérdidas de energía presentados en la Tabla 11, se puede notar que el más representativo es el consumo de energía para calentar el aire a la temperatura de secado. Al igual que lo observado en las corridas experimentales. Sin embargo, dado a que el volumen de secado es mayor, se observa que el calor de secado (el consumo del secador en la Tabla) es más representativo que el obtenido en las corridas. Se estimó que la proporción del calor de secado para la línea respecto al calor total ingresado al secador es de 0.33, cálculo 34 en Anexo C, mostrando un aumento gracias al aprovechamiento del espacio de secado del

secador. Por otro lado, se estimó la razón del consumo de energía para el secador contra el consumo de energía total donde se obtuvo 0.79, como se observa en la Tabla 11, por lo que se observa que este es el proceso más demandante de energía, como se esperaba. Esto debido a que el secado es un proceso de alta demanda energética comparado a las otras etapas del proceso como, por ejemplo, el lavado de manzanas donde es de una menor demanda energética, correspondiente al 3.4% del total de energía, pero una mayor demanda de agua. Se recomienda evaluar métodos de aprovechamiento del aire caliente de saliente para otros procesos y así aumentar la eficiencia energética de la línea de producción.

Además, es importante evaluar otras fuentes de calor para el proceso de secado como podría ser el aprovechamiento de energía solar utilizando secadores solares, que permitan precalentar el sólido y tener un menor diferencial de temperaturas para disminuir el tiempo de secado. O implementar el uso de paneles solares para aprovechar la energía fotovoltaica para que la generación de energía reducir los costos de energía, además que son una fuente de energía renovable y limpia. O se podría implementar tecnología de secadores eólicos que utilizan el flujo de aire en para disminuir la humedad de las frutas. También podría ser con secadores geotérmicos que pueden aprovechar el calor natural de la tierra, evitando el consumo de energía eléctrica directa para el calentamiento del aire de secado. Se recomienda la investigación relacionada a fuentes alternativas de calor y/o energía para el secado de frutas.

Entre las fuentes de error de esta investigación, cabe resaltar las principales detectadas. La primera a mencionar es que se contó con pérdidas de calor grandes debido a que se tenía que abrir y cerrar el secado cada vez que se tomaba una muestra de masa para la curva de secado. Esto ya que, al abrir el secador, la temperatura y humedad dentro del secador se ven afectados por las condiciones ambientales. Otro tema para considerar es que no se llenó completamente el secador de sólido para realizar las corridas experimentales de secado. Por lo que afectó el desempeño del secado y quedó evidenciado en las eficiencias de secado obtenido. Otra fuente de error pudo ser que, durante la toma de muestra de masa, las muestras se expusieron al ambiente provocando que se recuperara humedad y se disminuyera la temperatura del sólido debido que se tenía que realizar la toma de las otras 5 muestras por lo que se perdió ese tiempo de secado. El tiempo de toma de muestras fue de aproximadamente 2 minutos y fueron entre 8-12 tomas de muestras durante la corrida del secado. Esto pudo afectar directamente los cálculos de las corridas y al afectar los cálculos de la corrida 11, también al diseño de la línea de producción. Además, es importante mencionar que las rodajas contaban con cáscara en la circunferencia exterior, la cual cuenta con coeficientes de transferencia de masa y de calor distinta al área de la pulpa de la rodaja por lo que afectó a la velocidad de secado del sólido.

Por último, otra fuente de error fue que algunas de las rodajas de manzana, las de menor grosor, quedaban pegadas a la bandeja de secado por lo que representaba una pérdida de sólido seco. Esto, especialmente sucedió en el pretratamiento químico, debido a que las rodajas se encontraban más húmedas y al mismo tiempo, fue el secado que más humedad retiró, provocando que la piel de la manzana se adhiriese al metal de las bandejas debido a la presencia de azúcares en la pulpa (Bates y Sharples, 2009). Esto se puede observar en la figura 82. Sin embargo, la investigación mostró que el pretratamiento químico y el pretratamiento mecánico, tuvieron efecto positivo en el aumento de eficiencia de secado, energética y aumentó el flux de transferencia de masa. Y se logró realizar una propuesta de una línea de producción de snacks de manzana utilizando uno de estos pretratamientos para aumentar la eficiencia del proceso.

## IX. Conclusiones

- Se realizó el pretratamiento químico y mecánico de rodajas de manzanas y se procedió a realizar el secado. La corrida con pretratamiento químico mostró características físicas diferenciadoras ya que presentó una textura más lisa y sensiblemente más delgada y se observaba los vasos vasculares en las rodajas. Además de un color más fuerte y rodajas quebradizas. El pretratamiento mecánico mostró una textura semejante al secado sin pretratamiento, pero con superficie pardeada por el daño físico realizado debido a la oxidación de los polifenoles.
- Se determinó que la mejor temperatura de operación para el secado de manzanas entre las temperaturas de 55°C, 60°C y 65°C, fue a 65°C. Dado a que mostró un comportamiento suavizado en la curva de secado, una mejor pérdida de humedad respecto al tiempo, reteniendo menor humedad a un mismo tiempo que los secados a otras temperaturas y presentó la mayor eficiencia de secado siendo de  $12.65 \pm 0.04\%$  y mayor eficiencia energética siendo de  $15.83 \pm 0.06\%$ .
- La corrida 10 con el pretratamiento mecánico tuvo como resultado una eficiencia de secado de  $17.04 \pm 0.05\%$ . Tuvo consumo de calentamiento de aire de  $81.10 \pm 0.36\%$  y eficiencia energética de  $18.90 \pm 0.07\%$  comparado con el secado sin pretratamiento. En la velocidad de secado, el pretratamiento mecánico, mostro en promedio, una mayor velocidad a un mismo tiempo comparado con el secado sin pretratamiento. Mostrando que el pretratamiento mecánico tiene un efecto positivo en el aumento de eficiencia de secado y en la velocidad de secado.
- La corrida 11 con el pretratamiento químico fue el que mayor eficiencia de secado tuvo de todas las corridas, de  $17.04 \pm 0.05\%$ . Tuvo el menor consumo de calentamiento de aire siendo de  $81.10 \pm 0.36\%$  y la mayor eficiencia energética de las corridas siendo esta de  $18.90 \pm 0.07\%$ . En la velocidad de secado, el pretratamiento químico mostro en promedio, una mayor velocidad a un mismo tiempo comparado con el secado sin pretratamiento y mecánico. Mostrando que el pretratamiento químico tiene un efecto positivo en el aumento de eficiencia de secado y en la velocidad de secado, mayor al pretratamiento mecánico.
- La propuesta de línea de producción de snacks de manzana cuenta con 6 etapas principales las cuales son el lavado de la manzana fresca, el cortador de rodajas de manzana, el pretratamiento químico, el calentamiento de aire, el secado y el empaque de los sobres de snack. La línea de producción propuesta produce 48.73 paquetes de snacks de 10 g cada uno de manzana deshidratada por lote, con 3 horas de secado y a partir de 4 kg de manzana fresca.
- Los balances de masa y energía se plantearon tomando como equipo de secado, el secador utilizado para las corridas experimentales y se utilizó de referencia equipos comercialmente disponibles para estimar el consumo de energía y materia prima para la línea de producción. Se estimó que el 3.4% de la energía total necesaria para la línea sería consumida en la lavadora, 8.2% por la cortadora, 1.7% el pretratamiento químico, 79.3% por el secador y 7.3% por la empacadora.

## **X. Recomendaciones**

- Evaluar las características físicas y organolépticas de la manzana deshidratada con el pretratamiento químico por medio de un panel sensorial para determinar las preferencias del consumidor respecto al producto pretratado y el producto del proceso base.
- Realizar un diseño detallado de una planta de producción de snacks de fruta deshidratada preparando diagramas de flujo de proceso, control de proceso, dimensionamiento de equipo y estimación de costo capital para considerar mayor cantidad de variables y buscar aumentar la eficiencia del proceso.
- Realizar una evaluación económica de la propuesta de una planta de producción de snacks de manzana con pretratamiento químico para comparar los costos operativos contra una línea de producción sin pretratamiento. Evaluando, costos de materia prima, costos de operación y costos energéticos de cada línea.
- Evaluar el efecto del pretratamiento químico o mecánico sobre frutas, diferentes a la manzana o verduras con una mayor dureza, obteniendo la eficiencia de secado y la eficiencia energética en la deshidratación para determinar la efectividad del pretratamiento.
- Realizar la investigación relacionada a fuentes alternativas de calor y/o energía para el secado de frutas como podría el aprovechamiento de energía solar utilizando secadores solare, la implementación de paneles solares para aprovechar la energía fotovoltaica, tecnología de secadores eólicos, secadores geotérmicos, entre otros. Con el fin de disminuir el costo y tener una mayor sostenibilidad.

## XI. Bibliografía

- Abughalyas, A. A., y Salem, M. A. (2020). Efecto de la velocidad del aire en la eficiencia de un secador de bandejas para el secado de rodajas de mango. *Journal of Food Engineering*, 273, 109463.
- Aredo, V., Arteaga, A., Benites, C., y Gerónimo, W. (2012). Comparación entre el secado convectivo y osmoconvectivo en la pérdida de vitamina C de Aguaymanto (*Physalis peruviana*) con y sin pretratamiento de NaOH. *Agroindustrial Science*, 2, 126-131.
- Awad, M. H., y El-Enany, N. A. (2007). Efecto de la temperatura de secado en la calidad de las rodajas de manzana. *Journal of food science*, 72(9), C641-C646.
- Bates, D. M., y Sharples, R. O. (2009). El oscurecimiento de las manzanas y otras frutas. *Trends in Food Science & Technology*, 20(4), 198-206.
- ChemicalSafetyFacts. (2023). Hidróxido de sodio. Recuperado de <https://es.chemicalsafetyfacts.org/es/hidroxido-de-sodio/#safety-information>
- Chen, J. H., y Ho, C. T. (1997). Actividades antioxidantes del ácido cafeico y sus compuestos relacionados de ácido hidroxycinámico. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(7), 2374-2378.
- Contreras, C. (2006). Influencia del método de secado en parámetros de calidad relacionados con la estructura del color de manzana y fresas deshidratadas. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia]. Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/1932/tesisUPV2345.pdf?sequence=1yisAl>
- De Pascual-Teresa, S., Moreno, D. A., y García-Viguera, C. (2010). Flavanoles y Antocianinas en la Salud Cardiovascular: Una revisión de la evidencia actual. *International Journal of Molecular Sciences*, 11(4), 1679–1703. <https://doi.org/10.3390/ijms11041679>
- Della Rocca, P., y Mascheroni, R. (2011). Deshidratación de papas por métodos combinados de secado: deshidratación osmótica, secado por microondas y convección con aire caliente. *Proyecciones*, 9(2), 11-26. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/188206116.pdf>
- Díaz, M., y Rodríguez, M. (2019). Propiedades fisicoquímicas de la manzana Gala de diferentes orígenes. *Revista de Ingeniería Industrial*, 30(2), 141-148.
- EMR. (2022). Mercado Latinoamericano de Frutas Deshidratadas. Recuperado de <https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-latinoamericano-de-frutas-deshidratadas>
- FEN. (s.f.). FRUTAS: LA MANZANA. Fundación Española de la Nutrición. Recuperado de <https://fen.org.es/storage/app/media/flipbook/mercado-alimentos-fen/008-Frutas.pdf>
- Fito, P., Andrés, A., Barat, J., y Albors, A. (2016). Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Valencia, España: Universitat Politècnica de València. Recuperado de [https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/e8b523c5-4970-4ae6-b2a3-86f576e81359/TOC\\_4092\\_02\\_01.pdf?guest=true](https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/e8b523c5-4970-4ae6-b2a3-86f576e81359/TOC_4092_02_01.pdf?guest=true)
- Field, A. (2013). Descubriendo estadísticas utilizando R (4.a ed.). Londres: SAGE Publications.
- Garzón, G. (2008). Las antocianinas como colorantes naturales y compuestos bioactivos: revisión. *Acta Biológica Colombiana*, 13(3). Recuperado de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-548X2008000300002#:~:text=Las%20antocianinas%20son%20pigmentos%20](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-548X2008000300002#:~:text=Las%20antocianinas%20son%20pigmentos%20)

- Gascón, A. (2014). Determinación de condiciones de secado de frutas confitadas para su uso como ingrediente alimentario [Tesis de maestría, Universidad de Zaragoza]. Recuperado de <https://zaguan.unizar.es/record/14962/files/TAZ-TFM-2014-250.pdf>
- Giraldo, A., et al. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y modelo matemático para pulpa de cupuacu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Ciencia y tecnología de alimentos*, 30(1), 179-182. Recuperado de <https://www.scielo.br/j/cta/a/HT4CM6wN7jD9Wnh7kSSHyhF/?format=pdfylang=es>
- González-Martín, M., Jiménez-Martínez, J., y López-López, M. (2022). Eficiencia energética de los secadores de bandejas para alimentos. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 23(1), 1-10.
- Green Climate Fund. (s.f.). Eficiencia energética para la industria y los aparatos eléctricos. Directrices técnicas del proceso de aprobación simplificado (SAP). Recuperado de <https://www.greenclimate.fund/sites/default/files/document/directrices-te-cnicas-del-sap-eficiencia-energe-tica-para-la-industria-y-los-aparatos-ele-ctricos.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2022). Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT). Guatemala: INE.
- IPCC. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Kronen. (s.f.). Cortadora de lechugas y verduras KSM 100. Recuperado de <https://www.kronen.eu/es/soluciones/cortadora-de-lechugas-y-verduras-ksm-100>
- Kronen. (s.f.). Empacadora MINI. Recuperado de <https://www.kronen.eu/es/soluciones/empacadora-mini>
- Kronen. (s.f.). Lavadora de burbujas por batch DS1000 mobil. Recuperado de <https://www.kronen.eu/es/soluciones/lavadora-de-burbujas-por-lotes-ds1000-mobil>
- López, C., y Sánchez, M. (2020). Efecto de la temperatura y la humedad relativa del aire en la eficiencia de un secador de bandejas para el secado de uvas. *Revista de Investigación en Ingeniería*, 25(1), 19-28.
- López, L., Cárdenas, A., y Gelves, R. (2013). Evaluación de pretratamiento químicos para la hidrólisis enzimática de residuos lignocelulósicos de yuca (*Manihot esculenta* Crantz). *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 69(N/A). Recuperado de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-62302013000400025](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302013000400025)
- Miller, J., y Miller, N. (1998). Estadística para química analítica. Inglaterra: Addison-Wesley. Recuperado de <https://sisoyomismo.files.wordpress.com/2012/07/miller-j-c-estadistica-para-quimica-analitica.pdf>
- Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (MSPAS). (2022). Encuesta Nacional de Salud Materno Infantil y Nutrición (ENSMIN). Guatemala: MSPAS.
- Monterroso, R., y Cifuentes, J. (s.f.). Conceptos de energía, eficiencia, eficiencia de energía, conversión de energía, conservación de la energía y uso eficiente de la energía. Universidad de San Carlos Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/4471/1/Conceptos%20de%20Energ%C3%ADa%2C%20eficiencia%2C%20eficiencia%20energ%C3%A9tica%2C%20conversi%C3%B3n%20de%20energ%C3%ADa%2C%20conservaci%C3%B3n%20de%20la%20energ%C3%ADa%20y%20uso%20eficiente%20de%20la%20energ%C3%ADa.pdf>
- Muñoz, M. M., y Vicente, A. (2000). Drying of fruits and vegetables. *Drying Technology*, 18(2), 159-202.
- Nowacka, M., y Wedzik, M. (2016). Efecto del tratamiento con ultrasonido en la microestructura, color y contenido de carotenoides en tejido de zanahoria fresca y seca. *Applied Acoustics*, 103, 163-171.

- Ohaco, E., et al. (2011). Pretratamientos para acelerar el secado de frutos de rosa mosqueta. *Presencia*, (56), 34-37. Recuperado de <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-mosqueta.pdf>
- Parra, A., Sánchez, L., y Barragán, C. (1998). Características físicas y fisiológicas de la pera variedad Triunfo de Viena (*Pyrus commnis* L). *Revista Ingeniería e Investigación*, (41), 33-44.
- Romero, I., Díaz, V., y Aguirre, A. (2016). Fortalecimiento de la cadena de valor de los snacks nutritivos con base en fruta deshidratada en El Salvador. CEPAL, ONU. Recuperado de [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40251/S1600668\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40251/S1600668_es.pdf)
- RTCA 67.04.50:17. (2017). Alimentos. Criterios microbiológicos para la inocuidad de los alimentos. Reglamento Técnico Centroamericano. Recuperado de [https://www.wto.org/spanish/tratop\\_s/sps\\_s/17\\_2504\\_00\\_s.pdf](https://www.wto.org/spanish/tratop_s/sps_s/17_2504_00_s.pdf)
- Salazar, P. (2007). El tiempo de secado y la disminución de la crujencia en hojuelas de manzana desecadas producidas en el laboratorio de procesamiento de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos de la Universidad Técnica de Ambato. [Proyecto de investigación científica, Universidad Técnica de Ambato]. Recuperado de <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/3394/3/PAL146.pdf>
- Seipel, M., et al. (2009). Características fisicoquímicas de los frutos de tres variedades de manzanas cultivadas en la región Centro-Este de la provincia de Santa Fe. *Revista FAVE*, 8(1).
- Serrano, M. A., Gómez-Limón, P., y Fernández-López, A. (2016). Frutas deshidratadas: una alternativa saludable para la alimentación. *Nutrición Hospitalaria*, 32(2), 569-576.
- Smith, J., Van Ness, H., y Abbott, M. (2005). Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química. México: McGraw Hill.
- Soto, R. (2013). Influencia de la temperatura en la cinética de secado, difusividad efectiva y calidad de lámina de frutas. [Tesis de grado, Universidad del Centro del Perú]. Recuperado de <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/2674/Soto%20Ramos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Treybal, R. (1988). Operaciones de Transferencia de Masa. México: McGraw Hill.

## XII. Anexos

### Anexo A: Referencias

En este anexo, se describió cada uno de los equipos y la cristalería utilizada para la experimentación para que se tenga de referencia, así como los datos fisicoquímicos utilizados para los cálculos y la obtención de los resultados, la información se presenta en la Tabla 13 y 14.

**Tabla 13.**

*Información de equipo y cristalería utilizados para la realización de la experimentación*

Equipo/Instrumento	Marca	Modelo	Rango	Incertidumbre
Higrómetro	EXTECH	RH101	-	0.01% HR
Vernier digital	TRUPER	-	0-150 mm	0.005 mm
Anemómetro	CE	-	-	0.05 m/s
Termómetro infrarrojo	FLUKE	59 mini	-18°C a 275°C	0.01 °C
Balanza analítica	OHAUS	MB120	120-0.00001	0.00005
Balanza	OHAUS	3000XTREME	-	0.05
Balanza de humedad	OHAUS	MB120	-	0.01% MC
Termocupla	Brewferm	-	-40°C a 200°C	0.01°C
Secador de bandejas	Precision Quincy	EC-404-6	-	-
Refractómetro portátil	Halthen	RHB - 90 CON ATC	1-100°	0.5°
Beaker	Kimax	-	10-260 mL	±5 mL
Beaker	Kimax	-	10-600 mL	±5 mL
Erlenmeyer	Pyrex	-	10-250 mL	±5 mL
Balón aforado	Pyrex	-	-	±0.1 mL
Bureta graduada	-	-	0-50 mL	±0.01 mL

*Nota:* La información de Esta Tabla se utilizó principalmente para el cálculo de propagación de error de los resultados y datos calculados. Elaboración propia.

**Tabla 14.**

*Datos fisicoquímicos de los compuestos analizados en la experimentación*

Aspecto	Compuesto	Valor y unidades	Referencia
Densidad	Aire	1.29 kg/m <sup>3</sup>	Smith, Van Ness y Abbott, 2005
Densidad	Agua	1.001 kg/m <sup>3</sup>	Smith, Van Ness y Abbott, 2005
Densidad	Solución NaOH 0.1 N	1.005 kg/m <sup>3</sup>	Smith, Van Ness y Abbott, 2005
Calor de vaporización	Agua	226 kJ/kg	Smith, Van Ness y Abbott, 2005
Calor específico	Manzana	3.65 kJ/kg°C	Smith, Van Ness y Abbott, 2005
Calor específico	Agua	4.18 kJ/kg°C	Smith, Van Ness y Abbott, 2005
Calor específico	Aire	1.005 kJ/kg°C	Smith, Van Ness y Abbott, 2005

*Nota:* Estos datos se utilizaron para los cálculos del balance de masa y energía de cada una de las corridas. Elaboración propia.

## Anexo B: Cálculos de muestra estadísticos

### Cálculo 1: Promedio estadístico

Esta ecuación se utilizó para la determinación de promedio de masa de manzanas frescas.

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Donde  $x_i$  representa la masa individual de cada uno de los datos y  $n$  el número de datos

Se procede al ejemplo de aplicación:

$$\bar{X} = \frac{189.2 \text{ g} + 184.9 \text{ g} + 181.3 \text{ g} + 171.6 \text{ g} + 187.8 \text{ g} + 183.6 \text{ g} + 163.4 \text{ g} + 179.0 \text{ g}}{8} = 180.1 \text{ g}$$

*Nota:* Se utilizó los datos de la Tabla 14 de 8 muestras de manzana gala. Este cálculo se repitió en todos los promedios de los resultados de caracterización de materia prima y en los cálculos de la curva de secado.

### Cálculo 2: Desviación estándar

Esta ecuación se utilizó para la determinación de la desviación estándar de masa de manzanas frescas

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{X})^2}{n}}$$

Donde  $\sigma$  representa la desviación estándar

Se procede al ejemplo de aplicación:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(189.2-180.1)^2 + (184.9-180.1)^2 + (181.3-180.1)^2 + (171.6-180.1)^2 + (187.8-180.1)^2 + (183.6-180.1)^2 + (163.4-180.1)^2 + (179.0-180.1)^2}{8}} = \pm 8.7 \text{ g}$$

*Nota:* Se utilizó los datos de la Tabla 14 de 8 muestras de manzana gala. Este cálculo se repitió en todos los promedios de los resultados de caracterización de materia prima y en los cálculos de la curva de secado.

### Cálculo 3: Determinación de conclusión de prueba ANOVA

Esta ecuación se utilizó para la comparación pérdida de masa promedio entre las 6 muestras

$$F_{\text{Crítico}} > F = \text{Hipótesis aceptada}$$

$$F_{\text{Crítico}} < F = \text{Hipótesis rechazada}$$

Se procede al ejemplo de aplicación:

$$2.695 < 5.342 = \text{Hipótesis rechazada}$$

*Nota:* Este cálculo se repitió para todas las pruebas realizadas tomando en cuenta el valor de alfa de 0.1 y se realizó por medio del análisis de datos de Excel por análisis de varianza de un factor. Tanto para las tres diferentes temperaturas como para los pretratamientos.

## Anexo C: Cálculo de muestra

En este apartado se encontrará el repertorio de ecuaciones utilizadas para los cálculos del trabajo de investigación, junto a un ejemplo de aplicación para las ecuaciones que aplique. Estas ecuaciones se utilizaron con los datos originales y los datos calculados que se describirá en los apartados de Anexos E y F.

### Cálculo 4: Relación de diámetros de manzanas

Haciendo referencia a la Ecuación 7 descrita anteriormente (Apartado 2 de metodología):

$$\text{Relación} = \frac{\text{Diámetro mayor}}{\text{Diámetro menor}}$$

Se procede al cálculo:

$$\text{Relación} = \frac{74.87 \text{ cm}}{58.9 \text{ cm}} = 1.27$$

*Nota:* Este cálculo se repitió para cada una de las muestras tomadas y el valor reportado es el promedio de las 4 muestras. Se utilizó los datos de la Tabla 15 y Tabla 16.

### Cálculo 5: Porcentaje de masa correspondiente a cáscara y corazón de manzanas

Para determinar el porcentaje de una muestra sobre la muestra total se utiliza la Ecuación 19 que se describe a continuación:

$$\text{Porcentaje} = \frac{\text{masa de cáscaras y corazón total}}{\text{masa de manzanas completas}} * 100 \quad (19)$$

Se procede al cálculo:

$$\text{Porcentaje} = \frac{157.7 \text{ g}}{706.0 \text{ g}} * 100 = 22.34\%$$

*Nota:* Este cálculo se realizó únicamente para efectos de comparación de masas de materia prima útil y materia prima que no se utilizó para la extracción de jugo. Este se realizó con los datos de la Tabla 17, haciendo la sumatoria de las cuatro mediciones y dividiendo el valor de la masa de cáscara y corazón total de las muestras.

### Cálculo 6: Jugosidad de manzanas

Para determinar la jugosidad se utilizó la Ecuación 12 descrita anteriormente (Apartado 8 de la metodología):

$$\text{Jugosidad} = \frac{\text{masa de jugo extraído}}{\text{masa de pulpa}}$$

Se procede al cálculo

$$\text{Jugosidad} = \frac{50.6 \text{ g}}{138.5 \text{ g}} = 0.37 \text{ g/g}$$

*Nota:* Se utilizó los datos de las Tablas 17 y 19, para la primera muestra. Este cálculo se repitió para cada una de las muestras tomadas y el valor reportado es el promedio de las 4 muestras.

**Cálculo 7: Acidez titulable (contenido de ácido málico)**

Para determinar la acidez titulable se utilizó la Ecuación 13 descrita anteriormente (Apartado 8 de la metodología):

$$\% \text{ ácido} = \frac{\text{Vol NaOH utilizado} * \text{Normalidad solución} * \text{Factor ácido málico}}{\text{masa de la muestra}} * 100 \quad (13)$$

El factor de ácido málico corresponde a 0.067

Se procede al cálculo

$$\% \text{ ácido} = \frac{11.5 \text{ mL} * 0.1 \text{ N} * 0.067}{15.0 \text{ g}} * 100 = 0.514\%$$

*Nota:* Se utilizó los datos de la primera muestra de las Tablas 22 y 23 para la representación del cálculo. Este cálculo se repitió para cada una de las muestras tomadas y el valor reportado es el promedio de las 4 muestras.

**Cálculo 8: Agua perdida de secado**

Para determinar la pérdida de agua en la muestra se utiliza la Ecuación 20:

$$\text{Agua perdida} = \text{masa inicial sólido} - \text{masa final sólido} \quad (20)$$

Se procede al cálculo

$$\text{Agua perdida} = 6.3715 \text{ g} - 5.6013 \text{ g} = 0.7702 \text{ g}$$

*Nota:* Se realizó este cálculo con la masa de la muestra 1 del secado 3, en el tiempo 0 y en el tiempo 10 min, los datos utilizando están en la Tabla 42. Este cálculo se repitió para cada una de las muestras tomadas en cada intervalo de tiempo para cada una de las corridas de secado se muestra en la Tabla 114.

**Cálculo 9: Contenido de agua en muestras de secado**

Para la primera muestra, se realizó la siguiente ecuación para determinar el contenido de agua inicial de la muestra en tiempo 0. Para eso se utiliza la Ecuación 13 donde describe el contenido de agua en muestra inicial:

$$\text{Contenido de agua} = \% \text{ Humedad sólido} * \text{masa de sólido inicial}$$

Se procede al cálculo:

$$\text{Contenido de agua} = 85.20\% * 6.315 \text{ g} = 5.429 \text{ g de agua}$$

Para los siguientes intervalos de tiempo se obtuvo por la Ecuación 14 para el contenido de agua en tiempo n

$$\text{Contenido de agua} = \text{Contenido de agua tiempo 1} - \text{Agua perdida en tiempo 2}$$

Se procede al cálculo:

$$\text{Contenido de agua} = 5.429 \text{ g} - 0.7702 \text{ g} = 4.658 \text{ g de agua}$$

*Nota:* Se utilizó los datos de la Tabla 42 y la Tabla 114, del intervalo de 10 min a 20 min del secado 3 para la muestra del cálculo. Este cálculo se repitió para cada una de las muestras tomadas en cada intervalo de tiempo para cada una de las corridas de secado.

### Cálculo 10: Humedad base húmeda del sólido

Para determinar la humedad base húmeda de un sólido se utiliza la Ecuación 2 descrita anteriormente (Apartado J del marco teórico):

$$\text{Humedad base húmeda} = \frac{\text{Contenido de agua}}{\text{masa de muestra}} * 100$$

Se procedió al cálculo:

$$\text{Humedad base húmeda} = \frac{5.429 \text{ g}}{6.3715 \text{ g}} * 100 = 85.20\%$$

*Nota:* Se utilizó los datos de Tabla 42 y 115, en el tiempo 0 del secado 3. Este cálculo se repitió para cada una de las muestras tomadas en cada intervalo de tiempo para cada una de las corridas de secado

### Cálculo 11: Humedad base seca del sólido a partir de la humedad base húmeda

Para determinar la humedad base húmeda de un sólido se utiliza la Ecuación 3 descrita anteriormente (Apartado J del marco teórico):

$$\text{Humedad base seca} = \frac{\text{kg humedad}}{\text{kg sólido seco}} = \frac{X_h}{1-X_h}$$

Donde  $X_h$  corresponde a humedad bases húmeda

Se procedió al cálculo:

$$\text{Humedad base seca} = \frac{85.20\%}{1-85.20\%} = 5.757 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg sólido seco}}$$

*Nota:* Este cálculo se realizó con los datos de la Tabla 116, en el tiempo 0 del secado 3. Este cálculo se repitió para cada una de las muestras tomadas en cada intervalo de tiempo para cada una de las corridas de secado

### Cálculo 12: Área superficial de muestras de rodaja de manzana

Para determinar el área superficial de un cilindro se utilizó la Ecuación 15:

$$A = 2\pi * r * h + 2\pi * r^2 \quad (15)$$

Para determinar el área de una rodaja de manzana supuesta como un cilindro se utilizó la Ecuación 16:

$$A = 2\pi * \text{radio mayor} * \text{grosor de rodaja} + 2\pi * \text{radio menor}^2 \quad (16)$$

Se procedió al cálculo:

$$A = 2\pi * \left(\frac{61.12}{2}\right) * 2.34 + 2\pi * \left(\frac{54.27}{2}\right)^2 = 5076.31 \text{ mm}^2 * 0.00001 = 5.08 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

*Nota:* Se realizó con los datos de la muestra 1 del secado 3 de la Tabla 41. Este cálculo se repitió para cada una de las muestras tomadas en cada corrida de secado. Se tomó como referencia el área superficial de un cilindro.

**Cálculo 13: Relación de sólido seco sobre área superficial de muestras**

Para determinar la relación sólido seco/ área superficial se utilizó la Ecuación 17:

$$\frac{SS}{A} = \frac{\text{Sólido seco}}{\text{Área superficial}} \quad (17)$$

Se procedió al cálculo

$$\frac{\text{Sólido seco}}{\text{Área superficial}} = \frac{0.0009 \text{ kg}}{5.08 * 10^{-3} \text{ m}^2} = 0.1858 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

*Nota:* Este se realizó con datos de la muestra 1 del secado 3 de la Tabla 112. Este cálculo se repitió para cada una de las muestras de cada una de las corridas de secado.

**Cálculo 14: velocidad de secado o flujo de transferencia de masa (kg/min m<sup>2</sup>)**

Para determinar la velocidad de secado se utilizó la Ecuación 5 descrita anteriormente (Apartado J del marco teórico):

$$N = \frac{\text{Área superficial}}{\text{Sólido seco}} * \frac{\text{Humedad base seca tiempo 1} - \text{Humedad base seca tiempo 2}}{\text{tiempo 2} - \text{tiempo 1}}$$

Se procedió al cálculo:

$$N = \frac{0.0009 \text{ kg}}{5.08 * 10^{-3} \text{ m}^2} * \frac{5.757 - 4.868}{10 \text{ min} - 0 \text{ min}} = 0.0152 \frac{\text{kg}}{\text{min} * \text{m}^2}$$

*Nota:* Este se realizó con los datos de la Tabla 117 en el intervalo de 0 a 10 min y con los datos de la Tabla 113 para la relación sólido seco/área superficial, de la muestra 1. Este cálculo se repitió para cada una de las muestras tomadas en cada intervalo de tiempo para cada una de las corridas de secado.

Los siguientes cálculos se realizaron para cada una de las corridas experimentales.

**Cálculo 15: Flujo másico del aire en secado**

Para determinar el flujo de aire a partir de área y velocidad se utilizó la Ecuación 18:

$$A = \rho * \text{Área} * \text{Vel} \quad (18)$$

Donde

$\rho$  es la densidad de aire en kg/m<sup>3</sup>

Área corresponde al área de salida del aire entrante del secador

Vel: velocidad aire de entrada del secador

A es el flujo de aire en kg/h

Se procedió al cálculo:

$$A = \frac{1.29 \text{ kg}}{\text{m}^3} * 0.035 \text{ m}^2 * 3.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hora}} = 568.89 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

*Nota:* Este dato se realizó para los datos del secado 11, de la Tabla 108, pero se realizó con la velocidad de salida de aire medida en cada una de las corridas. Este cálculo se realizó para cada uno de los secados utilizando 0.035 m<sup>2</sup> y 1.29 kg/m<sup>3</sup> constantes.

### Cálculo 16: Balance de masa de secado

Para determinar el balance de masa de secado se utilizó la Ecuación 10 descrita anteriormente (Apartado 8 de la metodología):

**Entradas=Salidas**

$$S_1 * X_1 + A * Y_1 = S_2 * X_2 + A * Y_2$$

$$Y_2 = \frac{S_1 * X_1 + A * Y_1 - S_2 * X_2}{A}$$

S: Flujo másico del sólido húmedo en kg/h

X: humedad base seca del sólido en kg de agua/kg de sólido seco

A: Flujo másico del aire utilizado en kg/h

Y: Humedad base seca del aire en kg de vapor/kg de aire seco

Ta: Temperatura del aire en °C

Ts: Temperatura del sólido en °C

Se procedió al cálculo:

$$Y_2 = \frac{0.172 \frac{\text{kg rodajas}}{\text{h}} * 6.14 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg ss}} + 568.89 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 0.075 \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg aire seco}} - 0.027 \frac{\text{kg rodajas}}{\text{h}} * 0.047 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg ss}}}{568.89 \frac{\text{kg}}{\text{h}}} = 0.077 \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg aire seco}}$$

*Nota:* Para este cálculo se utilizó los datos del secado 10 utilizando los datos de la Tabla 182. Este cálculo se realizó para todas las corridas del secado con sus respectivas condiciones y datos.

### Cálculo 17: Entalpía de aire de secado

Para determinar la entalpía de aire de secado se utilizó la Ecuación 12 descrita anteriormente (Apartado 8 de la metodología):

$$H_a = c_s (T_a - T_0) + Y * H_1$$

Y la Ecuación 13 mencionada anteriormente (Apartado 8 de la metodología), también descrita:

$$c_s = 1.005 + 1.88Y$$

Se procedió a realizar el cálculo:

$$c_{s1} = 1.005 + 1.88Y_1 = 1.005 + 1.88 * 0.075 \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg aire seco}} = 1.146 \frac{\text{kJ}}{\text{kg de aire seco}}$$

$$H_{a1} = 1.146 \frac{\text{kJ}}{\text{kg aire seco}} (67.2^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) + 0.075 \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg aire seco}} * 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 246.51 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

*Nota:* Este cálculo se realizó con la información del secado 10 en la Tabla 182. Este cálculo se repitió para la salida utilizando los datos y condiciones del aire de la salida del secado.

### Cálculo 18: Entalpía de sólido de secado

Para determinar la entalpía de sólido de secado se utilizó la Ecuación 14 descrita anteriormente (Apartado 8 de la metodología):

$$H_S = C_{ps}(T_s - T_0) + X * C_p(T_s - T_0)$$

Se procedió a realizar el cálculo:

$$H_{S1} = 3.65 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} (21.4^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) + 6.14 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg sólido seco}} * 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} (21.4^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = 627.60 \text{ kJ/kg}$$

*Nota:* Este cálculo se realizó con la información del secado 10 en la Tabla 182. Este cálculo se repitió para las condiciones de salida del sólido en el secado.

### Cálculo 19: Calor perdido al ambiente de secado

Para determinar el calor perdido al ambiente desde una superficie de determinada área se utilizó la Ecuación 19:

$$Q_{\text{perdido}} = \alpha * \text{Área} * (T_{\text{superficie}} - T_{\text{ambiente}}) \quad (19)$$

Donde

Alfa representa coeficiente de transmisión de calor en  $\text{kJ}/^\circ\text{C m}^2 \text{ h}$

Área es la superficie de la cámara de aire caliente expuesta ( $\text{m}^2$ )

Para el factor alfa, se debe tomar en cuenta que depende de la velocidad del aire, si es menor a 5 m/s entonces se usa la primera ecuación y si es mayor, se utiliza la segunda. Se tomó en cuenta que la superficie del secado se tiene un 85% de aislamiento al ambiente.

$$\alpha = 5 + 3.4 * \text{Vel}$$

$$\alpha = 6.14 * \text{Vel}^{0.78}$$

Se procedió a realizar el cálculo del factor alfa:

$$\alpha = (5 + 3.4 * 3.5) * 25\% = 4.225 \frac{\text{kJ}}{^\circ\text{C m}^2 \text{ h}}$$

Se calculó el área del secador expuesta al ambiente:

$$\text{Área} = 1.8 \text{ m} * 1.8 \text{ m} * 2 + 1.6 \text{ m} * 1.8 \text{ m} * 2 + 1.18 \text{ m} * 1.6 \text{ m} = 14.13 \text{ m}^2$$

El área se calculó a partir de mediciones de las dimensiones del equipo y se utilizó esta información para todos los secados

Y se procedió a realizar el cálculo del calor perdido:

$$Q_{\text{perdido}} = \alpha * \text{Área} * (T_{\text{superficie}} - T_{\text{ambiente}})$$

$$Q_{\text{perdido}} = 4.225 \frac{\text{kJ}}{^\circ\text{C m}^2 \text{ h}} * 14.13 \text{ m}^2 * (62.8^\circ\text{C} - 24.3^\circ\text{C}) = 2,298.09 \text{ kJ/h}$$

*Nota:* Este cálculo se realizó para el secado 10 utilizando los datos de la Tabla 100 y 101. Este cálculo se repitió para cada uno de los secados con sus respectivas condiciones y datos.

### Cálculo 20: Entalpía y temperatura de aire de salida de secado

Para determinar el balance de energía se utilizó la Ecuación 11 descrita anteriormente (Apartado 8 de la metodología):

Entradas=Salidas

$$A * H_{a1} + S_1 * H_{S1} = A * H_{a2} + S_2 * H_{S2} + Q_{\text{perdido}}$$

Despejando la entalpía del aire de salida

$$H_{a2} = \frac{A * H_{a1} + S_1 * H_{S1} - Q_{\text{perdido}} - S_2 * H_{S2}}{A}$$

Se procedió a realizar el cálculo

$$H_{a2} = \frac{568.89 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 246.51 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.17 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 627.60 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 0.027 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 216.20 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2,298.09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{568.89 \text{ kg/h}} = 242.65 \text{ kJ/kg}$$

De la Ecuación 12 (Apartado 8 de la metodología), despejando para la temperatura de aire de salida, se realizó el cálculo:

$$T_{a2} = \frac{H_{a2} - Y_2 * H_1}{c_{s2}} + T_0 = \frac{242.65 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 0.077 \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg aire seco}} * \frac{2260 \text{kJ}}{\text{kg}}}{1.149 \frac{\text{kJ}}{\text{kg aire seco}}} + 0 = 59.99^\circ\text{C}$$

*Nota:* Este cálculo se realizó con datos de la Tabla 182 para el secado 10. Este cálculo se realizó para cada una de las corridas de secado con sus respectivos datos y condiciones.

### Cálculo 21: Calor necesario para calentar aire de secado

Para determinar el calor necesario para calentar aire de secado se utilizó la Ecuación 16 descrita anteriormente (Apartado 8 de la metodología):

$$Q_{\text{in}} = A * c_{p \text{ aire}} * \Delta T \quad (16)$$

Se realizó el cálculo siguiente:

$$Q_{\text{in}} = 568.89 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 1.005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (67.2^\circ\text{C} - 24.3^\circ\text{C}) = 24,527.41 \text{ kJ/kg}$$

*Nota:* Este cálculo se realizó con datos de la Tabla 101 y 182 para el secado 10. Este cálculo se realizó para cada una de las corridas de secado con sus respectivos datos y condiciones.

### Cálculo 22: Calor de secado

Para determinar el calor de secado se utilizó la Ecuación 20:

$$Q_s = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (20)$$

Donde:

Q1 corresponde al calor necesario para calentar la manzana

Q2 calor útil de evaporación

Q3 calor perdido en el aire servido

Qs el calor de secado

Y la Ecuación 21 que describe el calor necesario para calentar un sólido (manzana)

$$Q_1 = S_1 * c_p \text{ manzana} * \Delta T \quad (21)$$

El cálculo correspondiente:

$$Q_1 = 0.172 \frac{\text{kg de rodajas}}{\text{h}} * 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} * (56.2^\circ\text{C} - 21.4^\circ\text{C}) = 25.03 \text{ kJ/h}$$

También la Ecuación 22 que describe el calor útil de evaporación

$$Q_2 = S_1 * X_1 * HI \quad (22)$$

El cálculo correspondiente:

$$Q_2 = 0.172 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 6.14 \frac{\text{kg}}{\text{kg ss}} * 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2388.84 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Y por último la Ecuación 23 que expresa el calor perdido en el aire servido

$$Q_3 = H_{a1} * Y_1 - H_{a2} * Y_2 \quad (23)$$

El cálculo correspondiente:

$$Q_3 = 246.51 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 0.075 - 242.65 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 0.077 \frac{\text{kg}}{\text{kg aire seco}} = 35.81 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Y la sumatoria de los tres calores calculados anteriormente, correspondiendo a la ecuación 28:

$$Q_s = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (28)$$

$$Q_s = 25.03 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} + 2,388.84 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} + 35.81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2,449.68 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

*Nota:* Este cálculo se realizó con datos de la Tabla 182 para el secado 10. Este cálculo se repitió para cada uno de los secados con sus respectivas condiciones y datos.

### **Cálculo 23: Calor total de secado**

Para determinar el calor total de secado se utilizó la Ecuación 24:

$$Q_t = Q_{\text{perdido}} + Q_s \quad (24)$$

Se procedió al cálculo:

$$Q_t = 2,298.09 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} + 2,449.68 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 4,747.78 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

*Nota:* Este cálculo se realizó con la Tabla 183, del secado 10. Este cálculo se repitió para cada uno de los secados con sus respectivas condiciones y datos.

**Cálculo 24: Energía eléctrica consumida secado**

Se utilizó la Ecuación 25 para determinar la energía eléctrica consumida en secado:

$$\text{Energía Eléctrica} = \frac{(\text{Lectura final} - \text{Lectura inicial}) * 3,600 \text{ s}}{\text{Tiempo de secado} * \text{factor de tiempo}} \quad (25)$$

Donde

Las lecturas se obtuvieron en el contador del secador en kWh

El tiempo de secado en h

El factor de tiempo correspondiente al tiempo real de secado de la corrida

Se procedió al cálculo:

$$\text{Energía Eléctrica} = \frac{(31407 \text{ kwh} - 31361 \text{ kwh}) * 3,600 \text{ s}}{3.08 \text{ h} * 1.8} = 29,837.84 \text{ kJ/h}$$

*Nota:* Este cálculo se realizó con los datos del secado 10 de la Tabla 183 y se repitió para cada uno de los secados con sus respectivas condiciones y datos.

**Cálculo 25: Energía total de secado**

Se utilizó la Ecuación 26 para determinar la Energía total:

$$\text{Energía}_{\text{total}} = Q_{\text{in}} + Q_{\text{t}} \quad (26)$$

Se procedió al cálculo

$$\text{Energía}_{\text{total}} = 24,527.41 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} + 4,747.78 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 29,275.19 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

*Nota:* Este cálculo se realizó con los datos del secado 10 de la Tabla 183 y se repitió para cada uno de los secados con sus respectivas condiciones y datos.

**Cálculo 26: Eficiencia de secado de secado 10**

Se utilizó la Ecuación 27 para determinar la eficiencia de secado:

$$\eta_{\text{secado}} = \frac{Q_{\text{T}}}{\text{Energía eléctrica}} \quad (27)$$

Se procedió al cálculo

$$\eta_{\text{secado}} = \frac{4,747.78 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}{29,837.84 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}} * 100\% = 15.91\%$$

*Nota:* Este cálculo se realizó con los datos del secado 10 de la Tabla 183 y se repitió para cada uno de los secados con sus respectivas condiciones y datos.

**Cálculo 27: Consumo calentamiento de aire para secado**

Se determinó el consumo por calentamiento de aire de secado por medio de la Ecuación 28:

$$\text{Consumo}_{\text{calentamiento}} = \frac{Q_{\text{in}}}{\text{Energía eléctrica}} \quad (28)$$

Se procedió al cálculo

$$\text{Consumo}_{\text{calentamiento}} = \frac{24,527.41 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}{29,837.84 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}} * 100\% = 82.20\%$$

*Nota:* Este cálculo se realizó con los datos del secado 10 de la Tabla 183 y se repitió para cada uno de los secados con sus respectivas condiciones y datos.

**Cálculo 28: Eficiencia energética de secado**

Se determinó la eficiencia energética de secado por la Ecuación 29:

$$\eta_{\text{Energética}} = 1 - \text{Consumo}_{\text{calentamiento}} \quad (29)$$

Se procedió al cálculo:

$$\eta_{\text{Energética}} = 1 - 82.20\% = 17.80\%$$

*Nota:* Este cálculo se realizó con los datos del secado 10 de la Tabla 183 y se repitió para cada uno de los secados con sus respectivas condiciones y datos.

**Cálculo 29: Porcentaje de pérdida de masa de secado**

Se determinó el porcentaje de pérdida de masa con la Ecuación 30:

$$\text{Pérdida de masa} = \left( 1 - \frac{\text{Peso inicial de la muestra}}{\text{Peso final de la muestra}} \right) * 100 \quad (30)$$

Se procedió con el cálculo:

$$\text{Pérdida de masa} = \left( 1 - \frac{1.0652 \text{ g}}{6.3715 \text{ g}} \right) * 100 = 83.28\%$$

*Nota:* Este cálculo se realizó con los datos de la primera muestra del secado 3, con los datos de la Tabla 42. Este cálculo se repitió para cada uno de los secados con sus respectivas condiciones y datos.

Los cálculos específicos de la línea de producción:

**Cálculo 30: determinación de masa de aire línea de producción**

Modificando la Ecuación 26 (Cálculo 15), para obtener la masa de aire se tiene:

$$A = \rho * \text{Área} * \text{Vel} * \text{tiempo de secado}$$

$$A = \frac{1.29 \text{ kg}}{\text{m}^3} * 0.035 \text{ m}^2 * 3 \frac{\text{m}}{\text{s}} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hora}} * 3 \text{ horas secado} = 1462.86 \text{ kg aire}$$

*Nota:* Este cálculo se realizó con los datos de las condiciones de operación supuestos colocados en la Tabla 194 pero se realizó con la velocidad de salida de aire medida en cada una de las corridas. Este cálculo se realizó para cada uno de los secados utilizando 0.035 m<sup>2</sup> y 1.29 kg/m<sup>3</sup> constantes.

### Cálculo 31: Balance de masa de secado

Para determinar el balance de masa de secado se utilizó la Ecuación 10 descrita anteriormente (Apartado 8 de la metodología):

**Entradas=Salidas**

$$S_1 * X_1 + A * Y_1 = S_2 * X_2 + A * Y_2$$

$$Y_2 = \frac{S_1 * X_1 + A * Y_1 - S_2 * X_2}{A}$$

Se procedió al cálculo:

$$Y_2 = \frac{4.047 \frac{\text{kg rodajas}}{\text{lote}} * 8.21 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg ss}} + 1462.86 \frac{\text{kg}}{\text{lote}} * 0.043 \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg aire seco}} - 0.49 \frac{\text{kg rodajas}}{\text{lote}} * 0.10 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg ss}}}{1462.86 \frac{\text{kg}}{\text{lote}}} = 0.066 \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg aire seco}}$$

*Nota:* Para este cálculo se utilizó los datos del secado de la línea de producción utilizando los datos de la Tabla de balance de masa de la Tabla 10. Este cálculo se realizó para todas las corridas del secado con sus respectivas condiciones y datos.

### Cálculo 32: determinación de temperatura final de aire de secado, balance de energía línea de producción

Para determinar el balance de energía línea de producción se utilizó la Ecuación 31:

$$-Q_{\text{entrega aire}} = Q_1 + Q_2 + Q_4 \quad (31)$$

Donde:

Q entrega aire corresponde al calor que debe entregar el aire de secado a sus respectivas condiciones

Como primer paso se debe obtener el cálculo de Q1 descrito con la Ecuación 29 (Cálculo 22) para la línea de producción tomando en cuenta la operación batch

$$Q_1 = \frac{3.94 \text{ kg de rodajas}}{\text{lote}} * 3.65 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} * (57^\circ\text{C} - 24^\circ\text{C}) = 474.88 \text{ kJ}$$

Para encontrar Q2, se procede a utilizar la Ecuación 30 (Cálculo 22), encontrando el calor de evaporación que se traduce a, tomando en cuenta la operación batch:

$$Q_2 = (S_1 - S_2) * Hl$$

$$Q_2 = (4.04 - 0.49) \text{ kg agua} * 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg agua}} = 8,044.92 \frac{\text{kJ}}{\text{lote}}$$

Luego se realiza el mismo Cálculo 19 para las condiciones de la línea de operación encontrando Q4:

Se procedió a realizar el cálculo del factor alfa:

$$\alpha = (5 + 3.4 * 3) * 25\% = 3.8 \frac{\text{kJ}}{^\circ\text{C m}^2 * \text{lote}}$$

Y se procedió a realizar el cálculo del calor perdido:

$$Q_{\text{perdido}} = \alpha * \text{Área} * (T_{\text{superficie}} - T_{\text{ambiente}})$$

$$Q_{\text{perdido}} = 3.8 \frac{\text{kJ}}{\text{°C m}^2 \cdot \text{lote}} * 14.13 \text{m}^2 * (57^\circ\text{C} - 24^\circ\text{C}) = 1771.65 \text{ kJ/lote}$$

Tomando en cuenta la Ecuación 16 (Apartado 8 de la metodología), pero para calcular la energía de entrega del aire en el secador se obtiene:

$$-Q_{\text{entrega aire}} = A * C_{p_a} * (T_{a_1} - T_{a_2})$$

Despejando en la Ecuación 39 para delta de temperatura del aire se obtiene:

$$(T_{a_1} - T_{a_2}) = \frac{(Q_1 + Q_2 + Q_4)}{A * C_{p_a}} \quad (39)$$

Despejando para  $T_{a_2}$

$$T_{a_2} = -\frac{(Q_1 + Q_2 + Q_4)}{A * C_{p_a}} + T_{a_1}$$

Procediendo con el cálculo:

$$T_{a_2} = T_{a_1} - \frac{(Q_1 + Q_2 + Q_4)}{A * C_{p_a}}$$

$$T_{a_2} = 65^\circ\text{C} - \frac{(487.46 + 8044.92 + 1771.65) \text{kJ}}{1462.86 \text{ kg} * 1.085 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 58.47^\circ\text{C}$$

*Nota:* Para este cálculo se utilizó los datos del secado de la línea de producción utilizando los datos de la Tabla de balance de masa de la Tabla 10 y balance de energía 11. Este cálculo se realizó para todas las corridas del secado con sus respectivas condiciones y datos.

### **Cálculo 33: Balance de energía del calentador eléctrico con recirculación**

Según los datos de placa del equipo utilizado, se tendría un sistema de purga cada 2.6 min del secado. A partir de este dato se planteó la razón de purga respecto al tiempo total obteniendo 0.69 del aire sería purgado mientras que el 0.31 sería retenido o de recirculación.

$$Q_{\text{in}} = m_a * c_{p_a} * \Delta T - m_a * \text{razón recirculación} * c_{p_a} * \Delta T_{\text{recirculado}}$$

Realizando el cálculo:

$$Q_{\text{in}} = 1462.86 \text{ kg} * \frac{1.005 \text{kJ}}{\text{kg}} * (65^\circ\text{C} - 24^\circ\text{C}) - 1462.86 \text{ kg} * 0.31 * 1.005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * (65^\circ\text{C} - 58.47^\circ\text{C}) = 15,592.22 \frac{\text{kJ}}{\text{lote}}$$

*Nota:* Para este cálculo se utilizó los datos del secado de la línea de producción utilizando los datos de la Tabla de balance de masa de la Tabla 10 y balance de energía 11. Este cálculo se realizó para todas las corridas del secado con sus respectivas condiciones y datos.

### **Cálculo 34: Determinación de proporción de consumo de energía en secado**

Se procedió a realizar la suma del consumo total de energía del proceso de secado

$$Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2 + Q_4 + Q_{\text{in}}$$

Obteniendo como resultado:

$$Q_{\text{total}} = (487.46 + 8044.92 + 1771.65 + 15,592) \text{kJ} = 25,896.25 \frac{\text{kJ}}{\text{lote}}$$

Obteniendo la razón:

$$\frac{Q_s}{Q_t} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_t} = \frac{487.46 \text{ kJ} + 8044.92 \text{ kJ}}{25,896.25 \text{ kJ}} = 0.33$$

*Nota:* Para este cálculo se utilizó los datos del secado de la línea de producción utilizando los datos de la Tabla de balance de masa de la Tabla 10 y balance de energía 11. Este cálculo se realizó para todas las corridas del secado con sus respectivas condiciones y datos.

### **Cálculo 35: Determinación de energía consumida por los equipos propuestos para la línea de producción**

Tomando en cuenta el caso de lavadora se obtuvo la potencia del equipo de los datos de las especificaciones técnicas del equipo siendo 0.37 kW. Se supuso un tiempo de uso de equipo de 30 min

Para determinar el consumo de energía eléctrica de un equipo se utilizó la Ecuación 32:

$$\text{Energía eléctrica} = \text{Potencia} * \text{tiempo} \quad (32)$$

Procediendo al de la lavadora

$$\text{Energía eléctrica} = 0.37 \text{ kW} * 1800 \text{ s} = 666 \text{ kJ}$$

*Nota:* Este cálculo se realizó para cada uno de los equipos propuestos en la línea de producción en la Tabla 12.

## Anexo D: Incertidumbre

Las ecuaciones utilizadas para calcular las incertidumbres respectivas a cada resultado calculado fueron las siguientes:

Según Miller y Miller (1998) la incertidumbre de una suma se describe con la Ecuación 33:

$$S_y = \sqrt{(S_a)^2 + (S_b)^2 + \dots + (S_n)^2} \quad (33)$$

Y incertidumbre de una división y multiplicación por la Ecuación 34:

$$\frac{S_y}{Y} = \sqrt{\left(\frac{S_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{S_b}{b}\right)^2 + \dots + \left(\frac{S_n}{n}\right)^2} \quad (34)$$

Las incertidumbres se encuentran en la propagación de error de cada dato calculado en el apartado F de este apéndice.

## Anexo E: Datos originales de la experimentación

Este anexo abarca todos los datos experimentales obtenidos en la realización del trabajo de investigación, comenzando por los datos referentes a la caracterización de la materia prima, seguido por los datos obtenidos de las diferentes corridas del secado en el secador de bandejas y por último los datos obtenidos de la caracterización del producto terminado. Esta experimentación se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad el Valle de Guatemala, en la Ciudad de Guatemala a las condiciones indicadas en cada una de las tablas, respectivamente.

**Tabla 15.**

*Masa de manzanas gala frescas y sin pelar*

Muestra	Medición (g)	Error ( $\pm$ g)
1	189.2	0.05
2	184.9	0.05
3	181.3	0.05
4	171.6	0.05
5	187.8	0.05
6	183.6	0.05
7	163.4	0.05
8	179.0	0.05

*Nota:* Se determinó la masa de las manzanas por medio de la Balanza analítica Ohaus, pesando una por una las manzanas frescas, lavadas y con cáscara. Condiciones: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 16.**

*Diámetro ecuatorial manzanas gala frescas y sin pelar*

Muestra	Medición (mm)	Error ( $\pm$ mm)
1	72.51	0.005
2	74.54	0.005
3	76.59	0.005
4	73.55	0.005

*Nota:* Se determinó el diámetro ecuatorial de las manzanas por medio de un vernier digital marca Truper, se colocó en el punto más céntrico de la manzana y el mayor de estas. Condiciones: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 17.**

*Diámetro polar manzanas Gala frescas y sin pelar*

Muestra	Medición (mm)	Error ( $\pm$ mm)
1	72.12	0.005
2	66.76	0.005
3	67.95	0.005
4	65.05	0.005

*Nota:* Se determinó el diámetro ecuatorial de las manzanas por medio de un vernier digital marca Truper, se colocó en el punto más céntrico de la manzana de forma polar (del tallo al centro inferior). Condiciones: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 18.**

*Masa manzanas gala peladas y descorazonadas*

Muestra	Medición (g)	Error ( $\pm$ g)
1	138.5	0.05
2	130.5	0.05
3	148.9	0.05
4	130.4	0.05

*Nota:* Se determinó la masa de las manzanas peladas y descorazonadas utilizando la balanza analítica Ohaus. Se utilizó un pelador y un descorazonador de cocina. Condiciones: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 19.**

*Datos para relación de diámetros manzanas gala*

Muestra	Diámetro mayor (mm)	Error Diámetro mayor ( $\pm$ mm)	Diámetro menor (mm)	Error Diámetro menor ( $\pm$ mm)
1	74.87	0.0005	58.9	0.005
2	76.23	0.0005	62.36	0.005
3	71.23	0.0005	71.23	0.005
4	78.20	0.0005	71.46	0.005

*Nota:* Se utilizó el vernier digital marca Truper para determinar el diámetro mayor y diámetro menor de forma ecuatorial de las manzanas. Condiciones: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 20.**

*Masa jugo extraído de manzana gala*

Muestra	Medición (g)	Error ( $\pm$ g)
1	50.6	0.05
2	46.8	0.05
3	59.9	0.05
4	65.0	0.05

*Nota:* Se utilizó un extractor de jugo de cocina para separar el jugo de las manzanas y luego se pesó el líquido utilizando una balanza analítica marca Ohaus para determinar la cantidad de jugo extraído. Condiciones: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 21.**

*Cantidad de jugo extraído por manzana gala*

Muestra	Medición (mL)	Error ( $\pm$ mL)
1	50	0.5
2	48	0.5
3	52	0.5
4	54	0.5

*Nota:* Se utilizó un extractor de jugo de cocina para separar el jugo de las manzanas y luego se midió el volumen del líquido utilizando una probeta marca Pirex para determinar la cantidad de jugo extraído. Condiciones: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 22.**

*Sólidos solubles (grados Brix) de jugo de manzana gala*

Muestra	Grados Brix	Error ( $\pm$ )
1	12.5	0.05
2	13.0	0.05
3	15.0	0.05
4	14.0	0.05

*Nota:* Se utilizó un refractómetro marca Halthen colocando una gota de jugo extraído de manzana y visualizando el resultado por medio de la lectura de la barra azul. Condiciones: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 23.**

*Masa muestra para acidez titulable de jugo de manzana gala*

Muestra	Medición (g)	Error ( $\pm$ g)
1	15.0	0.05
2	15.2	0.05

3	14.9	0.05
4	15.0	0.05

*Nota:* Se determinó la masa de las muestras que se iban a utilizar para realizar la titulación para posteriormente utilizarlo en los cálculos de titulación. Se utilizó una balanza Ohaus. Condiciones: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 24.**

*Volumen de NaOH 0.1 N utilizado en titulación para ácidos titulables de jugo de manzana*

Muestra	Vol NaOH (mL)	Error ( $\pm$ mL)
1	11.5	0.05
2	10.0	0.05
3	11.3	0.05
4	10.5	0.05

*Nota:* Se realizó la titulación y se anotó los valores iniciales y finales de la bureta para determinar el volumen utilizado para cada una de las muestras y se procedió a realizar el cálculo de ácidos titulables de la ecuación 13. Condiciones: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 25.**

*Resultado de pruebas microbiológicas*

Aspecto	Muestra	Resultado
<i>Escheriachia coli</i>	1	Ausente
<i>Escheriachia coli</i>	2	Ausente
<i>Escheriachia coli</i>	3	Ausente
<i>Escheriachia coli</i>	4	Ausente
<i>Salmonella spp</i>	1	Ausente
<i>Salmonella spp</i>	2	Ausente
<i>Salmonella spp</i>	3	Ausente
<i>Salmonella spp</i>	4	Ausente

*Nota:* Se preparó el caldo de cultivo nutritivo para los aspectos evaluados, se procedió a realizar un muestreo sobre la superficie de la manzana, se incubó por dos días y se observó las colonias formadas. Condiciones: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

Una vez finalizada la parte de los datos de caracterización, se cuenta con los datos originales obtenidos en las diferentes corridas que se describen en la Tabla 26, con variación de temperatura, variación de pretratamiento y de condiciones de humedad.

**Tabla 26.**

*Humedades relativas de sólidos utilizados en pruebas de secado*

Secado	Pretratamiento	Temperatura de secado (°C)	Tiempo de secado (min)	Resultado (%MC)	Error ( $\pm$ %MC)
3	No	55	180	85.20%	0.01%
4	No	60	180	85.00%	0.01%
5	No	60	180	85.40%	0.01%
6	No	65	180	85.40%	0.01%
7	No	65	180	85.00%	0.01%
8	Mecánico	65	180	85.00%	0.01%
9	No	65	180	83.30%	0.01%
10	Mecánico	65	180	86.00%	0.01%
11	Químico	65	200	90.00%	0.01%

*Nota:* Se realizó la medición de la humedad de muestras de manzana a las condiciones descritas en las Tablas. Se utilizó una balanza de humedad de marca Ohaus. Condiciones: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

La primera corrida correspondió a la corrida de secado de rodajas de manzana sin pretratamiento a una temperatura de 55°C y los datos experimentales se enlistan en las Tablas 27-32.

**Tabla 27.**

*Condiciones de operación de secado 1 a 55°C de rodajas de manzana sin pretratamiento*

Aspecto	Medición	Error ( $\pm$ )
Humedad ambiental	58.5%	0.05%
Temperatura ambiental	18.9°C	0.05°C

*Nota:* Se realizó la lectura de un higrómetro digital para determinar las condiciones ambientales y relacionarlas con los resultados. Elaboración propia.

**Tabla 28.**

*Temperatura inicial manzana secado 1*

Muestra	Medición (°C)	Error ( $\pm$ °C)
1	19.0	0.05°C
2	19.2	0.05°C
3	19.2	0.05°C
4	19.4	0.05°C
5	19.4	0.05°C
6	19.4	0.05°C

*Nota:* Se determinó la temperatura utilizando un termómetro laser infrarrojo marca Fulkle para poder utilizarlo para obtener la entalpía inicial del sólido en el cálculo 16. Condiciones 1.0 atm y 18.9°C. Elaboración propia.

**Tabla 29.**

*Masa manzana previo y posterior a secado 1*

Aspecto	Medición (g)	Error ( $\pm$ g)
masa manzana fresca	168.2	0.05
masa manzana deshidratada	33.1	0.05

*Nota:* Se determinó la masa de manzana fresca ingresada al secado y el de la salida para utilizarlo en el balance de masa utilizando la balanza marca Ohaus. Condiciones 1.0 atm y 18.9°C. Elaboración propia.

**Tabla 30.**

*Grosor de 6 rodajas de manzana utilizadas para la curva de secado*

Muestra	Grosor 1 (mm)	Grosor 2 (mm)	Grosor 3 (mm)	Error ( $\pm$ mm)
1	3.67	2.84	0.95	0.005
2	3.35	2.29	0.85	0.005
3	2.83	1.86	1.55	0.005
4	3.24	2.05	1.05	0.005
5	3.59	2.48	0.44	0.005
6	3.12	1.99	1.05	0.005

*Nota:* Se determinó el grosor de 3 puntos alrededor de las rodajas para poder tener uniformidad de grosor entre las corridas. Condiciones 1.0 atm y 18.9°C. Elaboración propia.

**Tabla 31.**

*Datos de masa de 6 rodajas de muestra de secado 1 contra tiempo*

Hora	Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Error ( $\pm$ g)
		1	2	3	4	5	6	
8:50	0	6.1815	5.364	6.8081	7.8351	5.7246	7.4484	0.00005
9:00	20	4.8411	4.3943	5.5126	6.2603	4.5294	5.8373	0.00005
9:20	35	4.0132	3.6496	4.6324	5.3182	3.8457	4.8859	0.00005

9:37	47	3.278	2.9631	3.8001	4.4543	3.2374	4.0214	0.00005
9:57	62	2.6875	2.4296	3.1555	3.7292	2.7259	3.3003	0.00005
10:17	77	2.1805	1.9912	2.5352	3.11221	2.26688	2.6985	0.00005
10:37	92	1.8361	1.6778	2.1105	2.6965	1.9321	2.2639	0.00005
10:57	107	1.5412	1.4147	1.7655	2.3159	1.624	1.8954	0.00005
11:27	132	1.2733	1.1779	1.4585	1.8848	1.305	1.5561	0.00005
11:57	157	1.1921	1.112	1.3585	1.6537	1.1665	1.4436	0.00005

*Nota:* Se determinó la masa de cada una de las 6 muestras utilizadas para realizar la curva de pérdida de masa y la curva de secado de cada secado. Condiciones 1.0 atm y 18.9°C. Elaboración propia.

**Tabla 32.**

*Condiciones de aire de secado 1*

Aspecto	Medición	Error ( $\pm$ )
Temperatura de entrada de aire	18.9°C	0.05°C
Humedad de entrada de aire	51.8%	0.005%
Velocidad de salida de aire	9.7 m/s	0.05 m/s
Temperatura de salida de aire	49.6°C	0.05°C
Humedad de salida de aire	20.00%	0.005%

*Nota:* Se determinó las condiciones de aire de secado por medio de un anemómetro marca CE, higrómetro marca EXTECH esto para utilizarlo en el balance de masa y energía de la corrida. Condiciones 1.0 atm y 18.9°C. Elaboración propia.

La segunda corrida correspondió a la corrida de secado de rodajas de manzana sin pretratamiento a una temperatura de 55°C y los datos experimentales se enlistan en las Tablas 33-37.

**Tabla 33.**

*Condiciones de operación de secado 2 a 55°C de rodajas de manzana sin pretratamiento*

Aspecto	Medición	Error ( $\pm$ )
Humedad ambiental	58.5%	0.05%
Temperatura ambiental	18.9°C	0.05°C

*Nota:* Se realizó la lectura de un higrómetro digital para determinar las condiciones ambientales y relacionarlas con los resultados. Elaboración propia.

**Tabla 34.**

*Temperatura inicial manzana secado 2*

Muestra	Medición (°C)	Error ( $\pm$ °C)
1	19.0	0.05°C
2	19.2	0.05°C
3	19.2	0.05°C
4	19.4	0.05°C
5	19.4	0.05°C
6	19.4	0.05°C

*Nota:* Se determinó la temperatura utilizando un termómetro laser infrarrojo marca Fulkle para poder utilizarlo para obtener la entalpía inicial del sólido en el cálculo 16. Condiciones 1.0 atm y 18.9°C. Elaboración propia.

**Tabla 35.**

*Masa manzana previo y posterior a secado 2*

Aspecto	Medición (g)	Error ( $\pm$ g)
Masa manzana fresca	166.1	0.05
Masa manzana deshidratada	32.5	0.05

*Nota:* Se determinó la masa de manzana fresca ingresada al secado y el de la salida para utilizarlo en el balance de masa utilizando la balanza marca Ohaus. Condiciones 1.0 atm y 18.9°C. Elaboración propia.

**Tabla 36.**

Datos de masa de 4 rodajas de muestra de secado 2 contra tiempo

Hora	Tiempo transcurrido (min)	Muestra				Error ( $\pm$ g)
		1	2	3	4	
9:20	0	9.428	12.2805	12.4158	13.3776	0.00005
9:37	15	7.9534	10.6382	10.8311	11.9035	0.00005
9:57	30	6.764	9.3032	9.5391	10.6836	0.00005
10:17	45	5.7162	7.8624	8.164	9.4207	0.00005
10:37	60	4.7597	6.7506	7.0465	8.4059	0.00005
10:57	75	3.9216	5.5949	5.8377	7.2755	0.00005
11:27	100	2.8703	4.1519	4.1325	5.5903	0.00005
11:57	125	2.1448	2.909	2.8893	4.0776	0.00005
12:27	150	1.9233	2.4226	2.4304	3.2731	0.00005
12:37	160	1.8373	2.26769	2.2918	2.9714	0.00005
1:05	15	1.7321	2.1142	2.1595	2.5768	0.00005

*Nota:* Se determinó la masa de cada una de las 6 muestras utilizadas para realizar la curva de pérdida de masa y la curva de secado de cada secado. Condiciones 1.0 atm y 18.9°C. Elaboración propia.

**Tabla 37.**

Condiciones de aire de secado 2

Aspecto	Medición	Error ( $\pm$ )
Temperatura de entrada de aire	50.1°C	0.05°C
Humedad de entrada de aire	19.9%	0.005%
Velocidad de salida de aire	2.1 m/s	0.05 m/s
Temperatura de salida de aire	48.1°C	0.05°C
Humedad de salida de aire	20.15%	0.005%

*Nota:* Se determinó las condiciones de aire de secado por medio de un anemómetro marca CE, higrómetro marca EXTECH esto para utilizarlo en el balance de masa y energía de la corrida. Condiciones 1.0 atm y 18.9°C. Elaboración propia.

La tercera corrida correspondió a la corrida de secado de rodajas de manzana sin pretratamiento a una temperatura de 55°C y los datos experimentales se enlistan en las Tablas 38-45.

**Tabla 38.**

Condiciones de operación de secado 3 a 55°C de rodajas de manzana sin pretratamiento

Aspecto	Medición	Error ( $\pm$ )
Humedad ambiental	50.01%	0.05%
Temperatura ambiental	20.5°C	0.05°C

*Nota:* Se realizó la lectura de un higrómetro digital para determinar las condiciones ambientales y relacionarlas con los resultados. Elaboración propia.

**Tabla 39.**

Temperatura inicial manzana secado 3

Muestra	Medición (°C)	Error ( $\pm$ °C)
1	21.0	0.05°C
2	21.0	0.05°C
3	21.4	0.05°C
4	21.2	0.05°C
5	20.1	0.05°C
6	21.4	0.05°C

*Nota:* Se determinó la temperatura utilizando un termómetro laser infrarrojo marca Fulkle para poder utilizarlo para obtener la entalpía inicial del sólido en el cálculo 16. Condiciones 1.0 atm y 20.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 40.**

*Masa manzana previo y posterior a secado 3*

Aspecto	Medición (g)	Error ( $\pm$ g)
Masa manzana fresca	168.0	0.05
Masa manzana cortada en rodajas	158.4	0.05
Masa manzana deshidratada	29.1	0.05

*Nota:* Se determinó la masa de manzana fresca ingresada al secado y el de la salida para utilizarlo en el balance de masa utilizando la balanza marca Ohaus. Condiciones 1.0 atm y 20.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 41.**

*Grosor de 6 rodajas de manzana utilizadas para la curva de secado 3*

Muestra	Grosor 1 (mm)	Grosor 2 (mm)	Grosor 3 (mm)	Error ( $\pm$ mm)
1	3.95	1.57	1.51	0.005
2	3.56	2.19	1.41	0.005
3	2.69	2.47	1.38	0.005
4	3.86	1.80	2.52	0.005
5	3.13	2.45	2.23	0.005
6	2.81	3.56	2.45	0.005

*Nota:* Se determinó la masa de manzana fresca ingresada al secado y el de la salida para utilizarlo en el balance de masa utilizando la balanza marca Ohaus. Condiciones 1.0 atm y 20.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 42.**

*Diámetros mayor y menor de las 6 rodajas de muestra secado 3*

Muestra	Diámetro mayor (mm)	Diámetro menor (mm)	Error ( $\pm$ mm)
1	61.12	54.27	0.005
2	62.13	50.65	0.005
3	60.92	53.91	0.005
4	67.64	57.87	0.005
5	66.01	52.18	0.005
6	70.47	62.94	0.005

*Nota:* Se determinó la masa de cada una de las 6 muestras utilizadas para realizar la curva de pérdida de masa y la curva de secado de cada secado. Condiciones 1.0 atm y 20.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 43.**

*Datos de masa de 6 rodajas de muestra de secado 3 contra tiempo*

Hora	Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Error ( $\pm$ g)
		1	2	3	4	5	6	
12:12	0	6.3715	5.1798	5.3546	6.5059	5.3719	9.7284	0.00005
12:27	10	5.6013	4.5381	4.5905	5.6222	4.4788	8.7614	0.00005
12:37	20	5.0394	3.9971	3.9791	4.9252	3.8204	7.9691	0.00005
12:52	30	4.5225	3.4971	3.4525	4.3203	3.2519	7.2345	0.00005
13:05	40	4.0651	3.0282	2.9828	3.7707	2.773	6.5625	0.00005
13:30	60	3.1598	2.3388	2.1329	2.6282	1.8878	5.2702	0.00005
13:55	80	2.5272	1.7964	1.5826	1.8969	1.3636	4.2858	0.00005
14:30	110	1.7733	1.256	1.0925	1.2852	0.9422	3.1623	0.00005
14:48	125	1.4691	1.0284	0.9394	1.1362	0.8538	2.6536	0.00005
15:20	150	1.1545	0.8622	0.8387	1.0244	0.8091	2.1126	0.00005
15:34	160	1.0652	0.8384	0.825	0.9965	0.8021	1.9365	0.00005

*Nota:* Se determinó las condiciones de aire de secado por medio de un anemómetro marca CE, higrómetro marca EXTECH esto para utilizarlo en el balance de masa y energía de la corrida. Condiciones 1.0 atm y 20.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 44.**

*Condiciones de operación de secador respecto el tiempo en el secado 3*

Tiempo transcurrido (min)	Temperatura de salida de aire ( $\pm 0.05^\circ\text{C}$ )	Humedad de salida de aire ( $\pm 0.01\%$ )	Temperatura termocupla sobre bandeja de secado ( $\pm 0.05^\circ\text{C}$ )
0	50.50	18.70%	50.8
10	49.02	18.50%	51.2
20	53.40	18.40%	55.1
30	54.00	18.80%	55.0
40	49.80	18.40%	54.2
60	51.10	19.10%	57.0
80	50.00	19.40%	55.0
110	51.10	19.80%	54.2
125	55.10	20.20%	56.7
150	52.00	20.00%	57.4
160	54.40	20.40%	57.7

*Nota:* Se midió las condiciones para tener un control del comportamiento del equipo y del secado utilizando un higrómetro marca EXTECH y una termocupla marca Brewferm. Condiciones 1.0 atm y 20.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 45.**

*Condiciones de operación dentro de secador en secado 3*

Aspecto	Medición	Error ( $\pm$ )
Humedad dentro del secador	23.80%	0.005%
Temperatura dentro de secador	44.0°C	0.05°C
Temperatura superficie de secador	46.0°C	0.05°C
Velocidad de aire entrante	5.2 m/s	0.05 m/s
Temperatura de entrada de aire	57°C	0.05°C

*Nota:* Se determinó las condiciones de aire de secado por medio de un anemómetro marca CE, higrómetro marca EXTECH esto para utilizarlo en el balance de masa y energía de la corrida. Condiciones 1.0 atm y 20.5°C. Elaboración propia.

La cuarta corrida correspondió a la corrida de secado de rodajas de manzana sin pretratamiento a una temperatura de 60°C y los datos experimentales se enlistan en las Tablas 46-53.

**Tabla 46.**

*Condiciones de operación de secado 4 a 60°C de rodajas de manzana sin pretratamiento*

Aspecto	Medición	Error ( $\pm$ )
Humedad ambiental	40.00%	0.05%
Temperatura ambiental	19.5°C	0.05°C

*Nota:* Se realizó la lectura de un higrómetro digital para determinar las condiciones ambientales y relacionarlas con los resultados. Elaboración propia.

**Tabla 47.**

*Temperatura inicial manzana secado 4*

Muestra	Medición ( $^\circ\text{C}$ )	Error ( $\pm^\circ\text{C}$ )
1	18.8	0.05°C

2	18.6	0.05°C
3	18.6	0.05°C
4	19.6	0.05°C
5	19.2	0.05°C
6	19.2	0.05°C

*Nota:* Se determinó la temperatura utilizando un termómetro laser infrarrojo marca Fulkle para poder utilizarlo para obtener la entalpía inicial del sólido en el cálculo 16. Condiciones 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 48.**

*Masa manzana previo y posterior a secado 4*

Aspecto	Medición (g)	Error (±g)
Masa manzana fresca	157.1	0.05
Masa manzana cortada en rodajas	156.1	0.05
Masa manzana deshidratada	27.9	0.05

*Nota:* Se determinó la masa de manzana fresca ingresada al secado y el de la salida para utilizarlo en el balance de masa utilizando la balanza marca Ohaus. Condiciones 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 49.**

*Grosor de 6 rodajas de manzana utilizadas para la curva de secado 4*

Muestra	Grosor 1 (mm)	Grosor 2 (mm)	Grosor 3 (mm)	Error (±mm)
1	2.05	2.15	3.96	0.005
2	2.91	4.23	1.60	0.005
3	2.04	2.27	3.14	0.005
4	3.15	2.19	2.19	0.005
5	3.99	2.55	1.48	0.005
6	3.89	2.29	1.50	0.005

*Nota:* Se determinó el grosor de 3 puntos alrededor de las rodajas para poder tener uniformidad de grosor entre las corridas. Condiciones 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 50.**

*Diámetros mayor y menor de las 6 rodajas de muestra secado 4*

Muestra	Diámetro mayor (mm)	Diámetro menor (mm)	Error (±mm)
1	61.77	51.67	0.005
2	72.23	68.41	0.005
3	64.92	64.66	0.005
4	60.89	53.61	0.005
5	55.01	55.90	0.005
6	71.43	66.70	0.005

*Nota:* Se determinó el grosor el diámetro menor y mayor para determinar el área de las rodajas utilizadas. Por medio de un vernier digital marca Turper. Condiciones 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 51.**

*Datos de masa de 6 rodajas de muestra de secado 4 contra tiempo*

Hora	Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Error (±g)
		1	2	3	4	5	6	
9:30	0	5.4338	8.0615	6.5456	5.4824	7.7705	9.9126	0.00005
9:42	12	4.4524	6.6990	5.3547	4.5556	6.8349	8.5239	0.00005
9:56	22	3.7996	5.6836	4.4927	3.8984	6.1953	7.5516	0.00005
10:10	32	3.1607	4.7324	3.6496	3.2026	5.5102	6.6125	0.00005
10:30	47	2.3832	3.6473	2.6846	2.3538	4.6338	5.4740	0.00005
10:44	57	1.9871	3.1182	2.1668	1.9033	4.1480	4.8548	0.00005

10:58	67	1.6963	2.7625	1.8231	1.5865	3.7578	4.3889	0.00005
11:15	77	1.4165	2.4429	1.5372	1.2974	3.3438	3.9029	0.00005
11:31	87	1.2224	2.2071	1.3501	1.0999	2.9516	3.4817	0.00005
12:25	134	0.9656	1.6712	1.1616	0.9076	1.9240	2.4197	0.00005
12:43	149	0.9525	1.5761	1.1509	0.8989	1.7111	2.1995	0.00005
13:00	160	0.9454	1.5131	1.1463	0.8958	1.5826	2.0655	0.00005
13:27	187	0.9392	1.4509	1.1414	0.8913	1.4669	1.9279	0.00005

*Nota:* Se determinó la masa de cada una de las 6 muestras utilizadas para realizar la curva de pérdida de masa y la curva de secado de cada secado. Condiciones 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 52.**

*Condiciones de operación de secador respecto el tiempo en el secado 4*

Tiempo transcurrido (min)	Temperatura de salida de aire ( $\pm 0.05^\circ\text{C}$ )	Humedad de salida de aire ( $\pm 0.01\%$ )	Temperatura termocupla sobre bandeja de secado ( $\pm 0.05^\circ\text{C}$ )
0	56.5	18.70%	58.5
12	57.1	19.50%	57.5
22	53.8	17.90%	58.0
32	55.9	19.30%	58.0
47	51.1	18.60%	57.5
57	55.2	18.70%	60.0
67	54.0	18.00%	58.3
77	57.4	19.10%	59.2
87	54.0	18.70%	60.0
134	60.9	20.60%	62.0
149	59.1	19.40%	58.7
160			
187			

*Nota:* Se midió las condiciones para tener un control del comportamiento del equipo y del secado utilizando un higrómetro marca EXTECH y una termocupla marca Brewferm. Condiciones 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 53.**

*Condiciones de operación dentro de secador en secado 4*

Aspecto	Medición	Error ( $\pm$ )
Humedad dentro del secador		0.005%
Temperatura dentro de secador		0.05°C
Temperatura superficie de secador	58.0°C	0.05°C
Velocidad de aire entrante	3.8 m/s	0.05 m/s
Temperatura de entrada de aire	64.8°C	0.05°C
Humedad de entrada de aire	21.0%	0.05%

*Nota:* Se determinó las condiciones de aire de secado por medio de un anemómetro marca CE, higrómetro marca EXTECH esto para utilizarlo en el balance de masa y energía de la corrida. Condiciones 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

La quinta corrida correspondió a la corrida de secado de rodajas de manzana sin pretratamiento a una temperatura de 60°C y los datos experimentales se enlistan en las Tablas 54-61.

**Tabla 54.**

*Condiciones de operación de secado 5 a 60°C de rodajas de manzana sin pretratamiento*

Aspecto	Medición	Error ( $\pm$ )
Humedad ambiental	40.00%	0.05%
Temperatura ambiental	19.5°C	0.05°C

*Nota:* Se realizó la lectura de un higrómetro digital para determinar las condiciones ambientales y relacionarlas con los resultados. Elaboración propia.

**Tabla 55.**

*Temperatura inicial manzana secado 5*

Muestra	Medición (°C)	Error ( $\pm$ °C)
1	18.8	0.05°C
2	18.6	0.05°C
3	18.6	0.05°C
4	19.6	0.05°C
5	19.2	0.05°C
6	19.2	0.05°C

*Nota:* Se determinó la temperatura utilizando un termómetro laser infrarrojo marca Fulkle para poder utilizarlo para obtener la entalpía inicial del sólido en el cálculo 16. Condiciones 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 56.**

*Masa manzana previo y posterior a secado 5*

Aspecto	Medición (g)	Error ( $\pm$ g)
Masa manzana fresca	158.9	0.05
Masa manzana cortada en rodajas	157.5	0.05
Masa manzana deshidratada	25.1	0.05

*Nota:* Se determinó la masa de manzana fresca ingresada al secado y el de la salida para utilizarlo en el balance de masa utilizando la balanza marca Ohaus. Condiciones 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 57.**

*Grosor de 6 rodajas de manzana utilizadas para la curva de secado 5*

Muestra	Grosor 1 (mm)	Grosor 2 (mm)	Grosor 3 (mm)	Error ( $\pm$ mm)
1	1.99	2.36	3.45	0.005
2	2.15	2.30	3.39	0.005
3	1.63	3.03	4.36	0.005
4	3.88	2.23	2.21	0.005
5	3.03	2.45	1.83	0.005
6	2.95	2.81	1.50	0.005

*Nota:* Se determinó el grosor de 3 puntos alrededor de las rodajas para poder tener uniformidad de grosor entre las corridas. Condiciones 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 58.**

*Diámetros mayor y menor de las 6 rodajas de muestra secado 5*

Muestra	Diámetro mayor (mm)	Diámetro menor (mm)	Error ( $\pm$ mm)
1	67.80	66.03	0.005
2	64.61	61.17	0.005
3	55.61	50.86	0.005
4	58.75	55.89	0.005
5	59.38	66.48	0.005
6	69.39	58.06	0.005

*Nota:* Se determinó el grosor el diámetro menor y mayor para determinar el área de las rodajas utilizadas. Por medio de un vernier digital marca Turper. Condiciones 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 59.**

*Datos de masa de 6 rodajas de muestra de secado 5 contra tiempo*

Hora	Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Error ( $\pm$ g)
		1	2	3	4	5	6	
10:48	0	7.0168	6.6735	6.4549	6.5985	6.2828	6.4061	0.00005
10:58	10	5.5881	5.4253	5.6044	5.6226	5.2056	5.2700	0.00005
11:15	20	4.4219	4.3052	4.8294	4.7393	4.3121	4.3487	0.00005
11:31	30	3.4813	3.3751	4.1768	3.9938	3.5450	3.5815	0.00005
12:25	77	1.5303	1.3088	2.3287	1.8523	1.6237	1.6237	0.00005
12:43	92	1.3381	1.1289	1.8850	1.4591	1.2942	1.3386	0.00005
13:00	103	1.2380	1.0886	1.5758	1.2516	1.1319	1.1926	0.00005
13:27	130	1.1724	1.0669	1.2294	1.1089	1.0319	1.0945	0.00005
14:00	152	1.1458	1.0543	1.0960	1.0691	1.0030	1.0559	0.00005
14:30	177	1.1327	1.0470	1.0583	1.0543	0.9910	1.0385	0.00005

*Nota:* Se determinó la masa de cada una de las 6 muestras utilizadas para realizar la curva de pérdida de masa y la curva de secado de cada secado. Condiciones 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 60.**

*Condiciones de operación de secador respecto el tiempo en el secado 5*

Tiempo transcurrido (min)	Temperatura de salida de aire ( $\pm 0.05^\circ\text{C}$ )	Humedad de salida de aire ( $\pm 0.01\%$ )	Temperatura termocupla sobre bandeja de secado ( $\pm 0.05^\circ\text{C}$ )
0	55.2	18.7%	60.0
10	54.0	18.0%	58.3
20	57.4	19.1%	59.2
30	54.0	18.7%	60.0
77	60.9	20.6%	62.0
92	59.1	19.4%	58.7
103			
130		18.9%	62.1
152			59.2
177			

*Nota:* Se midió las condiciones para tener un control del comportamiento del equipo y del secado utilizando un higrómetro marca EXTECH y una termocupla marca Brewferm. Condiciones 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 61.**

*Condiciones de operación dentro de secador en secado 5*

Aspecto	Medición	Error ( $\pm$ )
Humedad dentro del secador	18.90%	0.005%
Temperatura dentro de secador	47.1°C	0.05°C
Temperatura superficie de secador	58.0°C	0.05°C
Velocidad de aire entrante	3.8 m/s	0.05 m/s
Temperatura de entrada de aire	64.8°C	0.05°C
Humedad de entrada de aire	21.00%	0.005%

*Nota:* Se determinó las condiciones de aire de secado por medio de un anemómetro marca CE, higrómetro marca EXTECH esto para utilizarlo en el balance de masa y energía de la corrida. Condiciones 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

La sexta corrida correspondió a la corrida de secado de rodajas de manzana sin pretratamiento a una temperatura de 65°C y los datos experimentales se enlistan en las Tablas 62-69.

**Tabla 62.**

*Condiciones de operación de secado 6 a 65°C de rodajas de manzana sin pretratamiento*

Aspecto	Medición	Error ( $\pm$ )
Humedad ambiental	51.90%	0.005%
Temperatura ambiental	21.4°C	0.05°C

*Nota:* Se realizó la lectura de un higrómetro digital para determinar las condiciones ambientales y relacionarlas con los resultados. Elaboración propia.

**Tabla 63.**

*Temperatura inicial manzana secado 6*

Muestra	Medición (°C)	Error ( $\pm$ °C)
1	19.8	0.05°C
2	19.6	0.05°C
3	19.4	0.05°C
4	19.8	0.05°C
5	19.9	0.05°C
6	19.4	0.05°C

*Nota:* Se determinó la temperatura utilizando un termómetro laser infrarrojo marca Fulkle para poder utilizarlo para obtener la entalpía inicial del sólido en el cálculo 16. Condiciones 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 64.**

*Masa manzana previo y posterior a secado 6*

Aspecto	Medición (g)	Error ( $\pm$ g)
Masa manzana fresca	156.3	0.05
Masa manzana cortada en rodajas	151.5	0.05
Masa manzana deshidratada	27.3	0.05

*Nota:* Se determinó la masa de manzana fresca ingresada al secado y el de la salida para utilizarlo en el balance de masa utilizando la balanza marca Ohaus. Condiciones 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 65.**

*Grosor de 6 rodajas de manzana utilizadas para la curva de secado 6*

Muestra	Grosor 1 (mm)	Grosor 2 (mm)	Grosor 3 (mm)	Error ( $\pm$ mm)
1	3.25	3.71	2.97	0.005
2	3.75	3.86	2.52	0.005
3	2.63	2.51	2.77	0.005
4	2.59	2.77	2.81	0.005
5	3.16	3.19	2.73	0.005
6	3.4	2.33	2.59	0.005

*Nota:* Se determinó el grosor de 3 puntos alrededor de las rodajas para poder tener uniformidad de grosor entre las corridas. Condiciones 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 66.**

*Diámetros mayor y menor de las 6 rodajas de muestra secado 6*

Muestra	Diámetro mayor (mm)	Diámetro menor (mm)	Error ( $\pm$ mm)
1	62.42	59.72	0.005
2	60.58	53.73	0.005
3	62.92	64.30	0.005
4	65.60	57.28	0.005
5	64.02	69.09	0.005
6	64.02	72.15	0.005

*Nota:* Se determinó el grosor el diámetro menor y mayor para determinar el área de las rodajas utilizadas. Por medio de un vernier digital marca Turper. Condiciones 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 67.**

*Datos de masa de 6 rodajas de muestra de secado 6 contra tiempo*

Hora	Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Error ( $\pm$ g)
		1	2	3	4	5	6	
10:20	0	7.4869	6.7941	6.6751	5.8089	8.9189	7.1384	0.00005
10:30	10	6.5116	6.0210	5.7377	4.7966	7.8687	6.1328	0.00005
10:47	20	5.7859	5.3697	4.9008	4.0073	7.0212	5.3431	0.00005
11:03	30	5.0514	4.6945	4.1037	3.2851	6.1252	4.5582	0.00005
11:19	40	4.3556	4.1011	3.3914	2.6741	5.3216	3.9104	0.00005
11:34	50	3.7380	3.5917	2.7765	2.1855	4.6199	3.2709	0.00005
11:48	60	3.2229	3.1006	2.2494	1.7892	3.9584	2.7457	0.00005
12:13	80	2.4163	2.3732	1.5386	1.2704	2.9169	1.9711	0.00005
12:39	100	1.8526	1.8718	1.2435	1.0710	2.2868	1.5539	0.00005
13:13	130	1.4024	1.3844	1.1444	1.0174	1.7870	1.3239	0.00005
13:50	160	1.2959	1.2238	1.1357	1.0109	1.5985	1.2597	0.00005
14:27	190	1.2687	1.1804	1.1247	1.0027	1.5414	1.2366	0.00005

*Nota:* Se determinó la masa de cada una de las 6 muestras utilizadas para realizar la curva de pérdida de masa y la curva de secado de cada secado. Condiciones 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 68.**

*Condiciones de operación de secador respecto el tiempo en el secado 6*

Tiempo transcurrido (min)	Temperatura de salida de aire ( $\pm 0.05^\circ\text{C}$ )	Humedad de salida de aire ( $\pm 0.01\%$ )	Temperatura termocupla sobre bandeja de secado ( $\pm 0.05^\circ\text{C}$ )
0	66.5	29.70%	66.6
10	60.9	28.10%	59.1
20	63.8	28.70%	62.3
30	62.7	27.80%	62.2
40	59.3	26.80%	62.8
50	64.3	28.10%	63.2
60	65.2	28.30%	64.0
80	64.9	28.60%	63.0
100	62.1	28.30%	62.0
130			
160	62.2	27.3%	62.4
190			

*Nota:* Se midió las condiciones para tener un control del comportamiento del equipo y del secado utilizando un higrómetro marca EXTECH y una termocupla marca Brewferm. Condiciones 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 69.**

*Condiciones de operación dentro de secador en secado 6*

Aspecto	Medición	Error ( $\pm$ )
Humedad dentro del secador	25.60%	0.005%
Temperatura dentro de secador	56.8°C	0.05°C
Temperatura superficie de secador	56.2°C	0.05°C
Velocidad de aire entrante	3.1 m/s	0.05 m/s
Temperatura de entrada de aire	65.6°C	0.05°C
Humedad de entrada de aire	27.00%	0.005%

*Nota:* Se determinó las condiciones de aire de secado por medio de un anemómetro marca CE, higrómetro marca EXTECH esto para utilizarlo en el balance de masa y energía de la corrida. Condiciones 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

La séptima corrida correspondió a la corrida de secado de rodajas de manzana sin pretratamiento a una temperatura de 65°C y los datos experimentales se enlistan en las Tablas 70-77.

**Tabla 70.**

*Condiciones de operación de secado 7 a 65°C de rodajas de manzana sin pretratamiento*

Aspecto	Medición	Error ( $\pm$ )
Humedad ambiental	51.90%	0.005%
Temperatura ambiental	21.4°C	0.05°C

*Nota:* Se realizó la lectura de un higrómetro digital para determinar las condiciones ambientales y relacionarlas con los resultados. Elaboración propia.

**Tabla 71.**

*Temperatura inicial manzana secado 7*

Muestra	Medición (°C)	Error ( $\pm$ °C)
1	19.3	0.05°C
2	19.5	0.05°C
3	19.6	0.05°C
4	19.6	0.05°C
5	19.6	0.05°C
6	19.8	0.05°C

*Nota:* Se determinó la temperatura utilizando un termómetro laser infrarrojo marca Fulkle para poder utilizarlo para obtener la entalpía inicial del sólido en el cálculo 16. Condiciones 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 72.**

*Masa manzana previo y posterior a secado 7*

Aspecto	Medición (g)	Error ( $\pm$ g)
Masa manzana fresca	158.4	0.05
Masa manzana cortada en rodajas	153.4	0.05
Masa manzana deshidratada	25.9	0.05

*Nota:* Se determinó la masa de manzana fresca ingresada al secado y el de la salida para utilizarlo en el balance de masa utilizando la balanza marca Ohaus. Condiciones 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 73.**

*Grosor de 6 rodajas de manzana utilizadas para la curva de secado 7*

Muestra	Grosor 1 (mm)	Grosor 2 (mm)	Grosor 3 (mm)	Error ( $\pm$ mm)
1	3.53	2.92	3.16	0.005
2	2.96	1.22	2.91	0.005
3	1.75	2.45	2.23	0.005
4	3.31	1.95	2.85	0.005
5	2.52	1.63	3.10	0.005
6	2.71	2.19	3.27	0.005

*Nota:* Se determinó el grosor de 3 puntos alrededor de las rodajas para poder tener uniformidad de grosor entre las corridas. Condiciones 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 74.**

*Diámetros mayor y menor de las 6 rodajas de muestra secado 7*

Muestra	Diámetro mayor (mm)	Diámetro menor (mm)	Error ( $\pm$ mm)
1	67.80	64.20	0.005
2	67.26	61.60	0.005
3	65.43	54.22	0.005
4	60.98	54.96	0.005
5	65.05	69.58	0.005
6	70.47	66.40	0.005

*Nota:* Se determinó el grosor el diámetro menor y mayor para determinar el área de las rodajas utilizadas. Por medio de un vernier digital marca Turper. Condiciones 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 75.**

*Datos de masa de 6 rodajas de muestra de secado 7 contra tiempo*

Hora	Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Error ( $\pm$ g)
		1	2	3	4	5	6	
10:20	0	10.80193	8.4536	5.5582	6.2658	7.6786	9.3239	0.00005
10:30	10	9.3157	7.0439	4.3414	5.3234	6.3486	8.0698	0.00005
10:47	20	8.1108	5.9733	3.4365	4.5717	5.3713	7.1333	0.00005
11:03	30	6.8912	4.9394	2.6219	3.6933	4.4579	6.2047	0.00005
11:19	40	5.7873	4.0676	1.9871	3.1187	3.6629	5.3421	0.00005
11:34	50	4.8159	3.2911	1.5099	2.5903	2.9619	4.5521	0.00005
11:48	60	3.9118	2.6461	1.1737	2.1015	2.3537	3.8231	0.00005
12:13	80	2.6506	1.7991	0.9143	1.4377	1.6012	2.7316	0.00005
12:39	100	1.9963	1.4527	0.8695	1.1119	1.3067	2.0578	0.00005
13:13	130	1.7256	1.3349	0.8565	1.0078	1.2198	1.5686	0.00005
13:50	160	1.6768	1.3097	0.8495	0.9899	1.1886	1.4683	0.00005
14:27	190	1.6542	1.3024	0.8427	0.9857	1.1822	1.4433	0.00005

*Nota:* Se determinó la masa de cada una de las 6 muestras utilizadas para realizar la curva de pérdida de masa y la curva de secado de cada secado. Condiciones 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 76.**

*Condiciones de operación de secador respecto el tiempo en el secado 7*

Tiempo transcurrido (min)	Temperatura de salida de aire ( $\pm$ 0.05°C)	Humedad de salida de aire ( $\pm$ 0.01%)	Temperatura termocupla sobre bandeja de secado ( $\pm$ 0.05°C)
0	66.5	29.70%	66.6
10	60.9	28.10%	59.1

20	63.8	28.70%	62.3
30	62.7	27.80%	62.2
40	59.3	26.80%	62.8
50	64.3	28.10%	63.2
60	65.2	28.30%	64.0
80	64.9	28.60%	63.0
100	62.1	28.30%	62.0
130			
160	62.2	27.3%	62.4
190			

*Nota:* Se midió las condiciones para tener un control del comportamiento del equipo y del secado utilizando un higrómetro marca EXTECH y una termocupla marca Brewferm. Condiciones 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 77.**

*Condiciones de operación dentro de secador en secado 7*

Aspecto	Medición	Error ( $\pm$ )
Humedad dentro del secador	25.60%	0.005%
Temperatura dentro de secador	56.8°C	0.05°C
Temperatura superficie de secador	56.2°C	0.05°C
Velocidad de aire entrante	3.1 m/s	0.05 m/s
Temperatura de entrada de aire	66.1°C	0.05°C
Humedad de entrada de aire	27.00%	0.005%

*Nota:* Se determinó las condiciones de aire de secado por medio de un anemómetro marca CE, higrómetro marca EXTECH esto para utilizarlo en el balance de masa y energía de la corrida. Condiciones 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

La octava corrida correspondió a la corrida de secado de rodajas de manzana con pretratamiento mecánico a una temperatura de 65°C y los datos experimentales se enlistan en las Tablas 78-85.

**Tabla 78.**

*Condiciones de operación de secado 8 a 65°C de rodajas de manzana con pretratamiento mecánico*

Aspecto	Medición	Error ( $\pm$ )
Humedad ambiental	54.1%	0.005%
Temperatura ambiental	21.2°C	0.05°C

*Nota:* Se realizó la lectura de un higrómetro digital para determinar las condiciones ambientales y relacionarlas con los resultados. Elaboración propia.

**Tabla 79.**

*Temperatura inicial manzana secado 8*

Muestra	Medición (°C)	Error ( $\pm$ °C)
1	21.0	0.05°C
2	21.0	0.05°C
3	19.8	0.05°C
4	19.9	0.05°C
5	20.0	0.05°C
6	21.0	0.05°C

*Nota:* Se determinó la temperatura utilizando un termómetro laser infrarrojo marca Fulkle para poder utilizarlo para obtener la entalpía inicial del sólido en el cálculo 16. Condiciones 1.0 atm y 21.2°C. Elaboración propia.

**Tabla 80.***Masa manzana previo y posterior a secado 8*

Aspecto	Medición (g)	Error ( $\pm$ g)
Masa manzana fresca	683.1	0.05
Masa manzana cortada en rodajas	672.7	0.05
Masa manzana deshidratada	114.3	0.05

*Nota:* Se determinó la masa de manzana fresca ingresada al secado y el de la salida para utilizarlo en el balance de masa utilizando la balanza marca Ohaus. Condiciones 1.0 atm y 21.2°C. Elaboración propia.

**Tabla 81.***Grosor de 6 rodajas de manzana utilizadas para la curva de secado 8*

Muestra	Grosor 1 (mm)	Grosor 2 (mm)	Grosor 3 (mm)	Error ( $\pm$ mm)
1	4.17	3.12	2.28	0.005
2	3.55	3.03	3.64	0.005
3	4.10	3.09	2.32	0.005
4	4.10	3.39	2.36	0.005
5	3.67	3.32	2.65	0.005
6	3.09	2.52	3.69	0.005

*Nota:* Se determinó el grosor de 3 puntos alrededor de las rodajas para poder tener uniformidad de grosor entre las corridas. Condiciones 1.0 atm y 21.2°C. Elaboración propia.

**Tabla 82.***Diámetros mayor y menor de las 6 rodajas de muestra secado 8*

Muestra	Diámetro mayor (mm)	Diámetro menor (mm)	Error ( $\pm$ mm)
1	71.91	71.90	0.005
2	62.26	61.52	0.005
3	65.63	64.02	0.005
4	70.64	70.64	0.005
5	73.69	69.56	0.005
6	62.62	60.19	0.005

*Nota:* Se determinó el grosor el diámetro menor y mayor para determinar el área de las rodajas utilizadas. Por medio de un vernier digital marca Turper. Condiciones 1.0 atm y 21.2°C. Elaboración propia.

**Tabla 83.***Datos de masa de 6 rodajas de muestra de secado 8 contra tiempo*

Hora	Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Error ( $\pm$ g)
		1	2	3	4	5	6	
9:57	0	12.2333	9.9378	10.6236	11.1830	12.0008	8.0433	0.00005
10:06	10	11.0947	9.0253	9.6014	10.0050	10.6963	7.1946	0.00005
10:25	20	9.9421	8.1346	8.6360	8.7853	9.4612	6.3955	0.00005
10:40	30	8.8504	7.3339	7.6471	7.8520	8.4737	5.6699	0.00005
10:54	40	7.8383	6.4922	6.7667	6.9191	7.4986	5.0154	0.00005
11:08	50	6.7854	5.6668	5.8766	5.9564	6.4822	4.3481	0.00005
11:23	60	5.8777	4.9671	5.1133	5.1342	5.6290	3.7858	0.00005
11:41	75	4.5951	3.9817	4.0641	3.9953	4.3722	2.9986	0.00005
12:05	90	3.5439	3.1479	3.1644	3.0404	3.3005	2.3514	0.00005
12:30	110	2.6890	2.4420	2.4179	2.2968	2.4472	1.8240	0.00005
12:53	130	2.1731	1.9279	1.9508	1.9202	2.0120	1.4860	0.00005
13:27	160	1.9342	1.6245	1.7047	1.7760	1.8515	1.2922	0.00005
14:01	190	1.8911	1.5660	1.6565	1.7464	1.8184	1.2565	0.00005

*Nota:* Se determinó la masa de cada una de las 6 muestras utilizadas para realizar la curva de pérdida de masa y la curva de secado de cada secado. Condiciones 1.0 atm y 21.2°C. Elaboración propia.

**Tabla 84.**

*Condiciones de operación de secador respecto el tiempo en el secado 8*

Tiempo transcurrido (min)	Temperatura de salida de aire ( $\pm 0.05^\circ\text{C}$ )	Humedad de salida de aire ( $\pm 0.01\%$ )	Temperatura termocupla sobre bandeja de secado ( $\pm 0.05^\circ\text{C}$ )
0			54.7
10	59.7	28.9%	60.0
20	60.0	28.0%	60.0
30	64.1	29.3%	60.2
40	64.0	28.9%	60.8
50	60.5	28.2%	60.0
60	58.8	27.4%	57.0
75			
90	63.3	27.8%	62.3
110	63.4	27.4%	62.7
130	60.4	26.3%	59.5
160	63.4	28.3%	62.7
190			

*Nota:* Se midió las condiciones para tener un control del comportamiento del equipo y del secado utilizando un higrómetro marca EXTECH y una termocupla marca Brewferm. Condiciones 1.0 atm y 21.2°C. Elaboración propia.

**Tabla 85.**

*Condiciones de operación dentro de secador en secado 8*

Aspecto	Medición	Error ( $\pm$ )
Humedad dentro del secador	30.30%	0.005%
Temperatura dentro de secador	41.2°C	0.05°C
Temperatura superficie de secador	58.2°C	0.05°C
Velocidad de aire entrante	5.2 m/s	0.05 m/s
Temperatura de entrada de aire	68.5°C	0.05°C
Humedad de entrada de aire	28.10%	0.005%

*Nota:* Se determinó las condiciones de aire de secado por medio de un anemómetro marca CE, higrómetro marca EXTECH esto para utilizarlo en el balance de masa y energía de la corrida. Condiciones 1.0 atm y 21.2°C. Elaboración propia.

La novena corrida correspondió a la corrida de secado de rodajas de manzana sin pretratamiento a una temperatura de 65°C y los datos experimentales se enlistan en las Tablas 86-93.

**Tabla 86.**

*Condiciones de operación de secado 9 a 65°C de rodajas de manzana sin pretratamiento*

Aspecto	Medición	Error ( $\pm$ )
Humedad ambiental	53.9%	0.005%
Temperatura ambiental	24.3°C	0.05°C

*Nota:* Se realizó la lectura de un higrómetro digital para determinar las condiciones ambientales y relacionarlas con los resultados. Elaboración propia.

**Tabla 87.**  
*Temperatura inicial manzana secado 9*

Muestra	Medición (°C)	Error ( $\pm$ °C)
1	21.4	0.05°C
2	21.2	0.05°C
3	21.4	0.05°C
4	21.4	0.05°C
5	21.4	0.05°C
6	21.6	0.05°C

*Nota:* Se determinó la temperatura utilizando un termómetro laser infrarrojo marca Fulkle para poder utilizarlo para obtener la entalpía inicial del sólido en el cálculo 16. Condiciones 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 88.**  
*Masa manzana previo y posterior a secado 9*

Aspecto	Medición (g)	Error ( $\pm$ g)
Masa manzana fresca	517.4	0.05
Masa manzana cortada en rodajas	174.3	0.05
Masa manzana deshidratada	91.4	0.05

*Nota:* Se determinó la masa de manzana fresca ingresada al secado y el de la salida para utilizarlo en el balance de masa utilizando la balanza marca Ohaus. Condiciones 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 89.**  
*Grosor de 6 rodajas de manzana utilizadas para la curva de secado 9*

Muestra	Grosor 1 (mm)	Grosor 2 (mm)	Grosor 3 (mm)	Error ( $\pm$ mm)
1	3.89	2.20	2.50	0.005
2	3.22	1.24	3.28	0.005
3	2.38	2.78	1.85	0.005
4	2.89	2.62	1.87	0.005
5	2.14	2.99	3.15	0.005
6	2.29	2.51	2.49	0.005

*Nota:* Se determinó el grosor de 3 puntos alrededor de las rodajas para poder tener uniformidad de grosor entre las corridas. Condiciones 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 90.**  
*Diámetros mayor y menor de las 6 rodajas de muestra secado 9*

Muestra	Diámetro mayor (mm)	Diámetro menor (mm)	Error ( $\pm$ mm)
1	61.67	63.61	0.005
2	68.50	56.13	0.005
3	62.71	67.47	0.005
4	61.54	59.41	0.005
5	62.26	61.39	0.005
6	63.57	62.38	0.005

*Nota:* Se determinó el grosor el diámetro menor y mayor para determinar el área de las rodajas utilizadas. Por medio de un vernier digital marca Turper. Condiciones 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 91.**  
*Datos de masa de 6 rodajas de muestra de secado 9 contra tiempo*

Hora	Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Error ( $\pm$ g)
		1	2	3	4	5	6	
9:47	0	6.8232	7.2741	5.8446	6.1140	5.9896	6.7009	0.00005

9:57	10	5.9505	6.2981	4.8348	5.2868	5.1044	5.8187	0.00005
10:11	20	5.1316	5.3874	3.9217	4.4884	4.2857	4.9410	0.00005
10:27	30	4.3533	4.6144	3.1062	3.7267	3.5661	4.0580	0.00005
10:42	40	3.7062	3.8931	2.4628	3.0860	2.9765	3.3397	0.00005
11:00	50	3.1408	3.3727	1.9460	2.5065	2.4784	2.7179	0.00005
11:00	60	2.6569	2.9162	1.5628	2.0455	2.0907	2.2256	0.00005
11:35	80	2.0925	2.2771	1.1934	1.5505	1.6664	1.6910	0.00005
11:58	103	1.5902	1.6510	0.9805	1.1439	1.2703	1.2560	0.00005
12:19	118	1.3690	1.4408	0.9477	1.0426	1.1299	1.1442	0.00005
12:42	138	1.1735	1.2409	0.9274	0.9920	1.0053	1.0823	0.00005
13:08	158	1.1050	1.1665	0.9181	0.9722	0.9636	1.0642	0.00005
13:44	188	1.0766	1.1389	0.9125	0.9631	0.9473	1.0542	0.00005

*Nota:* Se determinó la masa de cada una de las 6 muestras utilizadas para realizar la curva de pérdida de masa y la curva de secado de cada secado. Condiciones 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 92.**

*Condiciones de operación de secador respecto el tiempo en el secado 9*

Tiempo transcurrido (min)	Temperatura de salida de aire ( $\pm 0.05^\circ\text{C}$ )	Humedad de salida de aire ( $\pm 0.01\%$ )	Temperatura termocupla sobre bandeja de secado ( $\pm 0.05^\circ\text{C}$ )
0			57.0
10			57.0
20	61.3	29.7%	59.5
30			
40	64.6	31.1%	58.0
50	60.3	29.4%	58.1
60			
80			
103			
118	61.5	29.5%	55.4
138	59.9	28.8%	60.0
158	60.2	28.8%	63.0
188			

*Nota:* Se midió las condiciones para tener un control del comportamiento del equipo y del secado utilizando un higrometro marca EXTECH y una termocupla marca Brewferm. Condiciones 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 93.**

*Condiciones de operación dentro de secador en secado 9*

Aspecto	Medición	Error ( $\pm$ )
Humedad dentro del secador	29.00%	0.005%
Temperatura dentro de secador	56.2°C	0.05°C
Temperatura superficie de secador	62.8°C	0.05°C
Velocidad de aire entrante	4.82 m/s	0.05 m/s
Temperatura de entrada de aire	67.2°C	0.05°C
Humedad de entrada de aire	29.6%	0.005%

*Nota:* Se determinó las condiciones de aire de secado por medio de un anemómetro marca CE, higrometro marca EXTECH esto para utilizarlo en el balance de masa y energía de la corrida. Condiciones 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

La décima corrida correspondió a la corrida de secado de rodajas de manzana con pretratamiento mecánico a una temperatura de 65°C y los datos experimentales se enlistan en las Tablas 94-101.

**Tabla 94.**

*Condiciones de operación de secado 10 a 65°C de rodajas de manzana con pretratamiento mecánico*

Aspecto	Medición	Error ( $\pm$ )
Humedad ambiental	53.9%	0.005%
Temperatura ambiental	24.3°C	0.05°C

*Nota:* Se realizó la lectura de un higrómetro digital para determinar las condiciones ambientales y relacionarlas con los resultados. Elaboración propia.

**Tabla 95.**

*Temperatura inicial manzana secado 10*

Muestra	Medición (°C)	Error ( $\pm$ °C)
1	21.4	0.05°C
2	21.2	0.05°C
3	21.4	0.05°C
4	21.4	0.05°C
5	21.4	0.05°C
6	21.6	0.05°C

*Nota:* Se determinó la temperatura utilizando un termómetro laser infrarrojo marca Fulkle para poder utilizarlo para obtener la entalpía inicial del sólido en el cálculo 16. Condiciones 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 96.**

*Masa manzana previo y posterior a secado 10*

Aspecto	Medición (g)	Error ( $\pm$ g)
Masa manzana fresca	517.4	0.05
Masa manzana cortada en rodajas	174.3	0.05
Masa manzana deshidratada	91.4	0.05

*Nota:* Se determinó la masa de manzana fresca ingresada al secado y el de la salida para utilizarlo en el balance de masa utilizando la balanza marca Ohaus. Condiciones 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 97.**

*Grosor de 6 rodajas de manzana utilizadas para la curva de secado 10*

Muestra	Grosor 1 (mm)	Grosor 2 (mm)	Grosor 3 (mm)	Error ( $\pm$ mm)
1	2.93	2.12	1.79	0.005
2	3.11	2.05	2.34	0.005
3	2.52	3.14	1.86	0.005
4	2.90	1.96	2.63	0.005
5	2.82	2.66	2.76	0.005
6	2.81	2.61	2.29	0.005

*Nota:* Se determinó el grosor de 3 puntos alrededor de las rodajas para poder tener uniformidad de grosor entre las corridas. Condiciones 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 98.**

*Diámetros mayor y menor de las 6 rodajas de muestra secado 10*

Muestra	Diámetro mayor (mm)	Diámetro menor (mm)	Error ( $\pm$ mm)
1	67.42	67.42	0.005
2	64.71	64.36	0.005
3	66.36	70.59	0.005
4	70.49	66.11	0.005
5	60.04	66.77	0.005

6	61.43	59.54	0.005
---	-------	-------	-------

*Nota:* Se determinó el grosor el diámetro menor y mayor para determinar el área de las rodajas utilizadas. Por medio de un vernier digital marca Turper. Condiciones 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 99.**

*Datos de masa de 6 rodajas de muestra de secado 10 contra tiempo*

Hora	Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Error ( $\pm$ g)
		1	2	3	4	5	6	
10:45	0	7.8427	7.3053	7.4192	8.7241	6.2989	5.9068	0.00005
10:56	11	6.0446	5.7840	5.9287	7.1243	5.1593	4.8497	0.00005
11:15	21	4.5554	4.5781	4.9246	5.9145	4.3249	4.1180	0.00005
11:31	31	3.4506	3.5289	4.0558	4.7925	3.5961	3.4605	0.00005
11:45	42	2.5203	2.6052	3.2469	3.7011	2.9015	2.8377	0.00005
11:58	52	1.9592	1.9445	2.6277	2.8909	2.3602	2.3199	0.00005
12:19	65	1.5284	1.4432	2.0267	2.2510	1.8485	1.8087	0.00005
12:42	85	1.2230	1.1396	1.3808	1.6072	1.2761	1.2148	0.00005
13:08	105	1.1858	1.1029	1.1543	1.3646	1.0191	0.9543	0.00005
13:44	135	1.1718	1.0904	1.1127	1.3153	0.9282	0.8966	0.00005
14:25	165	1.1612	1.0706	1.0878	1.2872	0.9231	0.8729	0.00005
14:50	185	1.1578	1.0660	1.0817	1.2800	0.9201	0.8710	0.00005

*Nota:* Se determinó la masa de cada una de las 6 muestras utilizadas para realizar la curva de pérdida de masa y la curva de secado de cada secado. Condiciones 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 100.**

*Condiciones de operación de secador respecto el tiempo en el secado 10*

Tiempo transcurrido (min)	Temperatura de salida de aire ( $\pm 0.05^\circ\text{C}$ )	Humedad de salida de aire ( $\pm 0.01\%$ )	Temperatura termocupla sobre bandeja de secado ( $\pm 0.05^\circ\text{C}$ )
0	64.6	31.10%	58.0
10	60.3	29.40%	58.1
20			
30			
40			
50	61.5	29.50%	55.4
60	59.9	28.80%	60.0
80	60.2	28.80%	63.0
103			
118			
138	59.7	29.20%	64.5
158	61.8	28.80%	62.0
188			

*Nota:* Se midió las condiciones para tener un control del comportamiento del equipo y del secado utilizando un higrómetro marca EXTECH y una termocupla marca Brewferm. Condiciones 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 101.**

*Condiciones de operación dentro de secador en secado 10*

Aspecto	Medición	Error ( $\pm$ )
Humedad dentro del secador	28.60%	0.005%
Temperatura dentro de secador	56.2°C	0.05°C

Temperatura superficie de secador	62.8°C	0.05°C
Velocidad de aire entrante	4.1 m/s	0.05 m/s
Temperatura de entrada de aire	67.2°C	0.05°C
Humedad de entrada de aire	29.6%	0.005%

*Nota:* Se midió las condiciones para tener un control del comportamiento del equipo y del secado utilizando un higrómetro marca EXTECH y una termocupla marca Brewferm. Condiciones 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

La undécima corrida correspondió a la corrida de secado de rodajas de manzana con pretratamiento químico a una temperatura de 65°C y los datos experimentales se enlistan en las Tablas 102-109.

**Tabla 102.**

*Condiciones de operación de secado 11 a 65°C de rodajas de manzana con pretratamiento químico*

Aspecto	Medición	Error (±)
Humedad ambiental	53.1%	0.005%
Temperatura ambiental	23.8°C	0.05°C

*Nota:* Se realizó la lectura de un higrómetro digital para determinar las condiciones ambientales y relacionarlas con los resultados. Elaboración propia.

**Tabla 103.**

*Temperatura inicial manzana secado 11*

Muestra	Medición (°C)	Error (±°C)
1	28.7	0.05°C

*Nota:* Se determinó la temperatura utilizando un termómetro laser infrarrojo marca Fulkle para poder utilizarlo para obtener la entalpía inicial del sólido en el cálculo 16. Condiciones 1.0 atm y 23.8°C. Elaboración propia.

**Tabla 104.**

*Masa manzana previo y posterior a secado 11*

Aspecto	Medición (g)	Error (±g)
Masa manzana fresca	555.4	0.05
Masa manzana cortada en rodajas	553.0	0.05
Masa manzana deshidratada	79.5	0.05

*Nota:* Se determinó la masa de manzana fresca ingresada al secado y el de la salida para utilizarlo en el balance de masa utilizando la balanza marca Ohaus. Condiciones 1.0 atm y 23.8°C. Elaboración propia.

**Tabla 105.**

*Grosor de 6 rodajas de manzana utilizadas para la curva de secado 11*

Muestra	Grosor 1 (mm)	Grosor 2 (mm)	Grosor 3 (mm)	Error (±mm)
1	1.99	2.15	3.40	0.005
2	2.66	3.20	3.09	0.005
3	2.94	3.30	2.51	0.005
4	2.76	1.96	1.68	0.005
5	2.48	3.48	3.14	0.005
6	2.97	2.93	2.32	0.005

*Nota:* Se determinó el grosor de 3 puntos alrededor de las rodajas para poder tener uniformidad de grosor entre las corridas. Condiciones 1.0 atm y 23.8°C. Elaboración propia.

**Tabla 106.**

*Diámetros mayor y menor de las 6 rodajas de muestra secado 11*

Muestra	Diámetro mayor (mm)	Diámetro menor (mm)	Error (±mm)
1	74.87	58.90	0.005

2	76.23	62.36	0.005
3	71.23	71.23	0.005
4	78.20	71.46	0.005
5	78.49	71.70	0.005
6	77.99	72.46	0.005

*Nota:* Se determinó el grosor el diámetro menor y mayor para determinar el área de las rodajas utilizadas. Por medio de un vernier digital marca Turper. Condiciones 1.0 atm y 23.8°C. Elaboración propia.

**Tabla 107.**

*Datos de masa de 6 rodajas de muestra de secado 11 contra tiempo*

Hora	Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Error ( $\pm$ g)
		1	2	3	4	5	6	
10:45	0 (sin pretratamiento)	5.6721	9.6065	8.9835	7.0159	10.3060	10.1010	0.00005
11:06	0 (Con pretratamiento)	6.8156	11.1494	10.2809	8.3508	11.5656	11.5566	
11:18	10	5.9128	10.3660	9.3090	7.0962	10.3601	10.2762	0.00005
11:31	20	4.9380	9.4305	8.0038	5.8560	9.1261	8.9763	0.00005
11:45	30	4.0415	8.4654	6.7430	4.7185	7.9543	7.7143	0.00005
12:01	40	3.1973	7.5384	5.5436	3.5965	6.7952	6.5033	0.00005
12:16	50	2.5195	6.5507	4.6930	2.6705	5.7305	5.4086	0.00005
12:31	60	1.8421	5.6304	3.4924	1.9023	4.6952	4.3210	0.00005
12:56	80	1.0403	3.9798	2.1237	1.1609	3.0409	2.8316	0.00005
13:20	100	0.7896	2.7929	1.4262	1.0505	2.0433	1.8725	0.00005
13:57	130	0.7519	1.6627	1.2575	1.0226	1.5469	1.4790	0.00005
14:34	160	0.7442	1.3568	1.2379	1.0096	1.4872	1.4377	0.00005
14:55	180	0.7417	1.3202	1.2320	1.0053	1.4747	1.4273	0.00005

*Nota:* Se determinó la masa de cada una de las 6 muestras utilizadas para realizar la curva de pérdida de masa y la curva de secado de cada secado. Condiciones 1.0 atm y 23.8°C. Elaboración propia.

**Tabla 108.**

*Condiciones de operación de secador respecto el tiempo en el secado 11*

Tiempo transcurrido (min)	Temperatura de salida de aire ( $\pm 0.05^\circ\text{C}$ )	Humedad de salida de aire ( $\pm 0.01\%$ )	Temperatura termocupla sobre bandeja de secado ( $\pm 0.05^\circ\text{C}$ )
0 (Con pretratamiento)			
10	56.2	19.50%	57.8
20	59.2	19.90%	59.7
30			
40	61.5	20.30%	63.3
50	59.4	19.50%	61.2
60			
80			
100	57.6	19.40%	61.8
130	57.3	19.40%	60.2
160			
180			

*Nota:* Se midió las condiciones para tener un control del comportamiento del equipo y del secado utilizando un higrómetro marca EXTECH y una termocupla marca Brewferm. Condiciones 1.0 atm y 23.8°C. Elaboración propia.

**Tabla 109.***Condiciones de operación dentro de secador en secado 11*

<b>Aspecto</b>	<b>Medición</b>	<b>Error (<math>\pm</math>)</b>
Humedad dentro del secador	22.50%	0.005%
Temperatura dentro de secador	62.1°C	0.05°C
Temperatura superficie de secador	60.4°C	0.05°C
Velocidad de aire entrante	3.5 m/s	0.05 m/s
Temperatura de entrada de aire	65.9°C	0.05°C
Humedad de entrada de aire	23.00%	0.005%

*Nota:* Se determinó las condiciones de aire de secado por medio de un anemómetro marca CE, higrómetro marca EXTECH esto para utilizarlo en el balance de masa y energía de la corrida. Condiciones 1.0 atm y 23.8°C. Elaboración propia.

## Anexo F: Datos calculados

En este apartado tenemos todos los datos calculados a partir de los datos originales, utilizando las diferentes ecuaciones mencionadas en el trabajo. Estos datos fueron esenciales para poder obtener los resultados finales. Comenzando por los cálculos relacionados a la caracterización de la manzana los cuales se encuentran en las Tablas 110-112.

**Tabla 110.**

*Relación de diámetros de manzanas*

Muestra	Relación de diámetros	Error ( $\pm$ )
1	1.27	1.08E-04
2	1.22	9.83E-05
3	1.00	7.05E-05
4	1.09	7.69E-05

*Nota:* Se determinó la relación de diámetros de 4 muestras utilizando los datos de la Tabla 15 y la ecuación 11 por medio del cálculo 3. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 111.**

*Jugosidad de manzanas Gala*

Muestra	Jugosidad (g/g)	Error ( $\pm$ g/g)
1	0.37	3.84E-04
2	0.36	4.07E-04
3	0.40	3.62E-04
4	0.50	4.28E-04

*Nota:* Se determinó la jugosidad por medio del cálculo 6, utilizando la ecuación 12 y los datos obtenidos de la Tabla 17. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 112.**

*Acidez titulable (porcentaje de ácido málico)*

Muestra	Acidez titulable (%)	Error ( $\pm$ %)
1	0.51%	0.003%
2	0.44%	0.003%
3	0.51%	0.003%
4	0.47%	0.003%

*Nota:* Se determinó la acidez titulable por medio de la ecuación 13, cálculo 7 y los datos de volumen extraído de jugo en la Tabla 19 y masa de muestra de 15 gramos. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

A continuación, se detalla los datos calculados de para la obtención de las curvas de secado y las curvas de pérdida de humedad respecto al tiempo, así como los balances de energía y masa para el secado 3. Esto se puede observar en las Tablas 113-121. Y las Figuras 33-35.

**Tabla 113.**

*Área superficial de rodajas de muestra de secado 3*

Muestra	Área superficial (m <sup>2</sup> )	Error ( $\pm$ m <sup>2</sup> )
1	5.08E-03	1.09E-05
2	4.50E-03	9.49E-06
3	4.98E-03	1.15E-05
4	5.84E-03	1.08E-05
5	4.82E-03	9.33E-06
6	6.87E-03	1.18E-05

*Nota:* Se determinó el área superficial de la rodaja de muestra para cada una de las corridas por medio del cálculo 12 con las ecuaciones 23 y 24 utilizando los datos de la Tabla 41. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 20.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 114.**

*Sólido seco de muestras de secado 3 y relación de sólidos secos sobre área superficial*

Muestra	Sólido seco (kg)	Sólido seco/ Área superficial (m <sup>2</sup> /kg seco)
1	0.0009	0.1858
2	0.0008	0.1705
3	0.0008	0.1591
4	0.0010	0.1649
5	0.0008	0.1651
6	0.0014	0.2095

*Nota:* Se determinó el sólido seco y la relación de sólido seco por medio del cálculo 13 con la ecuación 25 utilizando los datos de la Tabla 42 con tiempo de secado 0. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 20.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 115.**

*Agua perdida con respecto al tiempo de secado 3*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Error (±g de agua)
	1	2	3	4	5	6	
0							
10	0.7702	0.6417	0.7641	0.8837	0.8931	0.9670	7.07E-05
20	0.5619	0.5410	0.6114	0.6970	0.6584	0.7923	7.07E-05
30	0.5169	0.5000	0.5266	0.6049	0.5685	0.7346	7.07E-05
40	0.4574	0.4689	0.4697	0.5496	0.4789	0.6720	7.07E-05
60	0.9053	0.6894	0.8499	1.1425	0.8852	1.2923	7.07E-05
80	0.6326	0.5424	0.5503	0.7313	0.5242	0.9844	7.07E-05
110	0.7539	0.5404	0.4901	0.6117	0.4214	1.1235	7.07E-05
125	0.3042	0.2276	0.1531	0.1490	0.0884	0.5087	7.07E-05
150	0.3146	0.1662	0.1007	0.1118	0.0447	0.5410	7.07E-05
160	0.0893	0.0238	0.0137	0.0279	0.0070	0.1761	7.07E-05

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 8 con la ecuación 20 y utilizando los datos de la Tabla 42 y en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 20.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 116.**

*Contenido de agua de muestras en secado 3*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra					
	1	2	3	4	5	6
0	5.429	4.413	4.562	5.543	4.577	8.289
10	4.658	3.771	3.798	4.659	3.684	7.322
20	4.096	3.230	3.187	3.962	3.025	6.529
30	3.580	2.730	2.660	3.357	2.457	5.795
40	3.122	2.262	2.190	2.808	1.978	5.123
60	2.217	1.572	1.340	1.665	1.093	3.830
80	1.584	1.030	0.790	0.934	0.569	2.846
110	0.830	0.489	0.300	0.322	0.147	1.722
125	0.526	0.262	0.147	0.173	0.059	1.214

150	0.212	0.096	0.046	0.062	0.014	0.673
160	0.122	0.072	0.033	0.034	0.007	0.497

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 9 con la ecuación 21 para el tiempo 0 y para el tiempo n la ecuación 22 utilizando los datos de la Tabla 114 y Tabla 42 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 20.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 117.**

*Humedad en base húmeda secado 3 (kg agua/kg sólido húmedo)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra					
	1	2	3	4	5	6
0	85.20%	85.20%	85.20%	85.20%	85.20%	85.20%
10	83.16%	83.11%	82.74%	82.87%	82.25%	83.57%
20	81.29%	80.82%	80.08%	80.45%	79.19%	81.93%
30	79.15%	78.08%	77.05%	77.71%	75.55%	80.10%
40	76.80%	74.68%	73.43%	74.46%	71.33%	78.06%
60	70.16%	67.22%	62.84%	63.36%	57.89%	72.68%
80	62.69%	57.33%	49.93%	49.24%	41.70%	66.41%
110	46.82%	38.96%	27.46%	25.08%	15.62%	54.47%
125	35.81%	25.46%	15.64%	15.25%	6.88%	45.74%
150	18.32%	11.09%	5.51%	6.01%	1.74%	31.85%
160	11.47%	8.56%	3.94%	3.37%	0.88%	25.65%

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 10 con la ecuación 2 y utilizando los datos de la Tabla 42 y 115 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 20.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 118.**

*Humedad base seca de secado 3 (kg agua/kg sólido seco)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Promedio de humedad
	1	2	3	4	5	6	
0	5.757	5.757	5.757	5.757	5.757	5.757	5.757
10	4.940	4.920	4.793	4.839	4.633	5.085	4.868
20	4.344	4.214	4.021	4.115	3.805	4.535	4.172
30	3.796	3.562	3.357	3.487	3.090	4.025	3.553
40	3.311	2.950	2.764	2.916	2.488	3.558	2.998
60	2.351	2.051	1.691	1.730	1.374	2.660	1.976
80	1.680	1.343	0.997	0.970	0.715	1.977	1.280
110	0.881	0.638	0.379	0.335	0.185	1.196	0.602
125	0.558	0.341	0.185	0.180	0.074	0.843	0.364
150	0.224	0.125	0.058	0.064	0.018	0.467	0.159
160	0.130	0.094	0.041	0.035	0.009	0.345	0.109

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 11 con la ecuación 3 y utilizando los datos de la Tabla 116 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 20.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 119.**

*Velocidad de secado o flujo de transferencia de masa secado 3 (kg/min\*m2)*

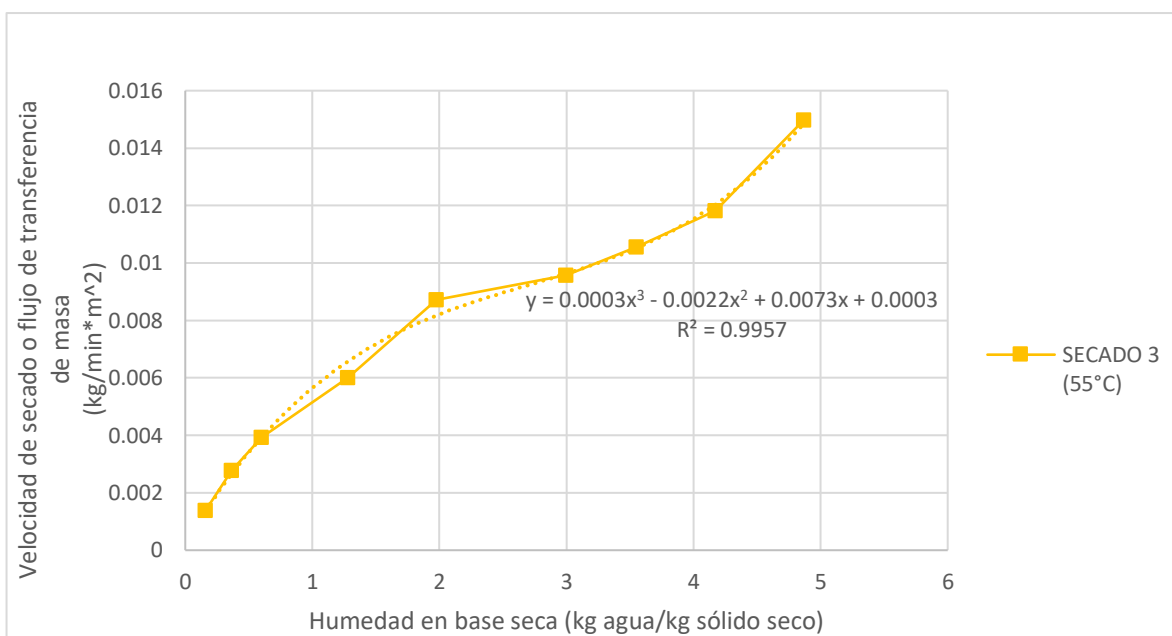
Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Promedio de flujo de trans
	1	2	3	4	5	6	
0							

10	0.0152	0.0143	0.0153	0.0151	0.0185	0.0141	0.0150
20	0.0111	0.0120	0.0123	0.0119	0.0137	0.0115	0.0118
30	0.0102	0.0111	0.0106	0.0104	0.0118	0.0107	0.0106
40	0.0090	0.0104	0.0094	0.0094	0.0099	0.0098	0.0096
60	0.0089	0.0077	0.0085	0.0098	0.0092	0.0094	0.0087
80	0.0062	0.0060	0.0055	0.0063	0.0054	0.0072	0.0060
110	0.0050	0.0040	0.0033	0.0035	0.0029	0.0054	0.0039
125	0.0040	0.0034	0.0020	0.0017	0.0012	0.0049	0.0028
150	0.0025	0.0015	0.0008	0.0008	0.0004	0.0031	0.0014
160	0.0018	0.0005	0.0003	0.0005	0.0001	0.0026	0.0008

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 11 con la ecuación 3 y utilizando los datos de la Tabla 117 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras y con sólido seco/área superficial de la Tabla 113. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 20.5°C. Elaboración propia.

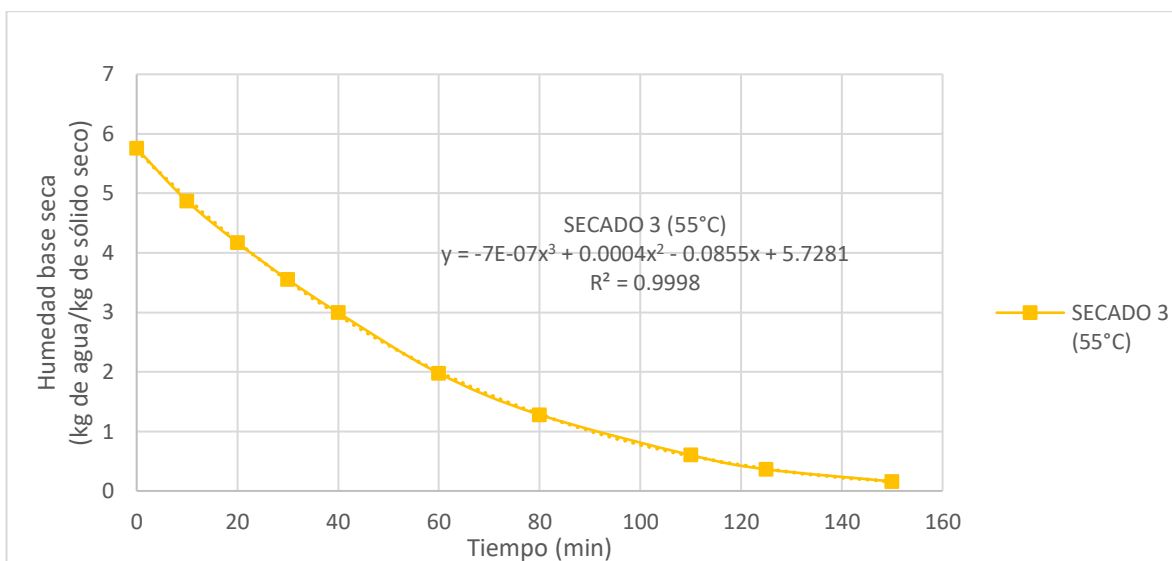
**Figura 33.**

*Curva de secado 3 a 55°C, velocidad de secado vs humedad en base seca*



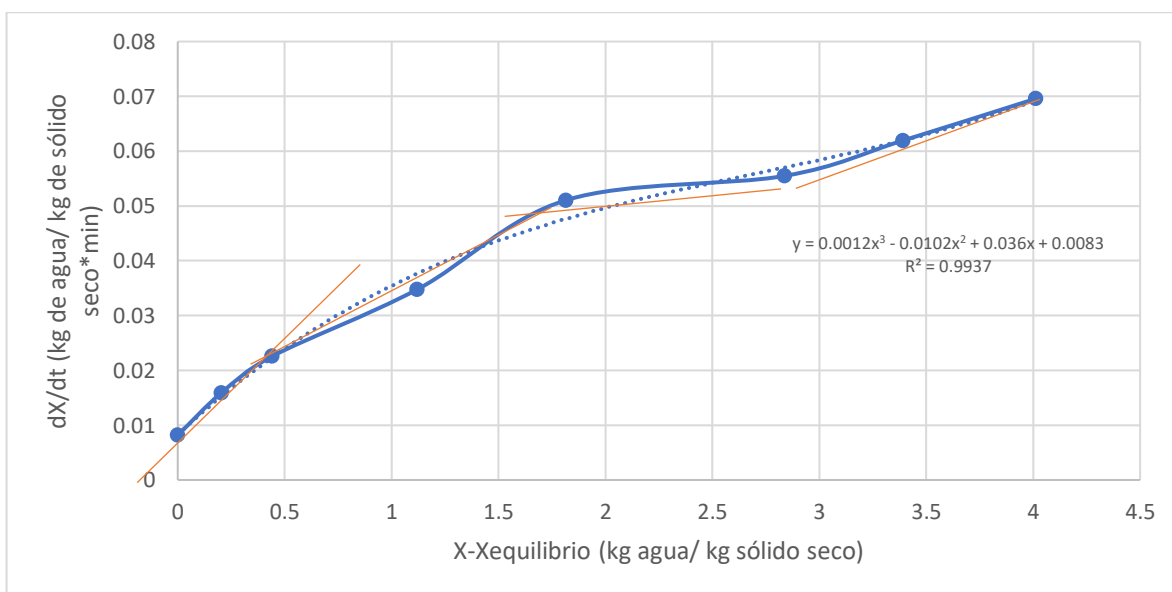
*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 117 y 118, graficando los promedios de las 6 muestras de la corrida 3. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 20.5°C. Elaboración propia.

**Figura 34:**  
Curva de pérdida de Humedad Secado 3 a 55°C vs tiempo



*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 117, graficando los promedios de las 6 muestras de la corrida 3. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 20.5°C. Elaboración propia.

**Figura 35:**  
Curva de cambio de humedad respecto al tiempo contra el cambio de humedad base seca de equilibrio secado 3 a 55°C



*Nota:* Esta gráfica se realizó utilizando los datos de la Tabla 118, graficando los promedios del delta humedad partido el tiempo vs la humedad menos la humedad de equilibrio del sólido (final). Las líneas naranjas muestran las rectas tangentes o tendencia de los tramos de la curva. Esta gráfica se lee de derecha a izquierda ya que en el tiempo 0 se cuenta con la mayor cantidad de humedad en base seca y en el tiempo final con la menor humedad.

La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 20.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 120.**

*Balace de masa y energía de secado 3*

Aspecto	Flujo (kg/h)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Humedad en base seca (kg de agua/kg base seca)	Entalpía (kJ/kg)
Entrada de manzanas frescas	0.063	21.4	85.20%	5.76	593.06
Salida de restos de manzana	0.004	21.4	85.20%	5.76	593.06
Entrada de rodajas de manzana	0.059	21.4	85.20%	5.76	593.06
Salida de sólido seco	0.009	46.0	12.42%	0.109	188.83
Entrada de aire ambiente	845.208	20.5	50.01%	0.008	2260.00
Salida aire calentador y entrada secador	845.208	57	23.80%	0.030	593.06
Salida aire secador	845.208	53.9	33.0%	0.030	125.97

*Nota:* Esta Tabla se completó por medio de los cálculos 15-18 y 20, utilizando los datos originales del secado 3, las condiciones de operación del equipo, descritas en la Tabla 37, 38, 39, 43 y 44. Condiciones de los datos originales: 1.0 atm y 20.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 121.**

*Balace de energía de secado 3*

Aspecto	Flujo (kJ/h)	Incertidumbre ( $\pm$ kJ/h)
Calor de pérdidas al ambiente	2,000.84	10.78
Calor calentamiento aire	31,066.04	161.04
Calor calentamiento manzana	6.11	0.03
Calor útil de evaporación	0.77	
Calor perdido aire servido	6.45	
Calor secado real	13.33	0.07
Calor total	2,014.17	10.78
Energía total	33,080.21	161.40

*Nota:* Esta Tabla se completó por medio de los cálculos 19-25 tomando los datos de la Tabla 119. Condiciones de los datos originales: 1.0 atm y 20.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 122.**

*Balace de energía de secado 3*

Muestra	Área superficial (m <sup>2</sup> )	Error ( $\pm$ m <sup>2</sup> )
1	4.72E-03	8.76E-06
2	8.01E-03	1.38E-05
3	7.07E-03	1.43E-05
4	4.99E-03	1.00E-05
5	5.37E-03	1.01E-05
6	7.56E-03	1.49E-05

*Nota:* Se determinó el área superficial de la rodaja de muestra para cada una de las corridas por medio del cálculo 12 con las ecuaciones 23 y 24 utilizando los datos de la Tabla 49. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

A continuación, se detalla los datos calculados de para la obtención de las curvas de secado y las curvas de pérdida de humedad respecto al tiempo, así como los balances de energía y masa para el secado 4. Esto se puede observar en las Tablas 123-130. Y las Figuras 36-38.

**Tabla 123.**

*Sólido seco de muestras de secado 4 y relación de sólidos secos sobre área superficial*

Muestra	Sólido seco (kg)	Sólido seco/ Área superficial (m <sup>2</sup> /kg seco)
1	0.0008	0.1726
2	0.0012	0.1509
3	0.0010	0.1388
4	0.0008	0.1646
5	0.0012	0.2170
6	0.0015	0.1966

*Nota:* Se determinó el sólido seco y la relación de sólido seco por medio del cálculo 13 con la ecuación 25 utilizando los datos de la Tabla 50 con tiempo de secado 0. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 124.**

*Agua perdida con respecto al tiempo de secado 4*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Error (±g de agua)
	1	2	3	4	5	6	
0							
12	0.9814	1.3625	1.1909	0.9268	0.9356	1.3887	7.07E-05
22	0.6528	1.0154	0.8620	0.6572	0.6396	0.9723	7.07E-05
32	0.6389	0.9512	0.8431	0.6958	0.6851	0.9391	7.07E-05
47	0.7775	1.0851	0.9650	0.8488	0.8764	1.1385	7.07E-05
57	0.3961	0.5291	0.5178	0.4505	0.4858	0.6192	7.07E-05
67	0.2908	0.3557	0.3437	0.3168	0.3902	0.4659	7.07E-05
77	0.2798	0.3196	0.2859	0.2891	0.4140	0.4860	7.07E-05
87	0.1941	0.2358	0.1871	0.1975	0.3922	0.4212	7.07E-05
134	0.2568	0.5359	0.1885	0.1923	1.0276	1.0620	7.07E-05
149	0.0131	0.0951	0.0107	0.0087	0.2129	0.2202	7.07E-05
160	0.0071	0.0630	0.0046	0.0031	0.1285	0.1340	7.07E-05
187	0.0062	0.0622	0.0049	0.0045	0.1157	0.1376	7.07E-05

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 8 con la ecuación 20 y utilizando los datos de la Tabla 50 y en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 125.**

*Contenido de agua de muestras en secado 4*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra					
	1	2	3	4	5	6
0	4.6187	6.8523	5.5638	4.6600	6.6049	8.4257
12	3.6373	5.4898	4.3729	3.7332	5.6693	7.0370
22	2.9845	4.4744	3.5109	3.0760	5.0297	6.0647
32	2.3456	3.5232	2.6678	2.3802	4.3446	5.1256

47	1.5681	2.4381	1.7028	1.5314	3.4682	3.9871
57	1.1720	1.9090	1.1850	1.0809	2.9824	3.3679
67	0.8812	1.5533	0.8413	0.7641	2.5922	2.9020
77	0.6014	1.2337	0.5554	0.4750	2.1782	2.4160
87	0.4073	0.9979	0.3683	0.2775	1.7860	1.9948
134	0.1505	0.4620	0.1798	0.0852	0.7584	0.9328
149	0.1374	0.3669	0.1691	0.0765	0.5455	0.7126
160	0.1303	0.3039	0.1645	0.0734	0.4170	0.5786
187	0.1241	0.2417	0.1596	0.0689	0.3013	0.4410

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 9 con la ecuación 21 para el tiempo 0 y para el tiempo n la ecuación 22 utilizando los datos de la Tabla 123 y Tabla 50 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 126.**

*Humedad en base húmeda secado 4 (kg agua/kg sólido húmedo)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra					
	1	2	3	4	5	6
0	85.00%	85.00%	85.00%	85.00%	85.00%	85.00%
12	81.69%	81.95%	81.66%	81.95%	82.95%	82.56%
22	78.55%	78.72%	78.15%	78.91%	81.19%	80.31%
32	74.21%	74.45%	73.10%	74.32%	78.85%	77.51%
47	65.80%	66.85%	63.43%	65.06%	74.85%	72.84%
57	58.98%	61.22%	54.69%	56.79%	71.90%	69.37%
67	51.95%	56.23%	46.14%	48.17%	68.98%	66.12%
77	42.46%	50.50%	36.13%	36.61%	65.14%	61.90%
87	33.32%	45.21%	27.28%	25.23%	60.51%	57.29%
134	15.59%	27.64%	15.48%	9.39%	39.42%	38.55%
149	14.43%	23.28%	14.69%	8.51%	31.88%	32.40%
160	13.79%	20.08%	14.35%	8.20%	26.35%	28.01%
187	13.22%	16.66%	13.98%	7.73%	20.54%	22.88%

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 10 con la ecuación 2 y utilizando los datos de la Tabla 50 y 124 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 127.**

*Humedad base seca de secado 4 (kg agua/kg sólido seco)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Promedio de humedad
	1	2	3	4	5	6	
0	5.667	5.667	5.667	5.667	5.667	5.667	5.667
12	4.463	4.540	4.454	4.540	4.864	4.733	4.599
22	3.662	3.700	3.576	3.741	4.315	4.079	3.845
32	2.878	2.914	2.717	2.894	3.727	3.447	3.096
47	1.924	2.016	1.734	1.862	2.976	2.682	2.199
57	1.438	1.579	1.207	1.314	2.559	2.265	1.727
67	1.081	1.285	0.857	0.929	2.224	1.952	1.388
77	0.738	1.020	0.566	0.578	1.869	1.625	1.066
87	0.500	0.825	0.375	0.337	1.532	1.342	0.819
134	0.185	0.382	0.183	0.104	0.651	0.627	0.355
149	0.169	0.303	0.172	0.093	0.468	0.479	0.281
160	0.160	0.251	0.168	0.089	0.358	0.389	0.236
187	0.152	0.200	0.163	0.084	0.259	0.297	0.192

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 11 con la ecuación 3 y utilizando los datos de la Tabla 125 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 128.**

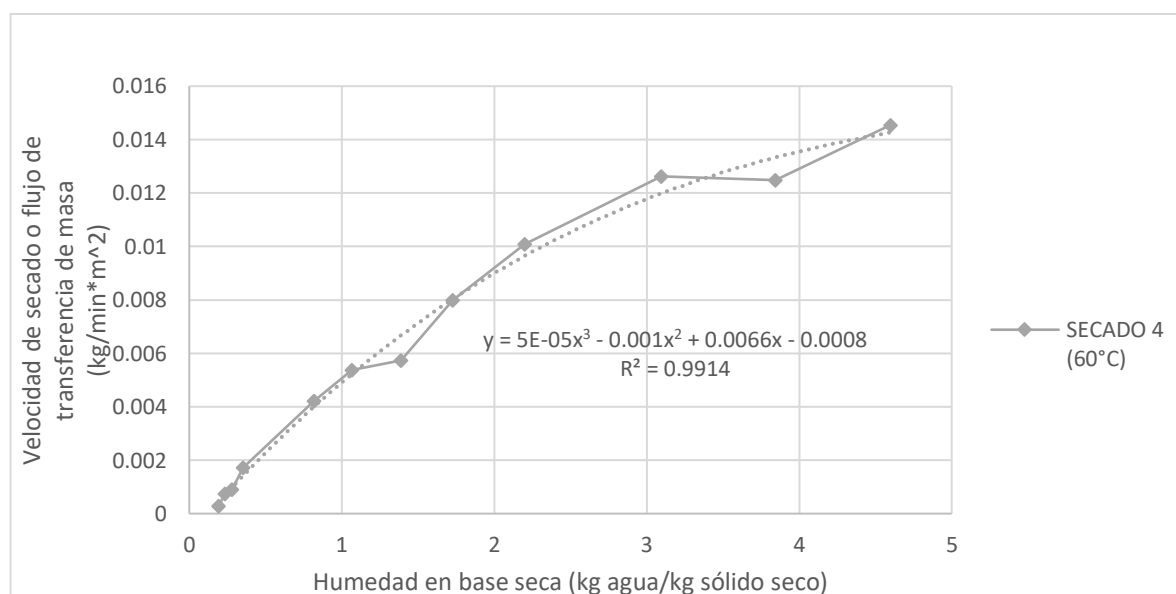
*Velocidad de secado o flujo de transferencia de masa secado 4 (kg/min\*m2)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Promedio de flujo de trans
	1	2	3	4	5	6	
0							
12	0.0173	0.0142	0.0140	0.0155	0.0145	0.0153	0.0145
22	0.0138	0.0127	0.0122	0.0132	0.0119	0.0129	0.0125
32	0.0135	0.0119	0.0119	0.0139	0.0128	0.0124	0.0126
47	0.0110	0.0090	0.0091	0.0113	0.0109	0.0100	0.0101
57	0.0084	0.0066	0.0073	0.0090	0.0090	0.0082	0.0080
67	0.0062	0.0044	0.0049	0.0063	0.0073	0.0062	0.0057
77	0.0059	0.0040	0.0040	0.0058	0.0077	0.0064	0.0054
87	0.0041	0.0029	0.0026	0.0040	0.0073	0.0056	0.0042
134	0.0012	0.0014	0.0006	0.0008	0.0041	0.0030	0.0017
149	0.0002	0.0008	0.0001	0.0001	0.0026	0.0019	0.0009
160	0.0001	0.0007	0.0001	0.0001	0.0022	0.0016	0.0008
187	0.0000	0.0003	0.0000	0.0000	0.0008	0.0007	0.0003

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 11 con la ecuación 3 y utilizando los datos de la Tabla 126 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras y con sólido seco/área superficial de la Tabla 122. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Figura 36.**

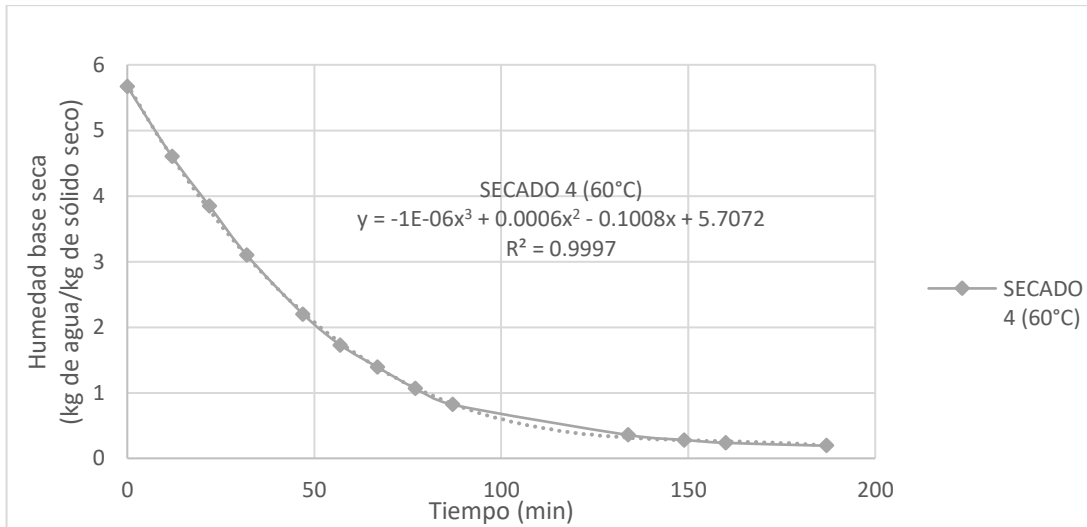
*Curva de secado 4 a 60°C, velocidad de secado vs humedad en base seca*



*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 126 y 127, graficando los promedios de las 6 muestras de la corrida 4. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Figura 37.**

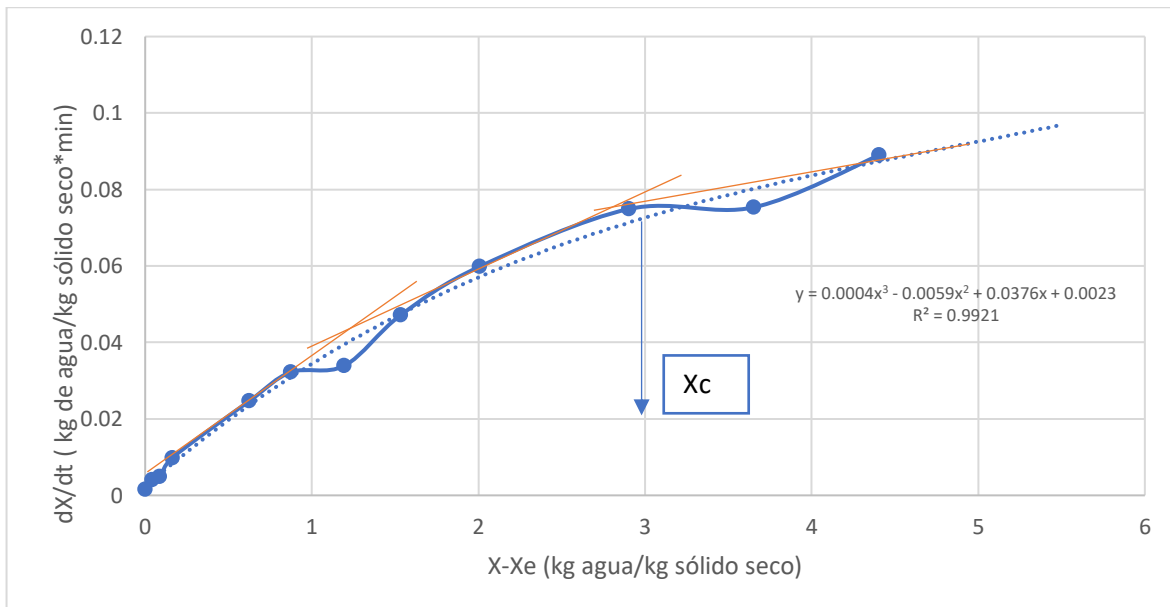
Curva de pérdida de humedad secado 4 a 60°C vs tiempo



*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 126, graficando los promedios de las 6 muestras de la corrida 4. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Figura 38.**

Curva de cambio de humedad respecto al tiempo contra el cambio de humedad base seca de equilibrio secado 4 a 60°C



*Nota:* Esta gráfica se realizó utilizando los datos de la Tabla 127, graficando los promedios del delta humedad partido el tiempo vs la humedad menos la humedad de equilibrio del sólido (final). Las líneas naranjas muestran las rectas tangentes o tendencia de los tramos de la curva. Esta gráfica se lee de derecha a izquierda ya que en el tiempo 0 se cuenta con la mayor cantidad de humedad en base seca y en el tiempo final con la menor humedad. Xc corresponde a la humedad a la que la curva deja de tener comportamiento constante y comienza la decaída

de velocidad. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 129.**

*Balace de masa y energía de secado 4*

Aspecto	Flujo (kg/h)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Humedad en base seca (kg de agua/kg base seca)	Entalpía (kJ/kg)
Entrada de manzanas frescas	0.050	18.8	85.00%	5.67	513.93
Salida de restos de manzana	0.000	18.8	85.00%	5.67	513.93
Entrada de rodajas de manzana	0.050	18.8	85.00%	5.67	513.93
Salida de sólido seco	0.009	58.0	12.90%	0.192	258.31
Entrada de aire ambiente	617.652	19.5	40.00%	0.005	2260.00
Salida aire calentador y entrada secador	617.652	64.8	21.00%	0.040	513.93
Salida aire secador	617.652	60.2	25.0%	0.040	156.49

*Nota:* Esta Tabla se completó por medio de los cálculos 15-18 y 20, utilizando los datos originales del secado 4, las condiciones de operación del equipo, descritas en la Tabla 45, 46, 47, 51 y 52. Condiciones de los datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 130.**

*Balace de energía secado 4*

Aspecto	Flujo (kJ/h)	Incertidumbre
Calor de pérdidas al ambiente	2,436.80	13.30
Calor calentamiento aire	28,175.49	150.89
Calor calentamiento manzana	8.21	0.05
Calor útil de evaporación	641.43	
Calor perdido aire servido	6.63	
Calor secado real	656.27	3.67
Calor total	3,093.07	13.79
Energía total	31,268.56	151.52

*Nota:* Esta Tabla se completó por medio de los cálculos 19-25 tomando los datos de la Tabla 128. Condiciones de los datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

A continuación, se detalla los datos calculados de para la obtención de las curvas de secado y las curvas de pérdida de humedad respecto al tiempo, así como los balances de energía y masa para el secado 5. Esto se puede observar en las Tablas 131-139. Y las Figuras 39 y 40.

**Tabla 131.**

*Área superficial de rodajas de muestra de secado 5*

Muestra	Área superficial (m <sup>2</sup> )	Error (±m <sup>2</sup> )
1	7.40E-03	1.43E-05

2	6.41E-03	1.23E-05
3	4.59E-03	7.73E-06
4	5.42E-03	9.86E-06
5	7.40E-03	1.53E-05
6	5.82E-03	1.21E-05

*Nota:* Se determinó el área superficial de la rodaja de muestra para cada una de las corridas por medio del cálculo 12 con las ecuaciones 23 y 24 utilizando los datos de la Tabla 57. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 132.**

*Sólido seco de muestras de secado 5 y relación de sólidos secos sobre área superficial*

Muestra	Sólido seco (kg)	Sólido seco/ Área superficial (m <sup>2</sup> /kg seco)
1	0.0010	0.1384
2	0.0010	0.1520
3	0.0009	0.2054
4	0.0010	0.1778
5	0.0009	0.1240
6	0.0009	0.1606

*Nota:* Se determinó el sólido seco y la relación de sólido seco por medio del cálculo 13 con la ecuación 25 utilizando los datos de la Tabla 58 con tiempo de secado 0. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 133.**

*Agua perdida con respecto al tiempo de secado 5*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Error (±g de agua)
	1	2	3	4	5	6	
0							
10	1.4287	1.2482	0.8505	0.9759	1.0772	1.1361	7.07E-05
20	1.1662	1.1201	0.775	0.8833	0.8935	0.9213	7.07E-05
30	0.9406	0.9301	0.6526	0.7455	0.7671	0.7672	7.07E-05
77	1.9510	2.0663	1.8481	2.1415	1.9213	1.9578	7.07E-05
92	0.1922	0.1799	0.4437	0.3932	0.3295	0.2851	7.07E-05
103	0.1001	0.0403	0.3092	0.2075	0.1623	0.146	7.07E-05
130	0.0656	0.0217	0.3464	0.1427	0.1000	0.0981	7.07E-05
152	0.0266	0.0126	0.1334	0.0398	0.0289	0.0386	7.07E-05
177	0.0131	0.0073	0.0377	0.0148	0.0120	0.0174	7.07E-05

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 8 con la ecuación 20 y utilizando los datos de la Tabla 58 y en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 134.**

*Contenido de agua de muestras en secado 5*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra					
	1	2	3	4	5	6
0	5.9923	5.6992	5.5125	5.6351	5.3655	5.4708
10	4.5636	4.4510	4.6620	4.6592	4.2883	4.3347
20	3.3974	3.3309	3.8870	3.7759	3.3948	3.4134
30	2.4568	2.4008	3.2344	3.0304	2.6277	2.6462
77	0.5058	0.3345	1.3863	0.8889	0.7064	0.6884

92	0.3136	0.1546	0.9426	0.4957	0.3769	0.4033
103	0.2135	0.1143	0.6334	0.2882	0.2146	0.2573
130	0.1479	0.0926	0.2870	0.1455	0.1146	0.1592
152	0.1213	0.0800	0.1536	0.1057	0.0857	0.1206
177	0.1082	0.0727	0.1159	0.0909	0.0737	0.1032

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 9 con la ecuación 21 para el tiempo 0 y para el tiempo n la ecuación 22 utilizando los datos de la Tabla 132 y Tabla 58 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 135.**

*Humedad en base húmeda secado 5 (kg agua/kg sólido húmedo)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra					
	1	2	3	4	5	6
0	85.40%	85.40%	85.40%	85.40%	85.40%	85.40%
10	81.67%	82.04%	83.18%	82.87%	82.38%	82.25%
20	76.83%	77.37%	80.49%	79.67%	78.73%	78.49%
30	70.57%	71.13%	77.44%	75.88%	74.12%	73.89%
77	33.06%	25.56%	59.53%	47.99%	43.51%	42.40%
92	23.44%	13.69%	50.00%	33.97%	29.12%	30.13%
103	17.25%	10.50%	40.19%	23.03%	18.96%	21.58%
130	12.62%	8.68%	23.34%	13.12%	11.11%	14.55%
152	10.59%	7.59%	14.01%	9.89%	8.55%	11.42%
177	9.56%	6.94%	10.95%	8.62%	7.44%	9.94%

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 10 con la ecuación 2 y utilizando los datos de la Tabla 58 y 133 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 136.**

*Humedad base seca de secado 5 (kg agua/kg sólido seco)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Promedio de humedad
	1	2	3	4	5	6	
0	5.849	5.849	5.849	5.849	5.849	5.849	5.849
10	4.455	4.568	4.947	4.836	4.675	4.635	4.686
20	3.316	3.419	4.124	3.919	3.701	3.650	3.688
30	2.398	2.464	3.432	3.146	2.865	2.829	2.856
77	0.494	0.343	1.471	0.923	0.770	0.736	0.789
92	0.306	0.159	1.000	0.515	0.411	0.431	0.470
103	0.208	0.117	0.672	0.299	0.234	0.275	0.301
130	0.144	0.095	0.305	0.151	0.125	0.170	0.165
152	0.118	0.082	0.163	0.110	0.093	0.129	0.116
177	0.106	0.075	0.123	0.094	0.080	0.110	0.098

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 11 con la ecuación 3 y utilizando los datos de la Tabla 134 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 137.**

*Velocidad de secado o flujo de transferencia de masa secado 5 (kg/min\*m2)*

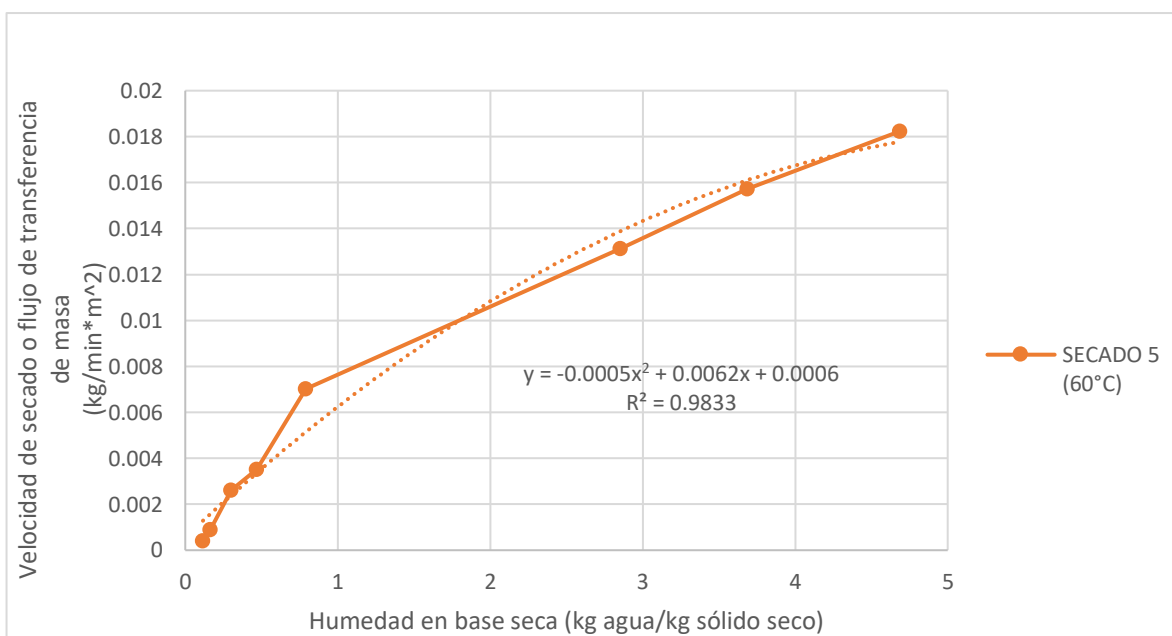
Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Promedio de flujo de trans
	1	2	3	4	5	6	

0							
10	0.0193	0.0195	0.0185	0.0180	0.0146	0.0195	0.0182
20	0.0158	0.0175	0.0169	0.0163	0.0121	0.0158	0.0157
30	0.0127	0.0145	0.0142	0.0138	0.0104	0.0132	0.0131
77	0.0056	0.0069	0.0086	0.0084	0.0055	0.0072	0.0070
92	0.0017	0.0019	0.0064	0.0048	0.0030	0.0033	0.0035
103	0.0012	0.0006	0.0061	0.0035	0.0020	0.0023	0.0026
130	0.0003	0.0001	0.0028	0.0010	0.0005	0.0006	0.0009
152	0.0002	0.0001	0.0013	0.0003	0.0002	0.0003	0.0004
177	0.0001	0.0000	0.0003	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 11 con la ecuación 3 y utilizando los datos de la Tabla 135 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras y con sólido seco/área superficial de la Tabla 131. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Figura 39.**

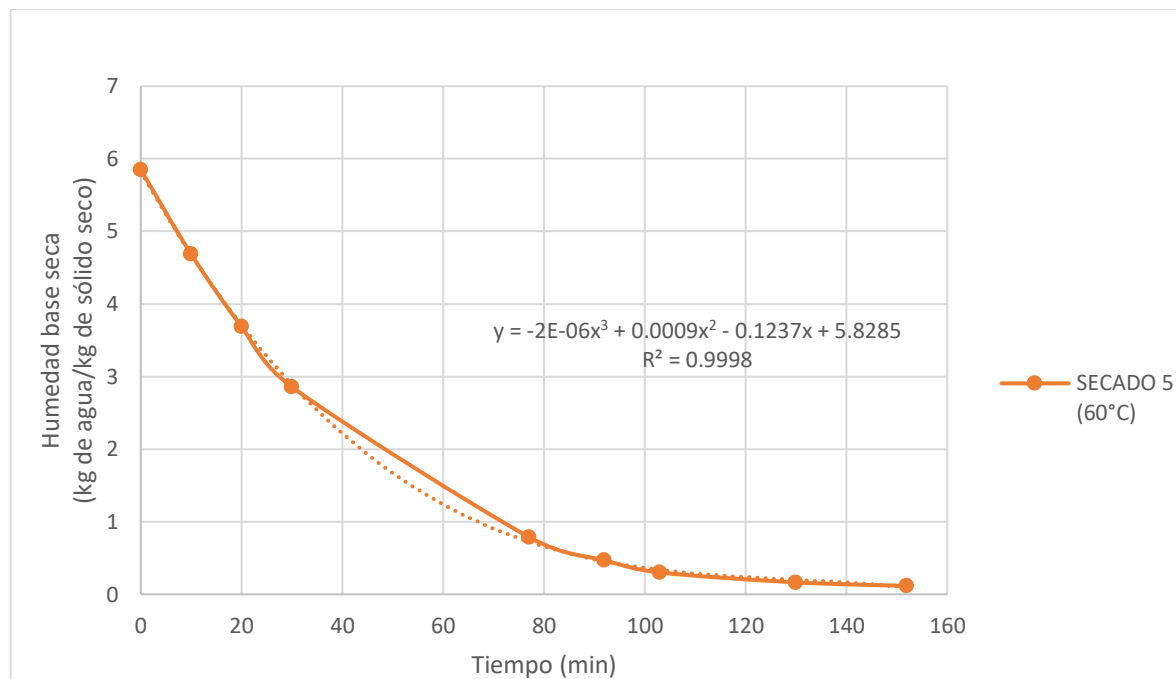
*Curva de secado 5 a 60°C, velocidad de secado vs humedad en base seca*



*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 135 y 136, graficando los promedios de las 6 muestras de la corrida 5. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Figura 40.**

Curva de pérdida de humedad secado 5 a 60°C vs tiempo



*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 135, graficando los promedios de las 6 muestras de la corrida 5. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 138.**

Balace de energía de secado 5

Aspecto	Flujo (kg/h)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Humedad en base seca (kg de agua/kg base seca)	Entalpía (kJ/kg)
Entrada de manzanas frescas	0.054	18.6	85.40%	5.85	522.66
Salida de restos de manzana	0.000	18.6	85.40%	5.85	522.66
Entrada de rodajas de manzana	0.053	18.6	85.40%	5.85	522.66
Salida de sólido seco	0.009	58	8.91%	0.098	235.47
Entrada de aire ambiente	617.652	19.5	40.00%	0.005	2260.00
Salida aire calentador y entrada secador	617.652	64.8	21.00%	0.040	522.66
Salida aire secador	617.652	60.08	25.0%	0.041	156.49

*Nota:* Esta Tabla se completó por medio de los cálculos 15-18 y 20, utilizando los datos originales del secado 5, las condiciones de operación del equipo, descritas en la Tabla 53, 54, 55, 59 y 60. Condiciones de los datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

**Tabla 139.**

*Balace de energía de secado 5*

Aspecto	Flujo (kJ/h)	Incertidumbre
Calor de pérdidas al ambiente	2,436.80	13.30
Calor calentamiento aire	28,175.49	150.89
Calor calentamiento manzana	8.79	0.05
Calor útil de evaporación	705.78	
Calor perdido aire servido	7.23	
Calor secado real	721.81	4.08
Calor total	3,158.61	13.91
Energía total	31,334.10	151.53

*Nota:* Esta Tabla se completó por medio de los cálculos 19-25 tomando los datos de la Tabla 137. Condiciones de los datos originales: 1.0 atm y 19.5°C. Elaboración propia.

A continuación, se detalla los datos calculados de para la obtención de las curvas de secado y las curvas de pérdida de humedad respecto al tiempo, así como los balances de energía y masa para el secado 6. Esto se puede observar en las Tablas 140-148. Y las Figuras 41 y 42.

**Tabla 140.**

*Área superficial de rodajas de muestra de secado 6*

Muestra	Área superficial (m <sup>2</sup> )	Error ( $\pm$ m <sup>2</sup> )
1	6.25E-03	9.55E-06
2	5.18E-03	7.77E-06
3	7.02E-03	1.34E-05
4	5.72E-03	1.06E-05
5	8.11E-03	1.35E-05
6	8.73E-03	1.59E-05

*Nota:* Se determinó el área superficial de la rodaja de muestra para cada una de las corridas por medio del cálculo 12 con las ecuaciones 23 y 24 utilizando los datos de la Tabla 65. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 141.**

*Sólido seco de muestras de secado 6 y relación de sólidos secos sobre área superficial*

Muestra	Sólido seco (kg)	Sólido seco/ Área superficial (m <sup>2</sup> /kg seco)
1	0.0011	0.1749
2	0.0010	0.1916
3	0.0010	0.1389
4	0.0008	0.1484
5	0.0013	0.1606
6	0.0010	0.1193

*Nota:* Se determinó el sólido seco y la relación de sólido seco por medio del cálculo 13 con la ecuación 25 utilizando los datos de la Tabla 65 con tiempo de secado 0. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 142.**  
*Agua perdida con respecto al tiempo de secado 6*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Error ( $\pm$ g de agua)
	1	2	3	4	5	6	
0							
10	0.9753	0.7731	0.93739	1.0123	1.0502	1.0056	7.07E-05
20	0.7257	0.6513	0.8369	0.7893	0.8475	0.7897	7.07E-05
30	0.7345	0.6752	0.7971	0.7222	0.896	0.7849	7.07E-05
40	0.6958	0.5934	0.7123	0.611	0.8036	0.6478	7.07E-05
50	0.6176	0.5094	0.6149	0.4886	0.7017	0.6395	7.07E-05
60	0.5151	0.4911	0.5271	0.3963	0.6615	0.5252	7.07E-05
80	0.8066	0.7274	0.7108	0.5188	1.0415	0.7746	7.07E-05
100	0.5637	0.5014	0.2951	0.1994	0.6301	0.4172	7.07E-05
130	0.4502	0.4874	0.0991	0.0536	0.4998	0.23	7.07E-05
160	0.1065	0.1606	0.0087	0.0065	0.1885	0.0642	7.07E-05
190	0.0272	0.0434	0.011	0.0082	0.0571	0.0231	7.07E-05

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 8 con la ecuación 20 y utilizando los datos de la Tabla 66 y en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 143.**  
*Contenido de agua de muestras en secado 6*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra					
	1	2	3	4	5	6
0	6.3938	5.8022	5.7005	4.9608	7.6167	6.0962
10	5.4185	5.0291	4.7631	3.9485	6.5665	5.0906
20	4.6928	4.3778	3.9262	3.1592	5.7190	4.3009
30	3.9583	3.7026	3.1291	2.4370	4.8230	3.5160
40	3.2625	3.1092	2.4168	1.8260	4.0194	2.8682
50	2.6449	2.5998	1.8019	1.3374	3.3177	2.2287
60	2.1298	2.1087	1.2748	0.9411	2.6562	1.7035
80	1.3232	1.3813	0.5640	0.4223	1.6147	0.9289
100	0.7595	0.8799	0.2689	0.2229	0.9846	0.5117
130	0.3093	0.3925	0.1698	0.1693	0.4848	0.2817
160	0.2028	0.2319	0.1611	0.1628	0.2963	0.2175
190	0.1756	0.1885	0.1501	0.1546	0.2392	0.1944

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 9 con la ecuación 21 para el tiempo 0 y para el tiempo n la ecuación 22 utilizando los datos de la Tabla 141 y Tabla 66 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 144.**  
*Humedad en base húmeda secado 6 (kg agua/kg sólido húmedo)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra					
	1	2	3	4	5	6
0	85.40%	85.40%	85.40%	85.40%	85.40%	85.40%
10	83.21%	83.53%	83.01%	82.32%	83.45%	83.01%
20	81.11%	81.53%	80.11%	78.84%	81.45%	80.49%
30	78.36%	78.87%	76.25%	74.18%	78.74%	77.14%
40	74.90%	75.81%	71.26%	68.28%	75.53%	73.35%

50	70.76%	72.38%	64.90%	61.19%	71.81%	68.14%
60	66.08%	68.01%	56.67%	52.60%	67.10%	62.04%
80	54.76%	58.20%	36.66%	33.24%	55.36%	47.13%
100	41.00%	47.01%	21.63%	20.81%	43.06%	32.93%
130	22.06%	28.35%	14.84%	16.64%	27.13%	21.28%
160	15.65%	18.95%	14.19%	16.10%	18.54%	17.27%
190	13.84%	15.97%	13.35%	15.42%	15.52%	15.72%

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 10 con la ecuación 2 y utilizando los datos de la Tabla 66 y 142 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 145.**

*Humedad base seca de secado 6 (kg agua/kg sólido seco)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Promedio de humedad
	1	2	3	4	5	6	
0	5.8493	5.8493	5.8493	5.8493	5.8493	5.8493	5.8493
10	4.9571	5.0699	4.8875	4.6557	5.0428	4.8844	4.9162
20	4.2932	4.4133	4.0287	3.7250	4.3920	4.1267	4.1632
30	3.6212	3.7327	3.2108	2.8735	3.7039	3.3736	3.4193
40	2.9847	3.1344	2.4799	2.1531	3.0868	2.7520	2.7651
50	2.4197	2.6209	1.8490	1.5769	2.5479	2.1384	2.1921
60	1.9484	2.1258	1.3081	1.1097	2.0399	1.6345	1.6944
80	1.2105	1.3925	0.5788	0.4979	1.2400	0.8913	0.9685
100	0.6948	0.8870	0.2760	0.2628	0.7562	0.4910	0.5613
130	0.2830	0.3957	0.1743	0.1996	0.3723	0.2703	0.2825
160	0.1855	0.2337	0.1653	0.1920	0.2276	0.2087	0.2021
190	0.1607	0.1900	0.1541	0.1823	0.1837	0.1865	0.1762

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 11 con la ecuación 3 y utilizando los datos de la Tabla 143 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 146.**

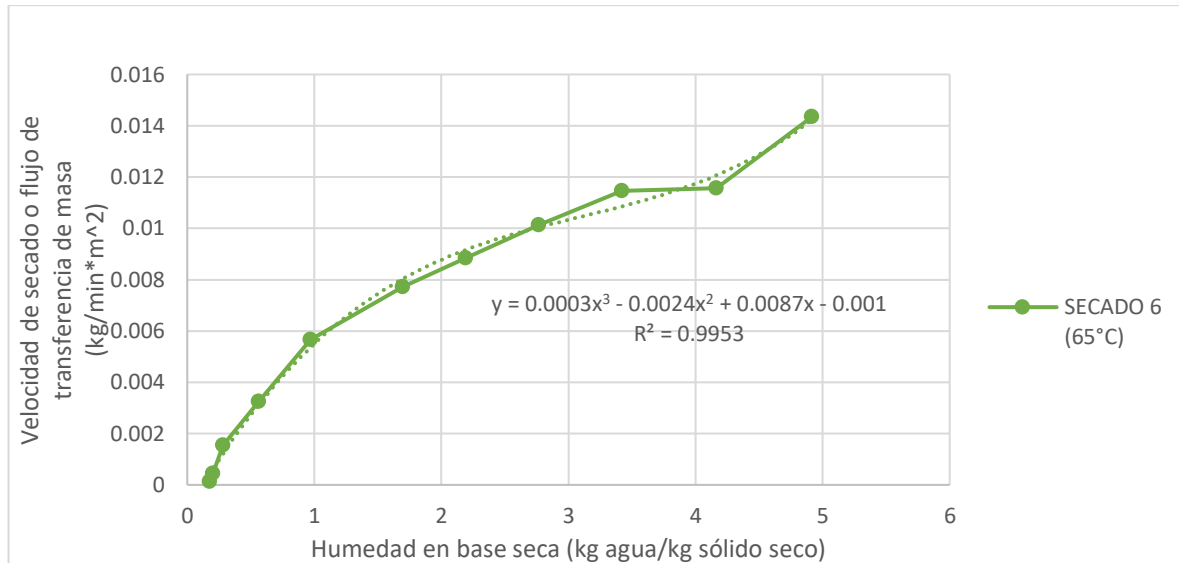
*Velocidad de secado o flujo de transferencia de masa secado 6 (kg/min\*m2)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Promedio de flujo de trans
	1	2	3	4	5	6	
0							
10	0.0156	0.0149	0.0134	0.0177	0.0130	0.0115	0.0143
20	0.0116	0.0126	0.0119	0.0138	0.0105	0.0090	0.0116
30	0.0117	0.0130	0.0114	0.0126	0.0111	0.0090	0.0115
40	0.0111	0.0115	0.0102	0.0107	0.0099	0.0074	0.0101
50	0.0099	0.0098	0.0088	0.0085	0.0087	0.0073	0.0088
60	0.0082	0.0095	0.0075	0.0069	0.0082	0.0060	0.0077
80	0.0065	0.0070	0.0051	0.0045	0.0064	0.0044	0.0057
100	0.0045	0.0048	0.0021	0.0017	0.0039	0.0024	0.0032
130	0.0024	0.0031	0.0005	0.0003	0.0021	0.0009	0.0015
160	0.0006	0.0010	0.0000	0.0000	0.0008	0.0002	0.0005
190	0.0001	0.0003	0.0001	0.0000	0.0002	0.0001	0.0001

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 11 con la ecuación 3 y utilizando los datos de la Tabla 144 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras y con sólido seco/área superficial de la Tabla 140. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Figura 41.**

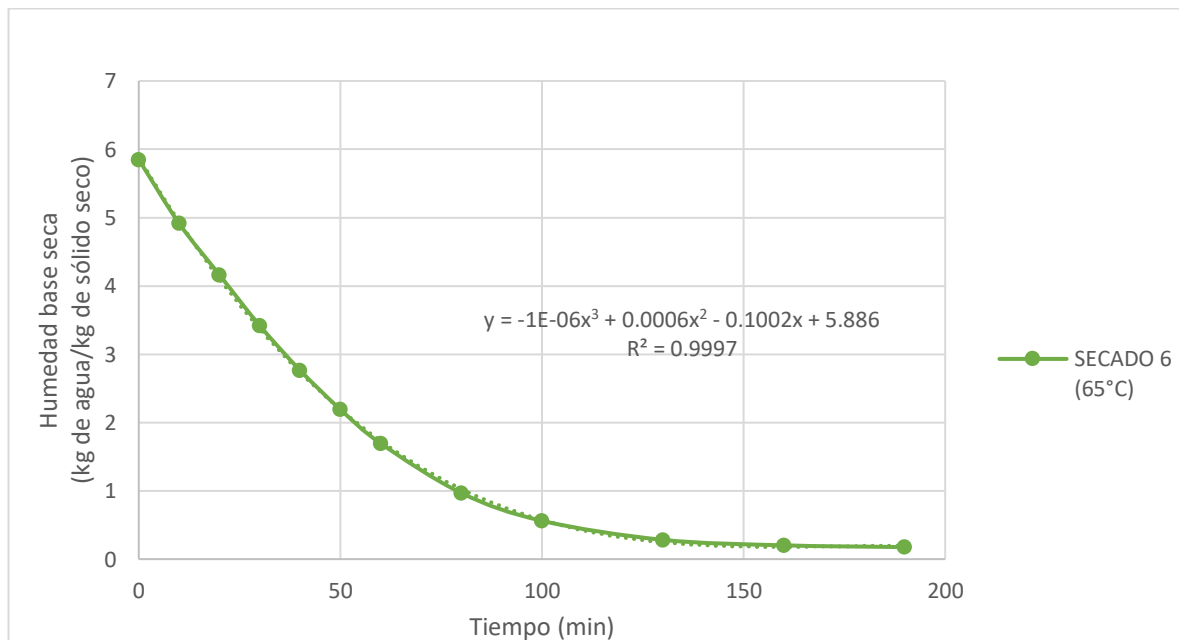
Curva de secado 6 a 65°C, velocidad de secado vs humedad en base seca



*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 144 y 145, graficando los promedios de las 6 muestras de la corrida 6. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Figura 42.**

Curva de pérdida de humedad secado 6 a 65°C vs tiempo



*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 144, graficando los promedios de las 6 muestras de la corrida 6. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 147.***Balance de masa y energía de secado 6*

Aspecto	Flujo (kg/h)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Humedad en base seca (kg de agua/kg base seca)	Entalpía (kJ/kg)
Entrada de manzanas frescas	0.049	19.6	85.40%	6.39	595.37
Salida de restos de manzana	0.002	19.6	85.40%	6.39	595.37
Entrada de rodajas de manzana	0.048	19.6	85.40%	6.39	595.37
Salida de sólido seco	0.009	56.2	13.84%	0.176	246.52
Entrada de aire ambiente	503.874	21.4	51.90%	0.010	2260.00
Salida aire calentador y entrada secador	503.874	65.6	26.60%	0.052	595.37
Salida aire secador	503.874	60.91	35.0%	0.053	186.12

*Nota:* Esta Tabla se completó por medio de los cálculos 15-18 y 20, utilizando los datos originales del secado 6, las condiciones de operación del equipo, descritas en la Tabla 61, 62, 63, 67 y 68. Condiciones de los datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 148.***Balance de energía de secado 6*

Aspecto	Flujo (kJ/h)	Incertidumbre
Calor de pérdidas al ambiente	1,910.08	9.65
Calor calentamiento aire	22,427.13	110.24
Calor calentamiento manzana	7.32	0.04
Calor útil de evaporación	691.26	
Calor perdido aire servido	7.48	
Calor secado real	706.06	3.82
Calor total	2,616.14	10.37
Energía total	25,043.27	110.72

*Nota:* Esta Tabla se completó por medio de los cálculos 19-25 tomando los datos de la Tabla 146. Condiciones de los datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

A continuación, se detalla los datos calculados de para la obtención de las curvas de secado y las curvas de pérdida de humedad respecto al tiempo, así como los balances de energía y masa para el secado 7. Esto se puede observar en las Tablas 149-157. Y las Figuras 43 y 44.

**Tabla 149.***Área superficial de rodajas de muestra de secado 7*

Muestra	Área superficial (m <sup>2</sup> )	Error (±m <sup>2</sup> )
1	7.16E-03	1.13E-05
2	6.46E-03	1.37E-05
3	5.06E-03	1.19E-05
4	5.26E-03	9.82E-06
5	8.10E-03	1.68E-05

6	7.53E-03	1.39E-05
---	----------	----------

*Nota:* Se determinó el área superficial de la rodaja de muestra para cada una de las corridas por medio del cálculo 12 con las ecuaciones 23 y 24 utilizando los datos de la Tabla 73. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 150.**

*Sólido seco de muestras de secado 7 y relación de sólidos secos sobre área superficial*

Muestra	Sólido seco (kg)	Sólido seco/ Área superficial (m <sup>2</sup> /kg seco)
1	0.0016	0.2264
2	0.0013	0.1963
3	0.0008	0.1648
4	0.0009	0.1786
5	0.0012	0.1422
6	0.0014	0.1858

*Nota:* Se determinó el sólido seco y la relación de sólido seco por medio del cálculo 13 con la ecuación 25 utilizando los datos de la Tabla 73 con tiempo de secado 0. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 151.**

*Agua perdida con respecto al tiempo de secado 7*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Error (±g de agua)
	1	2	3	4	5	6	
0							
10	1.4862	1.4097	1.2168	0.9424	1.3300	1.2541	7.07E-05
20	1.2049	1.0706	0.9049	0.7517	0.9773	0.9365	7.07E-05
30	1.2196	1.0339	0.8146	0.8784	0.9134	0.9286	7.07E-05
40	1.1039	0.8718	0.6348	0.5746	0.7950	0.8626	7.07E-05
50	0.9714	0.7765	0.4772	0.5284	0.7010	0.7900	7.07E-05
60	0.9041	0.6450	0.3362	0.4888	0.6082	0.7290	7.07E-05
80	1.2612	0.8470	0.2594	0.6638	0.7525	1.0915	7.07E-05
100	0.6543	0.3464	0.0448	0.3258	0.2945	0.6738	7.07E-05
130	0.2707	0.1178	0.0130	0.1041	0.0869	0.4892	7.07E-05
160	0.0488	0.0252	0.0070	0.0179	0.0312	0.1003	7.07E-05
190	0.0226	0.0073	0.0068	0.0042	0.0064	0.0250	7.07E-05

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 8 con la ecuación 20 y utilizando los datos de la Tabla 74 y en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 152.**

*Contenido de agua de muestras en secado 7*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra					
	1	2	3	4	5	6
0	9.1816	7.1856	4.7245	5.3259	6.5268	7.9253
10	7.6954	5.7759	3.5077	4.3835	5.1968	6.6712
20	6.4905	4.7053	2.6028	3.6318	4.2195	5.7347
30	5.2709	3.6714	1.7882	2.7534	3.3061	4.8061
40	4.1670	2.7996	1.1534	2.1788	2.5111	3.9435
50	3.1956	2.0231	0.6762	1.6504	1.8101	3.1535
60	2.2915	1.3781	0.3400	1.1616	1.2019	2.4245

80	1.0303	0.5311	0.0806	0.4978	0.4494	1.3330
100	0.3760	0.1847	0.0358	0.1720	0.1549	0.6592
130	0.1053	0.0669	0.0228	0.0679	0.0680	0.1700
160	0.0565	0.0417	0.0158	0.0500	0.0368	0.0697
190	0.0339	0.0344	0.0090	0.0458	0.0304	0.0447

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 9 con la ecuación 21 para el tiempo 0 y para el tiempo n la ecuación 22 utilizando los datos de la Tabla 150 y Tabla 74 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 153.**

*Humedad en base húmeda secado 7 (kg agua/kg sólido húmedo)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra					
	1	2	3	4	5	6
0	85.00%	85.00%	85.00%	85.00%	85.00%	85.00%
10	82.61%	82.00%	80.80%	82.34%	81.86%	82.67%
20	80.02%	78.77%	75.74%	79.44%	78.56%	80.39%
30	76.49%	74.33%	68.20%	74.55%	74.16%	77.46%
40	72.00%	68.83%	58.04%	69.86%	68.56%	73.82%
50	66.36%	61.47%	44.78%	63.72%	61.11%	69.28%
60	58.58%	52.08%	28.97%	55.28%	51.06%	63.42%
80	38.87%	29.52%	8.81%	34.63%	28.07%	48.80%
100	18.84%	12.71%	4.11%	15.47%	11.86%	32.03%
130	6.10%	5.01%	2.66%	6.74%	5.58%	10.84%
160	3.37%	3.18%	1.86%	5.05%	3.10%	4.75%
190	2.05%	2.64%	1.06%	4.65%	2.57%	3.10%

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 10 con la ecuación 2 y utilizando los datos de la Tabla 74 y 151 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 154.**

*Humedad base seca de secado 7 (kg agua/kg sólido seco)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Promedio de humedad
	1	2	3	4	5	6	
0	5.6667	5.6667	5.6667	5.6667	5.6667	5.6667	5.6667
10	4.7494	4.5550	4.2072	4.6640	4.5119	4.7700	4.4845
20	4.0058	3.7107	3.1218	3.8642	3.6634	4.1004	3.5900
30	3.2531	2.8953	2.1448	2.9296	2.8704	3.4364	2.7100
40	2.5718	2.2078	1.3834	2.3182	2.1802	2.8196	2.0224
50	1.9722	1.5954	0.8110	1.7560	1.5716	2.2548	1.4335
60	1.4143	1.0868	0.4078	1.2359	1.0435	1.7335	0.9435
80	0.6359	0.4188	0.0966	0.5297	0.3902	0.9531	0.3588
100	0.2321	0.1456	0.0429	0.1830	0.1345	0.4713	0.1265
130	0.0650	0.0527	0.0273	0.0723	0.0590	0.1216	0.0528
160	0.0349	0.0329	0.0189	0.0532	0.0320	0.0498	0.0342
190	0.0209	0.0271	0.0108	0.0488	0.0264	0.0320	0.0283

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 11 con la ecuación 3 y utilizando los datos de la Tabla 152 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 155.**

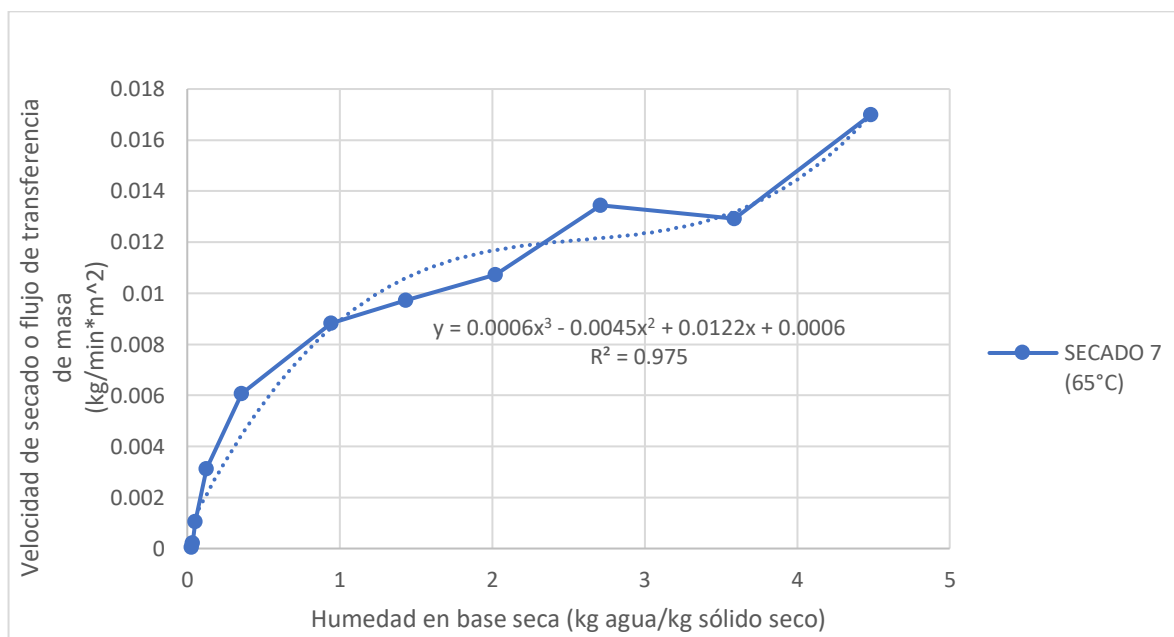
Velocidad de secado o flujo de transferencia de masa secado 7 (kg/min\*m2)

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Promedio de flujo de trans
	1	2	3	4	5	6	
0							
10	0.0208	0.0218	0.0241	0.0179	0.0164	0.0167	0.0170
20	0.0168	0.0166	0.0179	0.0143	0.0121	0.0124	0.0129
30	0.0170	0.0160	0.0161	0.0167	0.0113	0.0123	0.0134
40	0.0154	0.0135	0.0125	0.0109	0.0098	0.0115	0.0107
50	0.0136	0.0120	0.0094	0.0100	0.0087	0.0105	0.0097
60	0.0126	0.0100	0.0066	0.0093	0.0075	0.0097	0.0088
80	0.0088	0.0066	0.0026	0.0063	0.0046	0.0072	0.0061
100	0.0046	0.0027	0.0004	0.0031	0.0018	0.0045	0.0031
130	0.0013	0.0006	0.0001	0.0007	0.0004	0.0022	0.0011
160	0.0002	0.0001	0.0000	0.0001	0.0001	0.0004	0.0002
190	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0001

Nota: Este cálculo se realizó a partir del cálculo 11 con la ecuación 3 y utilizando los datos de la Tabla 153 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras y con sólido seco/área superficial de la Tabla 149. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Figura 43.**

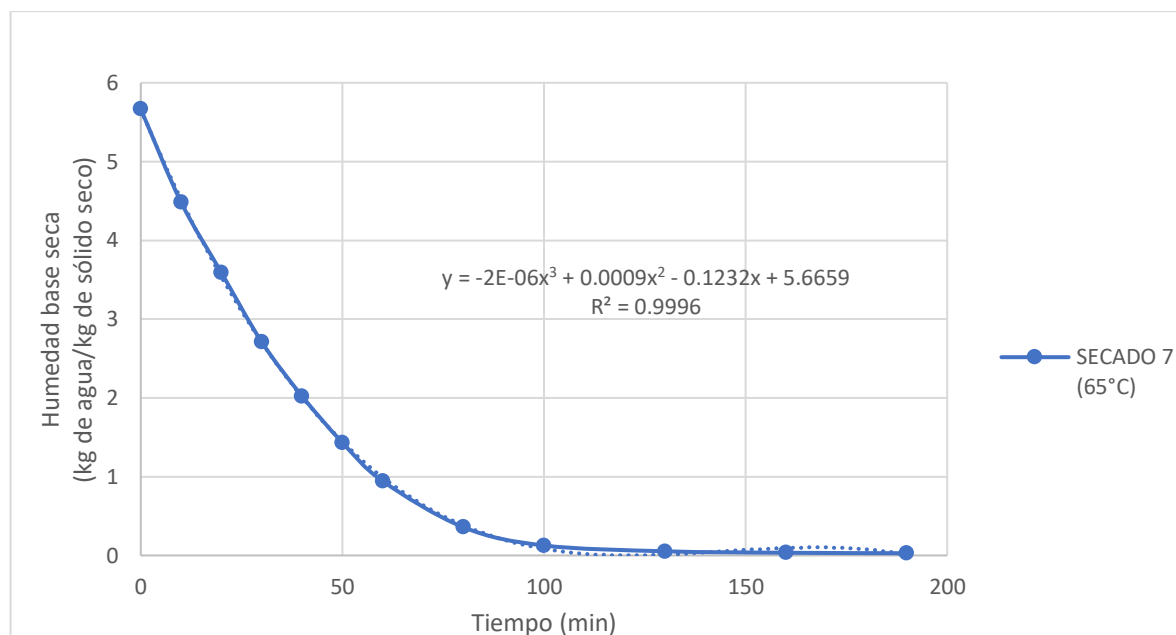
Curva de secado 7 a 65°C, velocidad de secado vs humedad en base seca



Nota: Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 153 y 154, graficando los promedios de las 6 muestras de la corrida 7. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Figura 44.**

Curva de pérdida de humedad secado 7 a 65°C, velocidad de secado vs tiempo



*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 153, graficando los promedios de las 6 muestras de la corrida 7. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 156.**

Balance de masa y energía de secado 7

Aspecto	Flujo (kg/h)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Humedad en base seca (kg de agua/kg base seca)	Entalpía (kJ/kg)
Entrada de manzanas frescas	0.050	19.6	85.00%	5.67	535.80
Salida de restos de manzana	0.002	19.6	85.00%	5.67	535.80
Entrada de rodajas de manzana	0.048	19.6	85.00%	5.67	535.80
Salida de sólido seco	0.008	56.2	4.65%	0.028	211.77
Entrada de aire ambiente	503.874	21.4	54.10%	0.010	2260.00
Salida aire calentador y entrada secador	503.874	66.1	26.60%	0.051	535.80
Salida aire secador	503.874	61.53	32.0%	0.052	184.29

*Nota:* Esta Tabla se completó por medio de los cálculos 15-18 y 20, utilizando los datos originales del secado 7, las condiciones de operación del equipo, descritas en la Tabla 69, 70, 71, 75 y 76. Condiciones de los datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

**Tabla 157.***Balance de energía de secado 7*

Aspecto	Flujo (kJ/h)	Incertidumbre
Calor de pérdidas al ambiente	1,910.08	9.65
Calor calentamiento aire	22,635.78	111.18
Calor calentamiento manzana	7.41	0.04
Calor útil de evaporación	620.31	
Calor perdido aire servido	7.60	
Calor secado real	635.32	3.43
Calor total	2,545.39	10.24
Energía total	25,181.18	111.65

*Nota:* Esta Tabla se completó por medio de los cálculos 19-25 tomando los datos de la Tabla 155. Condiciones de los datos originales: 1.0 atm y 21.4°C. Elaboración propia.

A continuación, se detalla los datos calculados de para la obtención de las curvas de secado y las curvas de pérdida de humedad respecto al tiempo, así como los balances de energía y masa para el secado 8. Esto se puede observar en las Tablas 158-166. Y las Figuras 45 y 46.

**Tabla 158.***Área superficial de rodajas de muestra de secado 8*

Muestra	Área superficial (m <sup>2</sup> )	Error (±m <sup>2</sup> )
1	8.84E-03	1.40E-05
2	6.61E-03	9.82E-06
3	7.09E-03	1.13E-05
4	8.57E-03	1.32E-05
5	8.34E-03	1.31E-05
6	6.30E-03	1.03E-05

*Nota:* Se determinó el área superficial de la rodaja de muestra para cada una de las corridas por medio del cálculo 12 con las ecuaciones 23 y 24 utilizando los datos de la Tabla 81. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.2°C. Elaboración propia.

**Tabla 159.***Sólido seco de muestras de secado 8 y relación de sólidos secos sobre área superficial*

Muestra	Sólido seco (kg)	Sólido seco/ Área superficial (m <sup>2</sup> /kg seco)
1	0.0018	0.2076
2	0.0015	0.2255
3	0.0016	0.2247
4	0.0017	0.1958
5	0.0018	0.2157
6	0.0012	0.1915

*Nota:* Se determinó el sólido seco y la relación de sólido seco por medio del cálculo 13 con la ecuación 25 utilizando los datos de la Tabla 81 con tiempo de secado 0. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.2°C. Elaboración propia.

**Tabla 160.***Agua perdida con respecto al tiempo de secado 8*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Error (±g de agua)
	1	2	3	4	5	6	
0							
10	1.1386	0.9125	1.0222	1.1780	1.3045	0.8487	7.07E-05

20	1.1526	0.8907	0.9654	1.2197	1.2351	0.7991	7.07E-05
30	1.0917	0.8007	0.9889	0.9333	0.9875	0.7256	7.07E-05
40	1.0121	0.8417	0.8804	0.9329	0.9751	0.6545	7.07E-05
50	1.0529	0.8254	0.8901	0.9627	1.0164	0.6673	7.07E-05
60	0.9077	0.6997	0.7633	0.8222	0.8532	0.5623	7.07E-05
75	1.2826	0.9854	1.0492	1.1389	1.2568	0.7872	7.07E-05
90	1.0512	0.8338	0.8997	0.9549	1.0717	0.6472	7.07E-05
110	0.8549	0.7059	0.7465	0.7436	0.8533	0.5274	7.07E-05
130	0.5159	0.5141	0.4671	0.3766	0.4352	0.3380	7.07E-05
160	0.2389	0.3034	0.2461	0.1442	0.1605	0.1938	7.07E-05
190	0.0431	0.0585	0.0482	0.0296	0.0331	0.0357	7.07E-05

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 8 con la ecuación 20 y utilizando los datos de la Tabla 82 y en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.2°C. Elaboración propia.

**Tabla 161.**

*Contenido de agua de muestras en secado 8*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra					
	1	2	3	4	5	6
0	10.3983	8.4471	9.0301	9.5056	10.2007	6.8368
10	9.2597	7.5346	8.0079	8.3276	8.8962	5.9881
20	8.1071	6.6439	7.0425	7.1079	7.6611	5.1890
30	7.0154	5.8432	6.0536	6.1746	6.6736	4.4634
40	6.0033	5.0015	5.1732	5.2417	5.6985	3.8089
50	4.9504	4.1761	4.2831	4.2790	4.6821	3.1416
60	4.0427	3.4764	3.5198	3.4568	3.8289	2.5793
75	2.7601	2.4910	2.4706	2.3179	2.5721	1.7921
90	1.7089	1.6572	1.5709	1.3630	1.5004	1.1449
110	0.8540	0.9513	0.8244	0.6194	0.6471	0.6175
130	0.3381	0.4372	0.3573	0.2428	0.2119	0.2795
160	0.0992	0.1338	0.1112	0.0985	0.0514	0.0857
190	0.0561	0.0753	0.0630	0.0689	0.0183	0.0500

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 9 con la ecuación 21 para el tiempo 0 y para el tiempo n la ecuación 22 utilizando los datos de la Tabla 159 y Tabla 82 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.2°C. Elaboración propia.

**Tabla 162.**

*Humedad en base húmeda secado 8 (kg agua/kg sólido húmedo)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra					
	1	2	3	4	5	6
0	85.00%	85.00%	85.00%	85.00%	85.00%	85.00%
10	83.46%	83.48%	83.40%	83.23%	83.17%	83.23%
20	81.54%	81.67%	81.55%	80.91%	80.97%	81.14%
30	79.27%	79.67%	79.16%	78.64%	78.76%	78.72%
40	76.59%	77.04%	76.45%	75.76%	75.99%	75.94%
50	72.96%	73.69%	72.88%	71.84%	72.23%	72.25%
60	68.78%	69.99%	68.84%	67.33%	68.02%	68.13%
75	60.07%	62.56%	60.79%	58.01%	58.83%	59.76%
90	48.22%	52.65%	49.64%	44.83%	45.46%	48.69%
110	31.76%	38.96%	34.09%	26.97%	26.44%	33.85%
130	15.56%	22.68%	18.31%	12.64%	10.53%	18.81%

160	5.13%	8.24%	6.52%	5.55%	2.78%	6.63%
190	2.97%	4.81%	3.80%	3.95%	1.01%	3.98%

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 10 con la ecuación 2 y utilizando los datos de la Tabla 82 y 160 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.2°C. Elaboración propia.

**Tabla 163.**

*Humedad base seca de secado 8 (kg agua/kg sólido seco)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Promedio de humedad
	1	2	3	4	5	6	
0	5.6667	5.6667	5.6667	5.6667	5.6667	5.6667	5.6667
10	5.0462	5.0545	5.0252	4.9644	4.9420	4.9632	4.9993
20	4.4180	4.4570	4.4194	4.2373	4.2559	4.3009	4.3481
30	3.8231	3.9199	3.7988	3.6809	3.7073	3.6995	3.7716
40	3.2716	3.3552	3.2463	3.1248	3.1656	3.1570	3.2201
50	2.6978	2.8015	2.6878	2.5509	2.6010	2.6039	2.6571
60	2.2031	2.3321	2.2088	2.0607	2.1270	2.1378	2.1783
75	1.5041	1.6711	1.5504	1.3818	1.4288	1.4854	1.5036
90	0.9313	1.1117	0.9858	0.8125	0.8335	0.9490	0.9373
110	0.4654	0.6382	0.5173	0.3692	0.3595	0.5118	0.4769
130	0.1843	0.2933	0.2242	0.1447	0.1177	0.2317	0.1993
160	0.0541	0.0898	0.0698	0.0587	0.0285	0.0710	0.0620
190	0.0306	0.0505	0.0395	0.0411	0.0102	0.0414	0.0356

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 11 con la ecuación 3 y utilizando los datos de la Tabla 161 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.2°C. Elaboración propia.

**Tabla 164.**

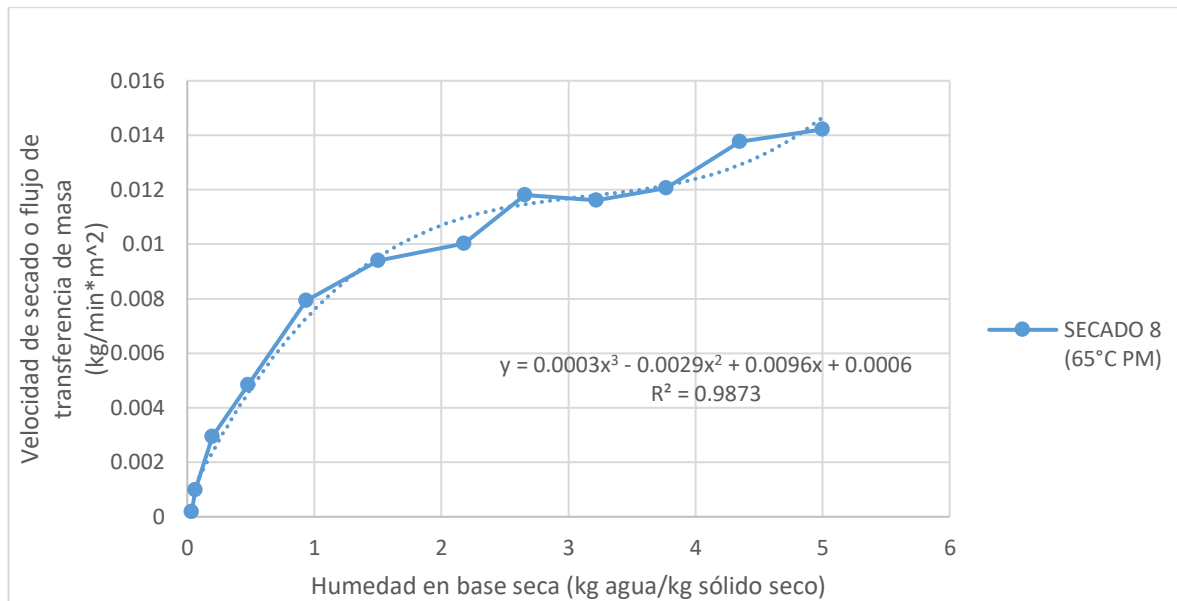
*Velocidad de secado o flujo de transferencia de masa secado 8 (kg/min\*m2)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Promedio de flujo de trans
	1	2	3	4	5	6	
0							
10	0.0129	0.0138	0.0144	0.0138	0.0156	0.0135	0.0142
20	0.0130	0.0135	0.0136	0.0142	0.0148	0.0127	0.0138
30	0.0123	0.0121	0.0139	0.0109	0.0118	0.0115	0.0121
40	0.0114	0.0127	0.0124	0.0109	0.0117	0.0104	0.0116
50	0.0119	0.0125	0.0126	0.0112	0.0122	0.0106	0.0118
60	0.0103	0.0106	0.0108	0.0096	0.0102	0.0089	0.0100
75	0.0097	0.0099	0.0099	0.0089	0.0100	0.0083	0.0094
90	0.0079	0.0084	0.0085	0.0074	0.0086	0.0068	0.0079
110	0.0048	0.0053	0.0053	0.0043	0.0051	0.0042	0.0048
130	0.0029	0.0039	0.0033	0.0022	0.0026	0.0027	0.0029
160	0.0009	0.0015	0.0012	0.0006	0.0006	0.0010	0.0010
190	0.0002	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001	0.0002	0.0002

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 11 con la ecuación 3 y utilizando los datos de la Tabla 162 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras y con sólido seco/área superficial de la Tabla 158. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.2°C. Elaboración propia.

**Figura 45.**

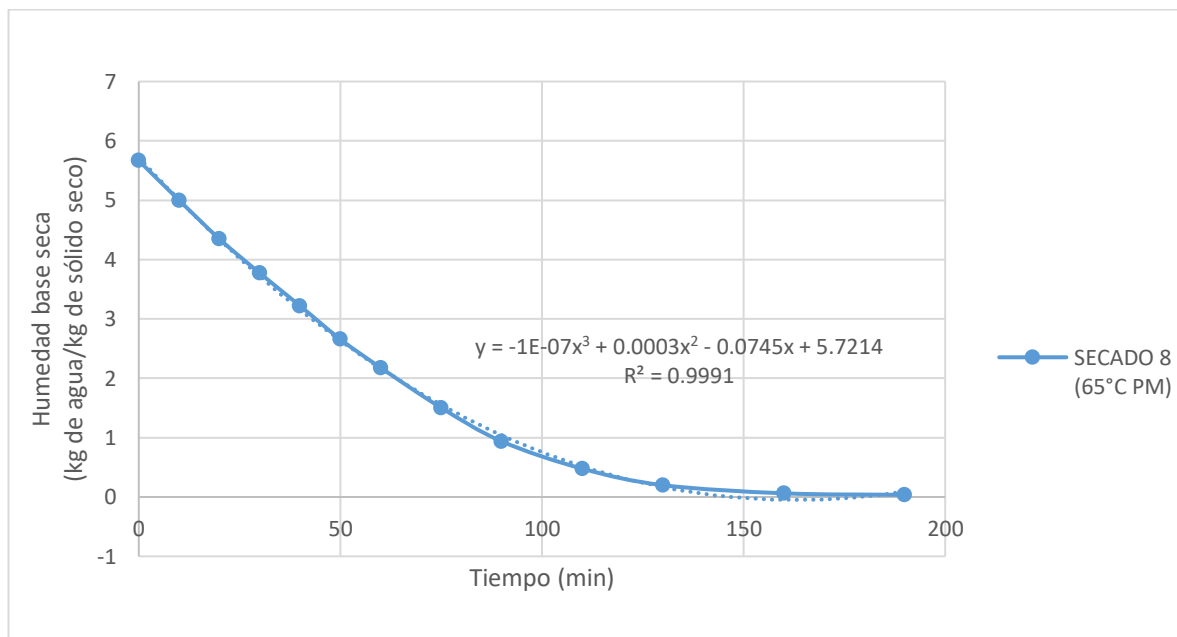
Curva de secado 8 a 65°C pretratamiento mecánico, velocidad de secado vs humedad en base seca



*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 162 y 163, graficando los promedios de las 6 muestras de la corrida 8. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.2°C. Elaboración propia.

**Figura 46.**

Curva de pérdida de humedad secado 8 a 65°C vs tiempo



*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 162, graficando los promedios de las 6 muestras de la corrida 8. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se

coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 21.2°C. Elaboración propia.

**Tabla 165.**

*Balace de masa y energía secado 8*

Aspecto	Flujo (kg/h)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Humedad en base seca (kg de agua/kg base seca)	Entalpía (kJ/kg)
Entrada de manzanas frescas	0.216	19.8	85.00%	5.67	541.27
Salida de restos de manzana	0.003	19.8	85.00%	5.67	541.27
Entrada de rodajas de manzana	0.212	19.8	85.00%	5.67	541.27
Salida de sólido seco	0.036	58.2	3.42%	0.036	221.08
Entrada de aire ambiente	682.668	21.2	54.10%	0.010	2260.00
Salida aire calentador y entrada secador	682.668	68.5	28.10%	0.070	541.27
Salida aire secador	682.668	61.71	43.0%	0.072	232.52

*Nota:* Esta Tabla se completó por medio de los cálculos 15-18 y 20, utilizando los datos originales del secado 8, las condiciones de operación del equipo, descritas en la Tabla 77, 78, 79, 83 y 84. Condiciones de los datos originales: 1.0 atm y 21.2°C. Elaboración propia.

**Tabla 166.**

*Balace de energía secado 8*

Aspecto	Flujo (kJ/h)	Incertidumbre
Calor de pérdidas al ambiente	2,519.59	12.77
Calor calentamiento aire	32,516.23	160.56
Calor calentamiento manzana	34.10	0.18
Calor útil de evaporación	2,720.51	
Calor perdido aire servido	41.75	
Calor secado real	2,796.36	14.92
Calor total	5,315.95	19.64
Energía total	37,832.18	161.75

*Nota:* Esta Tabla se completó por medio de los cálculos 19-25 tomando los datos de la Tabla 164. Condiciones de los datos originales: 1.0 atm y 21.2°C. Elaboración propia.

A continuación, se detalla los datos calculados de para la obtención de las curvas de secado y las curvas de pérdida de humedad respecto al tiempo, así como los balances de energía y masa para el secado 9. Esto se puede observar en las Tablas 167-175. Y las Figuras 47-49.

**Tabla 167.**

*Área superficial de rodajas de muestra de secado 9*

Muestra	Área superficial (m <sup>2</sup> )	Error (±m <sup>2</sup> )
1	6.91E-03	1.22E-05
2	5.50E-03	1.07E-05

3	7.61E-03	1.64E-05
4	6.02E-03	1.23E-05
5	6.46E-03	1.18E-05
6	6.60E-03	1.37E-05

*Nota:* Se determinó el área superficial de la rodaja de muestra para cada una de las corridas por medio del cálculo 12 con las ecuaciones 23 y 24 utilizando los datos de la Tabla 89. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 168.**

*Sólido seco de muestras de secado 9 y relación de sólidos secos sobre área superficial*

Muestra	Sólido seco (kg)	Sólido seco/ Área superficial (m <sup>2</sup> /kg seco)
1	0.0010	0.1451
2	0.0011	0.1943
3	0.0009	0.1129
4	0.0009	0.1493
5	0.0009	0.1363
6	0.0010	0.1493

*Nota:* Se determinó el sólido seco y la relación de sólido seco por medio del cálculo 13 con la ecuación 25 utilizando los datos de la Tabla 89 con tiempo de secado 0. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 169.**

*Agua perdida con respecto al tiempo de secado 9*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Error (±g de agua)
	1	2	3	4	5	6	
0							
10	0.8727	0.9760	1.0098	0.8272	0.8852	0.8822	7.07E-05
20	0.8189	0.9107	0.9131	0.7984	0.8187	0.8777	7.07E-05
30	0.7783	0.7730	0.8155	0.7617	0.7196	0.8830	7.07E-05
40	0.6471	0.7213	0.6434	0.6407	0.5896	0.7183	7.07E-05
50	0.5654	0.5204	0.5168	0.5795	0.4981	0.6218	7.07E-05
60	0.4839	0.4565	0.3832	0.4610	0.3877	0.4923	7.07E-05
75	0.5644	0.6391	0.3694	0.4950	0.4243	0.5346	7.07E-05
90	0.5023	0.6261	0.2129	0.4066	0.3961	0.4350	7.07E-05
110	0.2212	0.2102	0.0328	0.1013	0.1404	0.1118	7.07E-05
130	0.1955	0.1999	0.0203	0.0506	0.1246	0.0619	7.07E-05
160	0.0685	0.0744	0.0093	0.0198	0.0417	0.0181	7.07E-05
190	0.0284	0.0276	0.0056	0.0091	0.0163	0.0100	7.07E-05

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 8 con la ecuación 20 y utilizando los datos de la Tabla 90 y en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 170.**

*Contenido de agua de muestras en secado 9*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra					
	1	2	3	4	5	6
0	5.8202	6.2048	4.9854	5.2152	5.1091	5.7159
10	4.9475	5.2288	3.9756	4.3880	4.2239	4.8337
20	4.1286	4.3181	3.0625	3.5896	3.4052	3.9560

30	3.3503	3.5451	2.2470	2.8279	2.6856	3.0730
40	2.7032	2.8238	1.6036	2.1872	2.0960	2.3547
50	2.1378	2.3034	1.0868	1.6077	1.5979	1.7329
60	1.6539	1.8469	0.7036	1.1467	1.2102	1.2406
75	1.0895	1.2078	0.3342	0.6517	0.7859	0.7060
90	0.5872	0.5817	0.1213	0.2451	0.3898	0.2710
110	0.3660	0.3715	0.0885	0.1438	0.2494	0.1592
130	0.1705	0.1716	0.0682	0.0932	0.1248	0.0973
160	0.1020	0.0972	0.0589	0.0734	0.0831	0.0792
190	0.0736	0.0696	0.0533	0.0643	0.0668	0.0692

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 9 con la ecuación 21 para el tiempo 0 y para el tiempo n la ecuación 22 utilizando los datos de la Tabla 168 y Tabla 90 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 171.**

*Humedad en base húmeda secado 9 (kg agua/kg sólido húmedo)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra					
	1	2	3	4	5	6
0	85.30%	85.30%	85.30%	85.30%	85.30%	85.30%
10	83.14%	83.02%	82.23%	83.00%	82.75%	83.07%
20	80.45%	80.15%	78.09%	79.98%	79.46%	80.06%
30	76.96%	76.83%	72.34%	75.88%	75.31%	75.73%
40	72.94%	72.53%	65.11%	70.88%	70.42%	70.51%
50	68.07%	68.30%	55.85%	64.14%	64.47%	63.76%
60	62.25%	63.33%	45.02%	56.06%	57.89%	55.74%
80	52.07%	53.04%	28.01%	42.03%	47.16%	41.75%
103	36.93%	35.23%	12.38%	21.43%	30.69%	21.57%
118	26.73%	25.78%	9.34%	13.80%	22.08%	13.91%
138	14.53%	13.83%	7.36%	9.40%	12.42%	8.99%
158	9.23%	8.33%	6.42%	7.55%	8.63%	7.44%
188	6.84%	6.11%	5.85%	6.68%	7.05%	6.56%

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 10 con la ecuación 2 y utilizando los datos de la Tabla 90 y 169 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 172.**

*Humedad base seca de secado 9 (kg agua/kg sólido seco)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Promedio de humedad
	1	2	3	4	5	6	
0	5.803	5.803	5.803	5.803	5.803	5.803	5.803
10	4.933	4.890	4.627	4.882	4.797	4.907	4.839
20	4.116	4.038	3.565	3.994	3.868	4.016	3.933
30	3.340	3.315	2.615	3.146	3.050	3.120	3.098
40	2.695	2.641	1.867	2.434	2.381	2.390	2.401
50	2.131	2.154	1.265	1.789	1.815	1.759	1.819
60	1.649	1.727	0.819	1.276	1.375	1.259	1.351
80	1.086	1.130	0.389	0.725	0.893	0.717	0.823
103	0.585	0.544	0.141	0.273	0.443	0.275	0.377
118	0.365	0.347	0.103	0.160	0.283	0.162	0.237
138	0.170	0.160	0.079	0.104	0.142	0.099	0.126
158	0.102	0.091	0.069	0.082	0.094	0.080	0.086

188	0.073	0.065	0.062	0.072	0.076	0.070	0.070
-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 11 con la ecuación 3 y utilizando los datos de la Tabla 170 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 173.**

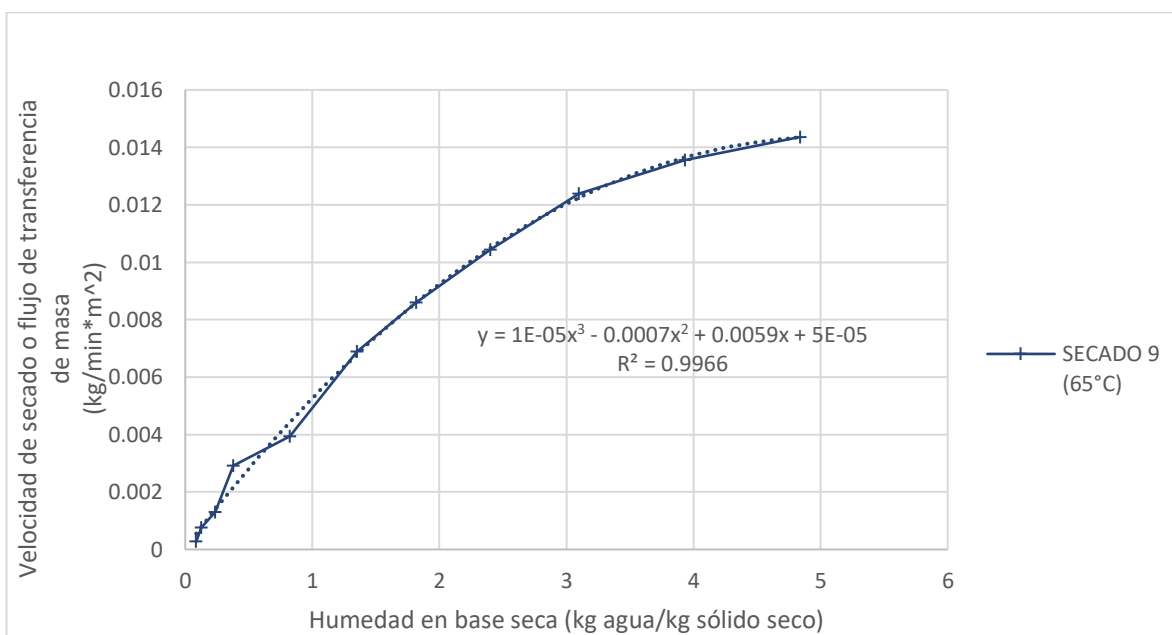
*Velocidad de secado o flujo de transferencia de masa secado 9 (kg/min\*m2)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Promedio de flujo de trans
	1	2	3	4	5	6	
0							
10	0.0126	0.0177	0.0133	0.0137	0.0137	0.0134	0.0144
20	0.0118	0.0165	0.0120	0.0133	0.0127	0.0133	0.0136
30	0.0113	0.0140	0.0107	0.0127	0.0111	0.0134	0.0124
40	0.0094	0.0131	0.0085	0.0106	0.0091	0.0109	0.0104
50	0.0082	0.0095	0.0068	0.0096	0.0077	0.0094	0.0086
60	0.0070	0.0083	0.0050	0.0077	0.0060	0.0075	0.0069
80	0.0041	0.0058	0.0024	0.0041	0.0033	0.0041	0.0039
103	0.0032	0.0049	0.0012	0.0029	0.0027	0.0029	0.0029
118	0.0021	0.0025	0.0003	0.0011	0.0014	0.0011	0.0013
138	0.0014	0.0018	0.0001	0.0004	0.0010	0.0005	0.0008
158	0.0005	0.0007	0.0001	0.0002	0.0003	0.0001	0.0003
188	0.0001	0.0002	0.0000	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 11 con la ecuación 3 y utilizando los datos de la Tabla 170 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras y con sólido seco/área superficial de la Tabla 167. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Figura 47.**

*Curva de secado 9 a 65°C, velocidad de secado vs humedad en base seca*

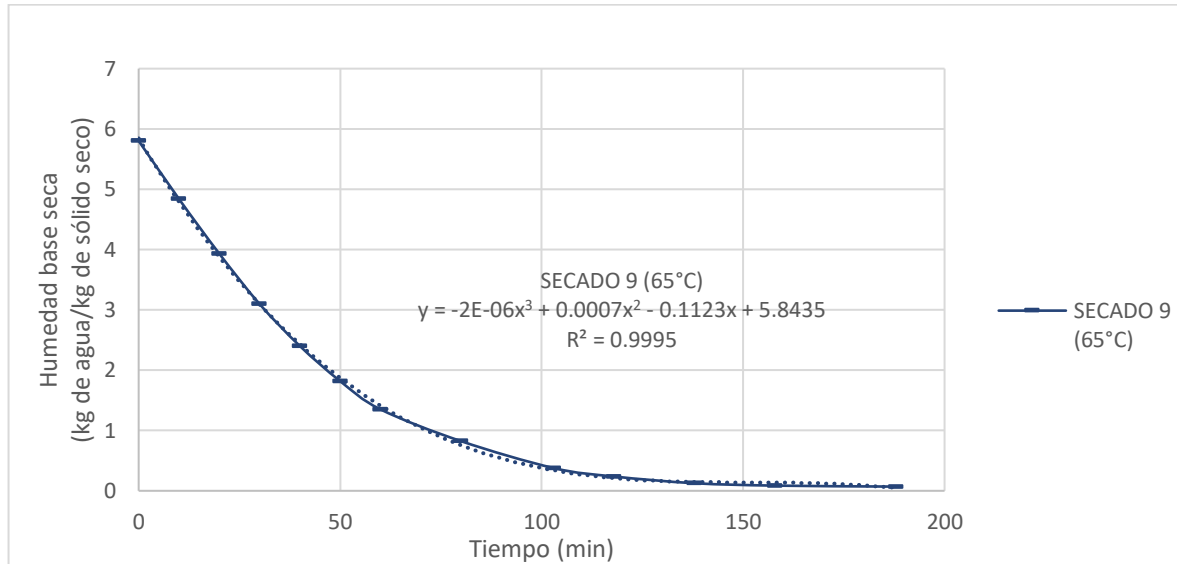


*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 171 y 172, graficando los promedios de las 6 muestras de la corrida 9. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que

se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Figura 48.**

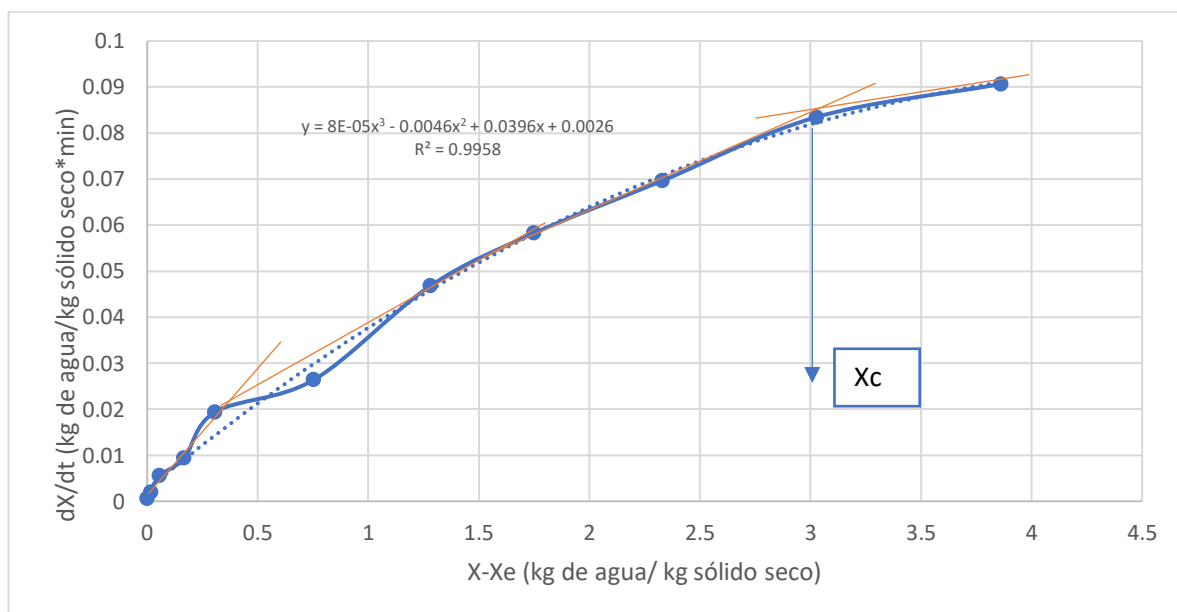
*Curva de pérdida de humedad secado 9 a 65°C vs tiempo*



*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 171, graficando los promedios de las 6 muestras de la corrida 9. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Figura 49.**

*Curva de cambio de humedad respecto al tiempo contra el cambio de humedad base seca de equilibrio secado 9 a 65°C*



*Nota:* Esta gráfica se realizó utilizando los datos de la Tabla 172, graficando los promedios del delta humedad partido el tiempo vs la humedad menos la humedad de equilibrio del sólido (final). Las líneas naranjas muestran

las rectas tangentes o tendencia de los tramos de la curva. Esta gráfica se lee de derecha a izquierda ya que en el tiempo 0 se cuenta con la mayor cantidad de humedad en base seca y en el tiempo final con la menor humedad.  $X_c$  corresponde a la humedad a la que la curva deja de tener comportamiento constante y comienza la decaída de velocidad. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 174.**

*Balace de masa y energía secado 9*

Aspecto	Flujo (kg/h)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Humedad en base seca (kg de agua/kg base seca)	Entalpía (kJ/kg)
Entrada de manzanas frescas	0.165	21.4	86.00%	5.80	597.18
Salida de restos de manzana	0.014	21.4	86.00%	5.80	597.18
Entrada de rodajas de manzana	0.151	21.4	86.00%	5.80	597.18
Salida de sólido seco	0.029	56.2	6.51%	0.070	221.51
Entrada de aire ambiente	747.684	24.3	53.90%	0.010	2260.00
Salida aire calentador y entrada secador	747.684	67.2	29.60%	0.075	597.18
Salida aire secador	747.684	61.59	45.0%	0.076	242.87

*Nota:* Esta Tabla se completó por medio de los cálculos 15-18 y 20, utilizando los datos originales del secado 9, las condiciones de operación del equipo, descritas en la Tabla 84, 85, 86, 91 y 92. Condiciones de los datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 175.**

*Balace de energía secado 9*

Aspecto	Flujo (kJ/h)	Incertidumbre
Calor de pérdidas al ambiente	2,806.67	12.54
Calor calentamiento aire	32,236.02	141.07
Calor calentamiento manzana	22.03	0.11
Calor útil de evaporación	1,986.49	
Calor perdido aire servido	30.26	
Calor secado real	2,038.78	10.19
Calor total	4,845.45	16.16
Energía total	37,081.47	141.99

*Nota:* Esta Tabla se completó por medio de los cálculos 19-25 tomando los datos de la Tabla 173. Condiciones de los datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

A continuación, se detalla los datos calculados de para la obtención de las curvas de secado y las curvas de pérdida de humedad respecto al tiempo, así como los balances de energía y masa para el secado 10. Esto se puede observar en las Tablas 176-184. Y las Figuras 50-52.

**Tabla 176.***Área superficial de rodajas de muestra de secado 10*

Muestra	Área superficial (m <sup>2</sup> )	Error (±m <sup>2</sup> )
1	7.62E-03	1.68E-05
2	7.01E-03	1.41E-05
3	8.35E-03	1.67E-05
4	7.42E-03	1.49E-05
5	7.52E-03	1.38E-05
6	6.06E-03	1.19E-05

*Nota:* Se determinó el área superficial de la rodaja de muestra para cada una de las corridas por medio del cálculo 12 con las ecuaciones 23 y 24 utilizando los datos de la Tabla 96. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 177.***Sólido seco de muestras de secado 10 y relación de sólidos secos sobre área superficial*

Muestra	Sólido seco (kg)	Sólido seco/ Área superficial (m <sup>2</sup> /kg seco)
1	0.0011	0.1440
2	0.0010	0.1458
3	0.0010	0.1244
4	0.0012	0.1646
5	0.0009	0.1173
6	0.0008	0.1364

*Nota:* Se determinó el sólido seco y la relación de sólido seco por medio del cálculo 13 con la ecuación 25 utilizando los datos de la Tabla 96 con tiempo de secado 0. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 178.***Agua perdida con respecto al tiempo de secado 10*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Error (±g de agua)
	1	2	3	4	5	6	
0							
11	1.7981	1.5213	1.4905	1.5998	1.1396	1.0571	7.07E-05
21	1.4892	1.2059	1.0041	1.2098	0.8344	0.7317	7.07E-05
31	1.1048	1.0492	0.8688	1.1220	0.7288	0.6575	7.07E-05
42	0.9303	0.9237	0.8089	1.0914	0.6946	0.6228	7.07E-05
52	0.5611	0.6607	0.6192	0.8102	0.5413	0.5178	7.07E-05
65	0.4308	0.5013	0.6010	0.6399	0.5117	0.5112	7.07E-05
85	0.3054	0.3036	0.6459	0.6438	0.5724	0.5939	7.07E-05
105	0.0372	0.0367	0.2265	0.2426	0.2570	0.2605	7.07E-05
135	0.0140	0.0125	0.0416	0.0493	0.0909	0.0577	7.07E-05
165	0.0106	0.0198	0.0249	0.0281	0.0051	0.0237	7.07E-05
185	0.0034	0.0046	0.0061	0.0072	0.0030	0.0019	7.07E-05

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 8 con la ecuación 20 y utilizando los datos de la Tabla 98 y en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 179.**  
Contenido de agua de muestras en secado 10

Tiempo transcurrido (min)	Muestra					
	1	2	3	4	5	6
0	6.7447	6.2826	6.3805	7.5027	5.4171	5.0798
11	4.9466	4.7613	4.8900	5.9029	4.2775	4.0227
21	3.4574	3.5554	3.8859	4.6931	3.4431	3.2910
31	2.3526	2.5062	3.0171	3.5711	2.7143	2.6335
42	1.4223	1.5825	2.2082	2.4797	2.0197	2.0107
52	0.8612	0.9218	1.5890	1.6695	1.4784	1.4929
65	0.4304	0.4205	0.9880	1.0296	0.9667	0.9817
85	0.1250	0.1169	0.3421	0.3858	0.3943	0.3878
105	0.0878	0.0802	0.1156	0.1432	0.1373	0.1273
135	0.0738	0.0677	0.0740	0.0939	0.0464	0.0696
165	0.0632	0.0479	0.0491	0.0658	0.0413	0.0459
185	0.0598	0.0433	0.0430	0.0586	0.0383	0.0440

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 9 con la ecuación 21 para el tiempo 0 y para el tiempo n la ecuación 22 utilizando los datos de la Tabla 177 y Tabla 98 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 180.**  
Humedad en base húmeda secado 10 (kg agua/kg sólido húmedo)

Tiempo transcurrido (min)	Muestra					
	1	2	3	4	5	6
0	86.00%	86.00%	86.00%	86.00%	86.00%	86.00%
11	81.84%	82.32%	82.48%	82.86%	82.91%	82.95%
21	75.90%	77.66%	78.91%	79.35%	79.61%	79.92%
31	68.18%	71.02%	74.39%	74.51%	75.48%	76.10%
42	56.43%	60.74%	68.01%	67.00%	69.61%	70.86%
52	43.96%	47.40%	60.47%	57.75%	62.64%	64.35%
65	28.16%	29.13%	48.75%	45.74%	52.29%	54.28%
85	10.22%	10.25%	24.78%	24.01%	30.90%	31.93%
105	7.41%	7.27%	10.02%	10.50%	13.47%	13.34%
135	6.30%	6.20%	6.65%	7.14%	4.99%	7.77%
165	5.44%	4.47%	4.51%	5.11%	4.47%	5.26%
185	5.17%	4.06%	3.98%	4.58%	4.16%	5.06%

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 10 con la ecuación 2 y utilizando los datos de la Tabla 98 y 177 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 181.**  
Humedad base seca de secado 10 (kg agua/kg sólido seco)

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Promedio de humedad
	1	2	3	4	5	6	
0	6.143	6.143	6.143	6.143	6.143	6.143	6.143
11	4.505	4.655	4.708	4.833	4.851	4.865	4.736
21	3.149	3.476	3.741	3.842	3.904	3.980	3.682
31	2.143	2.450	2.905	2.924	3.078	3.185	2.781
42	1.295	1.547	2.126	2.030	2.290	2.432	1.953

52	0.784	0.901	1.530	1.367	1.676	1.805	1.344
65	0.392	0.411	0.951	0.843	1.096	1.187	0.813
85	0.114	0.114	0.329	0.316	0.447	0.469	0.298
105	0.080	0.078	0.111	0.117	0.156	0.154	0.116
135	0.067	0.066	0.071	0.077	0.053	0.084	0.070
165	0.058	0.047	0.047	0.054	0.047	0.056	0.051
185	0.054	0.042	0.041	0.048	0.043	0.053	0.047

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 11 con la ecuación 3 y utilizando los datos de la Tabla 178 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 182.**

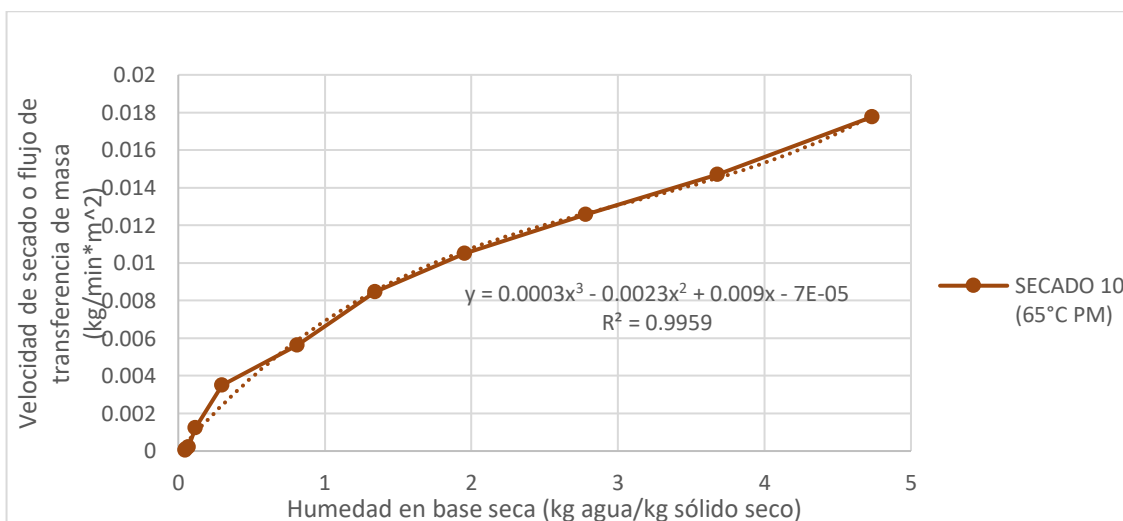
*Velocidad de secado o flujo de transferencia de masa secado 10 (kg/min\*m2)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Promedio de flujo de trans
	1	2	3	4	5	6	
0							
11	0.0214	0.0197	0.0162	0.0196	0.0138	0.0158	0.0178
21	0.0195	0.0172	0.0120	0.0163	0.0111	0.0121	0.0147
31	0.0145	0.0150	0.0104	0.0151	0.0097	0.0108	0.0126
42	0.0111	0.0120	0.0088	0.0134	0.0084	0.0093	0.0105
52	0.0074	0.0094	0.0074	0.0109	0.0072	0.0085	0.0085
65	0.0043	0.0055	0.0055	0.0066	0.0052	0.0065	0.0056
85	0.0020	0.0022	0.0039	0.0043	0.0038	0.0049	0.0035
105	0.0002	0.0003	0.0014	0.0016	0.0017	0.0021	0.0012
135	0.0001	0.0001	0.0002	0.0002	0.0004	0.0003	0.0002
165	0.0000	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0001	0.0001
185	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 11 con la ecuación 3 y utilizando los datos de la Tabla 178 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras y con sólido seco/área superficial de la Tabla 176. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Figura 50.**

*Curva de secado 10 a 65°C con pretratamiento mecánico, velocidad de secado vs humedad en base seca*

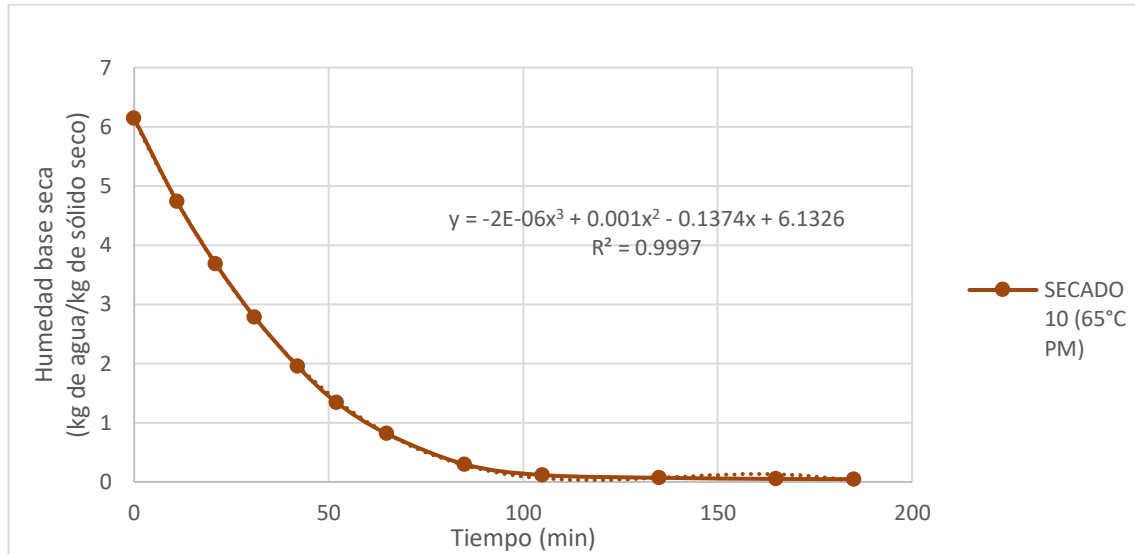


*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 180 y 181, graficando los promedios de las 6 muestras de la corrida 10. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que

se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Figura 51.**

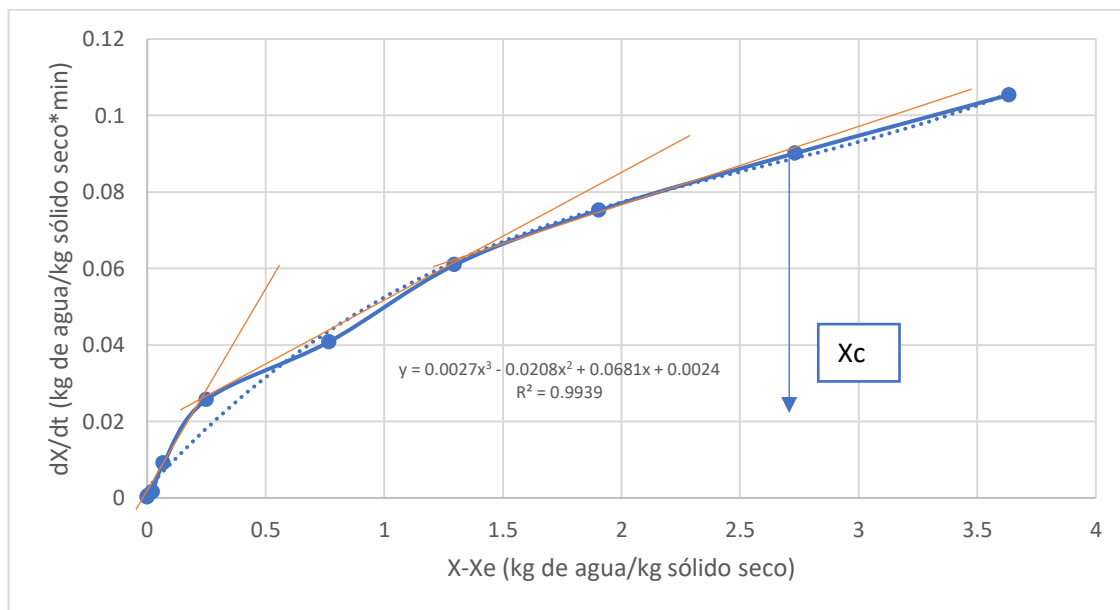
*Curva de pérdida de humedad secado 10 a 65°C vs tiempo*



*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 180, graficando los promedios de las 6 muestras de la corrida 10. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Figura 52.**

*Curva de pérdida de humedad respecto al tiempo contra el cambio de humedad del secado 10 a 65°C con pretratamiento mecánico*



*Nota:* Esta gráfica se realizó utilizando los datos de la Tabla 181, graficando los promedios del delta humedad partido el tiempo vs la humedad menos la humedad de equilibrio del sólido (final). Las líneas naranjas muestran

las rectas tangentes o tendencia de los tramos de la curva. Esta gráfica se lee de derecha a izquierda ya que en el tiempo 0 se cuenta con la mayor cantidad de humedad en base seca y en el tiempo final con la menor humedad.  $X_c$  corresponde a la humedad a la que la curva deja de tener comportamiento constante y comienza la decaída de velocidad. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 183.**

*Balance de masa y energía de secado 10*

Aspecto	Flujo (kg/h)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Humedad en base seca (kg de agua/kg base seca)	Entalpía (kJ/kg)
Entrada de manzanas frescas	0.176	21.4	86.00%	6.14	627.60
Salida de restos de manzana	0.004	21.4	86.00%	6.14	627.60
Entrada de rodajas de manzana	0.172	21.4	86.00%	6.14	627.60
Salida de sólido seco	0.027	56.2	4.50%	0.047	216.20
Entrada de aire ambiente	568.89	24.3	53.90%	0.010	47.48
Salida aire calentador y entrada secador	568.89	67.2	29.60%	0.075	627.60
Salida aire secador	568.89	59.99	61.0%	0.077	242.65

*Nota:* Esta Tabla se completó por medio de los cálculos 15-18 y 20, utilizando los datos originales del secado 10, las condiciones de operación del equipo, descritas en la Tabla 93, 94, 95, 99 y 100. Condiciones de los datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

**Tabla 184.**

*Balance de energía de secado 10*

Aspecto	Flujo (kJ/h)	Incertidumbre
Calor de pérdidas al ambiente	2,298.10	10.27
Calor calentamiento aire	24,527.41	107.33
Calor calentamiento manzana	25.03	0.13
Calor útil de evaporación	2,388.84	
Calor perdido aire servido	35.81	
Calor secado real	2,449.68	12.25
Calor total	4,747.78	15.98
Energía total	29,275.19	108.52

*Nota:* Esta Tabla se completó por medio de los cálculos 19-25 tomando los datos de la Tabla 181. Condiciones de los datos originales: 1.0 atm y 24.3°C. Elaboración propia.

A continuación, se detalla los datos calculados de para la obtención de las curvas de secado y las curvas de pérdida de humedad respecto al tiempo, así como los balances de energía y masa para el secado 10. Esto se puede observar en las Tablas 185-193. Y las Figuras 53-55.

**Tabla 185.***Área superficial de rodajas de muestra de secado 11*

Muestra	Área superficial (m <sup>2</sup> )	Error (±m <sup>2</sup> )
1	6.04E-03	1.21E-05
2	6.82E-03	1.15E-05
3	8.62E-03	1.49E-05
4	8.55E-03	2.01E-05
5	8.82E-03	1.46E-05
6	8.92E-03	1.64E-05

*Nota:* Se determinó el área superficial de la rodaja de muestra para cada una de las corridas por medio del cálculo 12 con las ecuaciones 23 y 24 utilizando los datos de la Tabla 105. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 23.8°C. Elaboración propia.

**Tabla 186.***Sólido seco de muestras de secado 11 y relación de sólidos secos sobre área superficial*

Muestra	Sólido seco (kg)	Sólido seco/ Área superficial (m <sup>2</sup> /kg seco)
1	0.0007	0.1224
2	0.0012	0.1773
3	0.0011	0.1294
4	0.0009	0.1060
5	0.0013	0.1422
6	0.0013	0.1406

*Nota:* Se determinó el sólido seco y la relación de sólido seco por medio del cálculo 13 con la ecuación 25 utilizando los datos de la Tabla 105 con tiempo de secado 0. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 23.8°C. Elaboración propia.

**Tabla 187.***Agua perdida con respecto al tiempo de secado 11*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Error (±g de agua)
	1	2	3	4	5	6	
0							
10	0.9028	0.7834	0.9719	1.2546	1.2055	1.2804	7.07E-05
20	0.9748	0.9355	1.3052	1.2402	1.2340	1.2999	7.07E-05
30	0.8965	0.9651	1.2608	1.1375	1.1718	1.2620	7.07E-05
40	0.8442	0.9270	1.1994	1.1220	1.1591	1.2110	7.07E-05
50	0.6778	0.9877	0.8506	0.9260	1.0647	1.0947	7.07E-05
60	0.6774	0.9203	1.2006	0.7682	1.0353	1.0876	7.07E-05
80	0.8018	1.6506	1.3687	0.7414	1.6543	1.4894	7.07E-05
100	0.2507	1.1869	0.6975	0.1104	0.9976	0.9591	7.07E-05
130	0.0377	1.1302	0.1687	0.0279	0.4964	0.3935	7.07E-05
160	0.0077	0.3059	0.0196	0.0130	0.0597	0.0413	7.07E-05
180	0.0025	0.0366	0.0059	0.0043	0.0125	0.0104	7.07E-05

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 8 con la ecuación 20 y utilizando los datos de la Tabla 106 y en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 23.8°C. Elaboración propia.

**Tabla 188.**  
*Contenido de agua de muestras en secado 11*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra					
	1	2	3	4	5	6
0	6.0761	9.9397	9.1654	7.4447	10.3107	10.3027
10	5.1733	9.1563	8.1935	6.1901	9.1052	9.0223
20	4.1985	8.2208	6.8883	4.9499	7.8712	7.7224
30	3.3020	7.2557	5.6275	3.8124	6.6994	6.4604
40	2.4578	6.3287	4.4281	2.6904	5.5403	5.2494
50	1.7800	5.3410	3.5775	1.7644	4.4756	4.1547
60	1.1026	4.4207	2.3769	0.9962	3.4403	3.0671
80	0.3008	2.7701	1.0082	0.2548	1.7860	1.5777
100	0.0501	1.5832	0.3107	0.1444	0.7884	0.6186
130	0.0124	0.4530	0.1420	0.1165	0.2920	0.2251
160	0.0047	0.1471	0.1224	0.1035	0.2323	0.1838
180	0.0022	0.1105	0.1165	0.0992	0.2198	0.1734

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 9 con la ecuación 21 para el tiempo 0 y para el tiempo n la ecuación 22 utilizando los datos de la Tabla 186 y Tabla 106 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 23.8°C. Elaboración propia.

**Tabla 189.**  
*Humedad en base húmeda secado 11 (kg agua/kg sólido húmedo)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra					
	1	2	3	4	5	6
0	89.15%	89.15%	89.15%	89.15%	89.15%	89.15%
10	87.49%	88.33%	88.02%	87.23%	87.89%	87.80%
20	85.02%	87.17%	86.06%	84.53%	86.25%	86.03%
30	81.70%	85.71%	83.46%	80.80%	84.22%	83.75%
40	76.87%	83.95%	79.88%	74.81%	81.53%	80.72%
50	70.65%	81.53%	76.23%	66.07%	78.10%	76.82%
60	59.86%	78.51%	68.06%	52.37%	73.27%	70.98%
80	28.92%	69.60%	47.47%	21.95%	58.73%	55.72%
100	6.35%	56.69%	21.79%	13.75%	38.59%	33.04%
130	1.65%	27.24%	11.29%	11.40%	18.88%	15.22%
160	0.63%	10.84%	9.89%	10.26%	15.62%	12.78%
180	0.30%	8.37%	9.46%	9.87%	14.91%	12.15%

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 10 con la ecuación 2 y utilizando los datos de la Tabla 106 y 187 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 23.8°C. Elaboración propia.

**Tabla 190.**  
*Humedad base seca de secado 11 (kg agua/kg sólido seco)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Promedio de humedad
	1	2	3	4	5	6	
0	8.217	8.217	8.217	8.217	8.217	8.217	8.217
10	6.996	7.569	7.345	6.832	7.256	7.195	7.199
20	5.678	6.796	6.175	5.463	6.273	6.159	6.090
30	4.465	5.998	5.045	4.208	5.339	5.152	5.034
40	3.324	5.232	3.970	2.969	4.415	4.186	4.016

50	2.407	4.415	3.207	1.947	3.567	3.313	3.143
60	1.491	3.654	2.131	1.100	2.742	2.446	2.261
80	0.407	2.290	0.904	0.281	1.423	1.258	1.094
100	0.068	1.309	0.279	0.159	0.628	0.493	0.489
130	0.017	0.374	0.127	0.129	0.233	0.180	0.177
160	0.006	0.122	0.110	0.114	0.185	0.147	0.114
180	0.003	0.091	0.104	0.110	0.175	0.138	0.104

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 11 con la ecuación 3 y utilizando los datos de la Tabla 188 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 23.8°C. Elaboración propia.

**Tabla 191.**

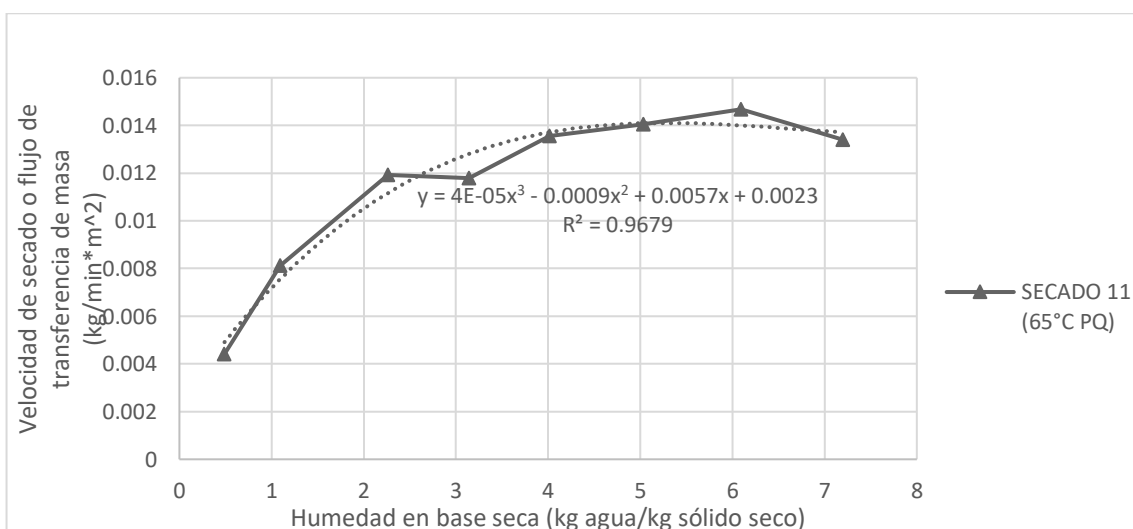
*Velocidad de secado o flujo de transferencia de masa secado 11 (kg/min\*m2)*

Tiempo transcurrido (min)	Muestra						Promedio de flujo de trans
	1	2	3	4	5	6	
0							
10	0.0149	0.0115	0.0113	0.0147	0.0137	0.0144	0.0134
20	0.0161	0.0137	0.0151	0.0145	0.0140	0.0146	0.0147
30	0.0148	0.0141	0.0146	0.0133	0.0133	0.0142	0.0141
40	0.0140	0.0136	0.0139	0.0131	0.0131	0.0136	0.0136
50	0.0112	0.0145	0.0099	0.0108	0.0121	0.0123	0.0118
60	0.0112	0.0135	0.0139	0.0090	0.0117	0.0122	0.0119
80	0.0066	0.0121	0.0079	0.0043	0.0094	0.0083	0.0081
100	0.0021	0.0087	0.0040	0.0006	0.0057	0.0054	0.0044
130	0.0002	0.0055	0.0007	0.0001	0.0019	0.0015	0.0016
160	0.0000	0.0015	0.0001	0.0001	0.0002	0.0002	0.0003
180	0.0000	0.0003	0.0000	0.0000	0.0001	0.0001	0.0001

*Nota:* Este cálculo se realizó a partir del cálculo 11 con la ecuación 3 y utilizando los datos de la Tabla 189 en los diferentes tiempos y en las diferentes muestras y con sólido seco/área superficial de la Tabla 185. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 23.8°C. Elaboración propia.

**Figura 53.**

*Curva de secado 11 a 65°C con pretratamiento químico, velocidad de secado vs humedad en base seca*

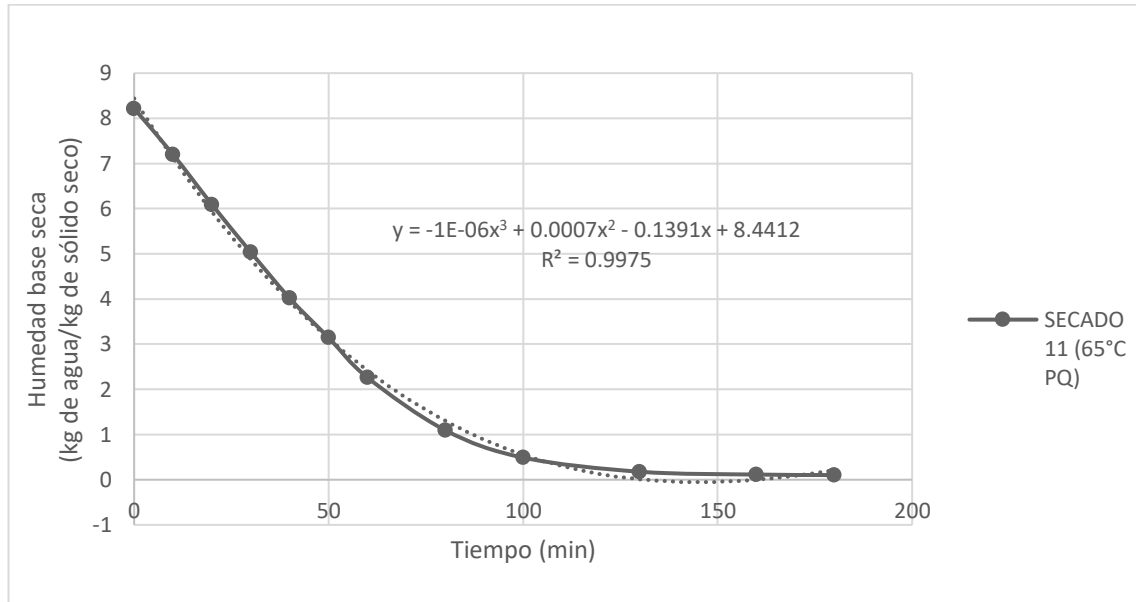


*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 190 y 189, graficando los promedios de las 6 muestras de la corrida 11. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que

se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 23.8°C. Elaboración propia.

**Figura 54.**

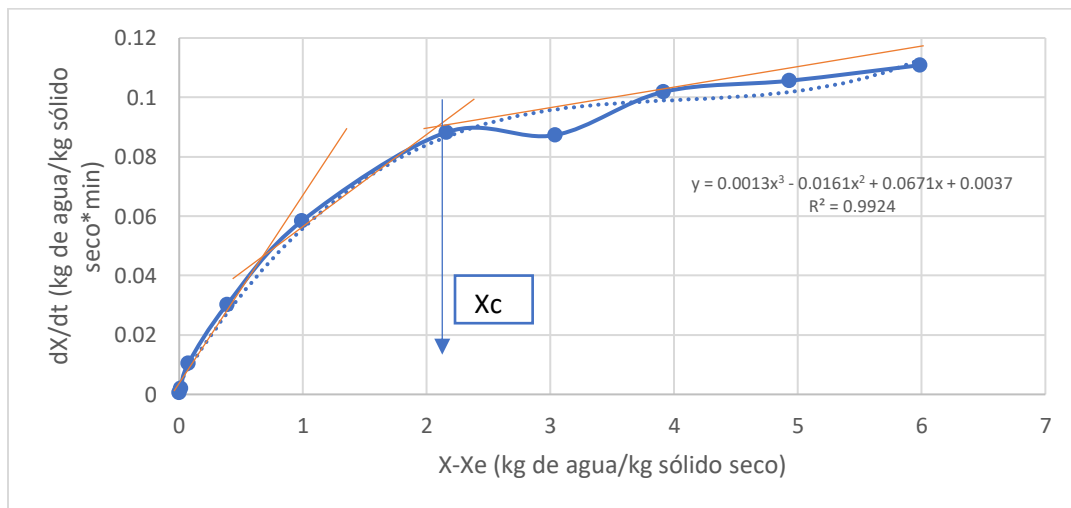
*Curva de pérdida de humedad secado 11 a 65°C vs tiempo*



*Nota:* Esta gráfica se realizó con los datos de la Tabla 189, graficando los promedios de las 6 muestras de la corrida 11. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 23.8°C. Elaboración propia.

**Figura 55.**

*Curva de pérdida de humedad respecto al tiempo contra el cambio de humedad del secado 11 a 65°C con pretratamiento químico*



*Nota:* Esta gráfica se realizó utilizando los datos de la Tabla 190, graficando los promedios del delta humedad partido el tiempo vs la humedad menos la humedad de equilibrio del sólido (final). Las líneas naranjas muestran las rectas tangentes o tendencia de los tramos de la curva. Esta gráfica se lee de derecha a izquierda ya que en

el tiempo 0 se cuenta con la mayor cantidad de humedad en base seca y en el tiempo final con la menor humedad. Xc corresponde a la humedad a la que la curva deja de tener comportamiento constante y comienza la decaída de velocidad. La línea punteada corresponde a la regresión polinomial que se ve descrita por la ecuación que se coloca en la gráfica y el coeficiente de correlación. Condiciones de datos originales: 1.0 atm y 23.8°C. Elaboración propia.

**Tabla 192.***Balance de masa y energía de secado 11*

Aspecto	Flujo (kg/h)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Humedad en base seca (kg de agua/kg base seca)	Entalpía (kJ/kg)
Entrada de manzanas frescas	0.185	28.7	85.00%	5.67	1090.47
Salida de restos de manzana	0.001	28.7	85.00%	5.67	1090.47
Salida de rodajas con pretratamiento	0.214	28.7	89.15%	8.22	1090.47
Entrada de pretratamiento	0.335				
Salida de pretratamiento	0.246				
Entrada de rodajas de manzana	0.214	28.7	89.15%	8.22	1090.47
Salida de sólido seco	0.027	60.4	4.33%	0.104	246.62
Entrada de aire ambiente	568.890	23.8	53.90%	0.015	58.49
Salida aire calentador y entrada secador	568.890	62.1	22.50%	0.043	164.61

*Nota:* Esta Tabla se completó por medio de los cálculos 15-18 y 20, utilizando los datos originales del secado 11, las condiciones de operación del equipo, descritas en la Tabla 101, 102, 103, 107 y 108. Condiciones de los datos originales: 1.0 atm y 23.8°C. Elaboración propia.

**Tabla 193.***Balance de energía de secado 11*

Aspecto	Flujo (kJ/h)	Incertidumbre
Calor de pérdidas al ambiente	2,184.68	9.99
Calor calentamiento aire	21,897.43	98.53
Calor calentamiento manzana	24.43	0.09
Calor útil de evaporación	2,360.70	
Calor perdido aire servido	30.94	
Calor secado real	2,416.06	9.32
Calor total	4,600.75	13.66
Energía total	26,498.18	99.47

*Nota:* Esta Tabla se completó por medio de los cálculos 19-25 tomando los datos de la Tabla 191. Condiciones de los datos originales: 1.0 atm y 23.8°C. Elaboración propia.

**Tabla 194.***Condiciones supuestas para la línea de producción*

Aspecto	Dato utilizado
Humedad dentro del secador	22.50%
Temperatura dentro de secador	62.1°C
Temperatura superficie de secador	57°C
Velocidad de aire entrante	3.0 m/s
Temperatura de entrada de aire	65°C
Humedad de entrada de aire	53.90%
Humedad inicial sólido	85.00%
Temperatura inicial sólido	24°C
Temperatura ambiente	24°C
Número de bandejas del secador	36
Número de sostenedor de bandejas	18
Factor de escala	24

*Nota:* Estas condiciones fueron tomadas a partir del secado 11, correspondiente al secado 11 y se escaló en un factor de 24 para los balances de masa y a partir de estos balances se planteó el balance de energía encontrando la temperatura y humedad de salida del aire húmedo, de la salida del secador. Elaboración propia.

**Tabla 195.***Eficiencias de secado, energético y consumo de calentamiento de todas las corridas*

Aspecto	Eficiencia de secado	Consumo de calentamiento	Eficiencia energética
3	5.50±0.03%	84.78±0.44%	15.22±0.07%
4	9.30±0.04%	89.70±0.45%	15.30±0.07%
5	10.03±0.04%	89.47±0.48%	10.53±0.05%
6	10.36±0.04%	88.77±0.48%	11.23±0.05%
7	10.04±0.04%	89.30±0.44%	10.70±0.05%
8	13.75±0.05%	84.12±0.42%	15.88±0.07%
9	12.97±0.04%	86.28±0.38%	13.72±0.05%
10	15.91±0.05%	82.20±0.36%	17.80±0.06%
11	17.04±0.05%	81.10±0.36%	18.90±0.07%

*Nota:* Esta Tabla se completó por medio de los cálculos 26, 27 y 28, utilizando la ecuación 35,36 y 37. A partir de los datos de cada una de las corridas del “Tabla n de balance de energía de secado”. Las condiciones de los datos originales fueron dependiendo de la corrida, consultar las Tablas de balance de energía de secado de cada una de las corridas. Elaboración propia.

**Tabla 196.***Porcentaje de pérdida de masa de 6 muestras de cada secado a diferentes temperaturas*

Muestra	Temperatura 55°C	Temperatura 60°C	Temperatura 65°C
1	83.28%	82.72%	84.22%
2	83.81%	82.00%	84.34%
3	82.10%	82.56%	84.39%
4	84.68%	83.74%	84.25%
5	80.78%	81.12%	84.18%
6	80.09%	80.55%	84.27%

*Nota:* La Tabla se completó por medio del cálculo 29, ecuación 38 y utilizando los datos de las Tablas denominados “Datos de masa de 6 rodajas de muestras de secado n contra tiempo” con los tiempos 0 y el tiempo final de cada corrida. Las condiciones de los datos originales fueron dependiendo de la corrida, consultar las Tablas de cada una de las corridas. Elaboración propia.

**Tabla 197.**

*Prueba ANOVA con alfa de 0.1 de porcentaje de pérdida de masa de 6 muestras de cada secado*

Temperatura de operación de secado	55°C	60°C	65°C
Número de datos	6	6	6
Suma de datos	4.9475	4.9269	5.0565
Promedio de datos	0.8245	0.8211	0.8427
Varianza	3.20E-04	1.33E-04	5.83E-07
F crítico	2.6951		
F obtenido	5.3429		
Conclusión	Hipótesis rechazada		

*Nota:* Se realizó la prueba ANOVA con los datos de la Tabla anterior, para las 6 muestras de cada corrida y las 3 temperaturas, se comparó el resultado utilizando los criterios del cálculo 3. Las condiciones de los datos originales se pueden consultar en las Tablas denominados “Datos de masa de 6 rodajas de muestras de secado n contra tiempo” de cada corrida. Elaboración propia.

**Tabla 198.**

*Prueba ANOVA con alfa de 0.1 de porcentaje de pérdida de masa de 6 muestras a 55 y 60°C*

Temperatura de operación de secado	55°C	60°C
Número de datos	6	6
Suma de datos	4.9475	4.9269
Promedio de datos	0.8245	0.8211
Varianza	3.20E-04	1.33E-04
F crítico	3.2850	
F obtenido	0.1557	
Conclusión	Hipótesis aceptada	

*Nota:* Se realizó la prueba ANOVA con los datos de la Tabla anterior, para las 6 muestras de cada corrida y las 2 temperaturas que se muestran en la Tabla, se comparó el resultado utilizando los criterios del cálculo 3. Las condiciones de los datos originales se pueden consultar en las Tablas denominados “Datos de masa de 6 rodajas de muestras de secado n contra tiempo” de cada corrida. Elaboración propia.

**Tabla 199.**

*Prueba ANOVA con alfa de 0.1 de porcentaje de pérdida de masa de 6 muestras a 60 y 65°C*

Temperatura de operación de secado	60°C	65°C
Número de datos	6	6
Suma de datos	4.9269	5.0565
Promedio de datos	0.8211	0.8427
Varianza	1.33E-04	5.83E-07
F crítico	3.2850	
F obtenido	20.9294	
Conclusión	Hipótesis rechazada	

*Nota:* Se realizó la prueba ANOVA con los datos de la Tabla anterior, para las 6 muestras de cada corrida y las 2 temperaturas que se muestran en la Tabla, se comparó el resultado utilizando los criterios del cálculo 3. Las condiciones de los datos originales se pueden consultar en las Tablas denominados “Datos de masa de 6 rodajas de muestras de secado n contra tiempo” de cada corrida. Elaboración propia.

**Tabla 200.**

*Prueba ANOVA con alfa de 0.1 de porcentaje de pérdida de masa de 6 muestras a 55 y 65°C*

Temperatura de operación de secado	55°C	65°C
Número de datos	6	6
Suma de datos	4.9475	5.0565
Promedio de datos	0.8245	0.8427
Varianza	3.20E-04	5.83E-07
F crítico	3.2850	
F obtenido	6.1748	
Conclusión	Hipótesis rechazada	

*Nota:* Se realizó la prueba ANOVA con los datos de la Tabla anterior, para las 6 muestras de cada corrida y las 2 temperaturas que se muestran en la Tabla, se comparó el resultado utilizando los criterios del cálculo 3. Las condiciones de los datos originales se pueden consultar en las Tablas denominados “Datos de masa de 6 rodajas de muestras de secado n contra tiempo” de cada corrida. Elaboración propia.

**Tabla 201.**

*Porcentaje de pérdida de masa de 6 muestras de cada secado a diferentes pretratamientos*

Muestra	Secado 9 (°65)	Secado 10 (65°C) Pretratamiento mecánico	Secado 11 (65°C) Pretratamiento químico
1	84.22%	85.24%	89.12%
2	84.34%	85.41%	88.16%
3	84.39%	85.42%	88.02%
4	84.25%	85.33%	87.96%
5	84.18%	85.39%	87.25%
6	84.27%	85.25%	87.25%

*Nota:* La Tabla se completó por medio del cálculo 29, ecuación 38 y utilizando los datos de las Tablas denominados “Datos de masa de 6 rodajas de muestras de secado n contra tiempo” con los tiempos 0 y el tiempo final de cada corrida. Las condiciones de los datos originales fueron dependiendo de la corrida, consultar las Tablas de cada una de las corridas. Elaboración propia.

**Tabla 202.**

*Prueba ANOVA con alfa de 0.1 de porcentaje de pérdida de masa de 6 muestras de cada secado con y sin pretratamiento*

Secado	Secado 9 (°65)	Secado 10 (65°C) Pretratamiento mecánico	Secado 11 (65°C) Pretratamiento químico
Número de datos	6	6	6
Suma de datos	5.056	5.1204	5.2775
Promedio de datos	0.8427	0.8534	0.8795
Varianza	5.83E-04	6.37E-04	4.78E-07
F crítico	2.695		
F obtenido	131.78		
Conclusión	Hipótesis rechazada		

*Nota:* Se realizó la prueba ANOVA con los datos de la Tabla anterior, para las 6 muestras de cada corrida y las 3 condiciones, con y sin pretratamiento, se comparó el resultado utilizando los criterios del cálculo 3. Las condiciones de los datos originales se pueden consultar en las Tablas denominados “Datos de masa de 6 rodajas de muestras de secado n contra tiempo” de cada corrida. Elaboración propia.

**Tabla 203.**

*Prueba ANOVA con alfa de 0.1 de porcentaje de pérdida de masa de 6 muestras de cada secado con pretratamiento químico y mecánico*

Secado	Secado 10 (65°C) Pretratamiento mecánico	Secado 11 (65°C) Pretratamiento químico
Número de datos	6	6
Suma de datos	5.1204	5.2775
Promedio de datos	0.8534	0.8795
Varianza	6.37E-04	4.78E-07
F crítico	3.285	
F obtenido	84.84	
Conclusión	Hipótesis rechazada	

*Nota:* Se realizó la prueba ANOVA con los datos de la Tabla anterior, para las 6 muestras de cada corrida y los dos tratamientos, que se muestran en la Tabla, se comparó el resultado utilizando los criterios del cálculo 3. Las condiciones de los datos originales se pueden consultar en las Tablas denominados “Datos de masa de 6 rodajas de muestras de secado n contra tiempo” de cada corrida. Elaboración propia.

**Tabla 204.**

*Prueba ANOVA con alfa de 0.1 de porcentaje de pérdida de masa de 6 muestras de cada secado con pretratamiento químico y sin pretratamiento*

Secado	Secado 9 (°65)	Secado 11 (65°C) Pretratamiento químico
Número de datos	6	6
Suma de datos	5.056	5.2775
Promedio de datos	0.8427	0.8795
Varianza	5.83E-04	4.78E-07
F crítico	3.285	
F obtenido	168.05	
Conclusión	Hipótesis rechazada	

*Nota:* Se realizó la prueba ANOVA con los datos de la Tabla anterior, para las 6 muestras de cada corrida y los dos tratamientos, que se muestran en la Tabla, se comparó el resultado utilizando los criterios del cálculo 3. Las condiciones de los datos originales se pueden consultar en las Tablas denominados “Datos de masa de 6 rodajas de muestras de secado n contra tiempo” de cada corrida. Elaboración propia.

**Tabla 205.**

*Prueba ANOVA con alfa de 0.1 de porcentaje de pérdida de masa de 6 muestras de cada secado con pretratamiento mecánico y sin pretratamiento*

Secado	Secado 9 (°65)	Secado 10 (65°C) Pretratamiento mecánico
Número de datos	6	6
Suma de datos	5.056	5.1204
Promedio de datos	0.8427	0.8534
Varianza	5.83E-04	6.37E-04
F crítico	3.285	
F obtenido	557.40	
Conclusión	Hipótesis rechazada	

*Nota:* Se realizó la prueba ANOVA con los datos de la Tabla anterior, para las 6 muestras de cada corrida y los dos tratamientos, que se muestran en la Tabla, se comparó el resultado utilizando los criterios del cálculo 3. Las condiciones de los datos originales se pueden consultar en las Tablas denominados “Datos de masa de 6 rodajas de muestras de secado n contra tiempo” de cada corrida. Elaboración propia.

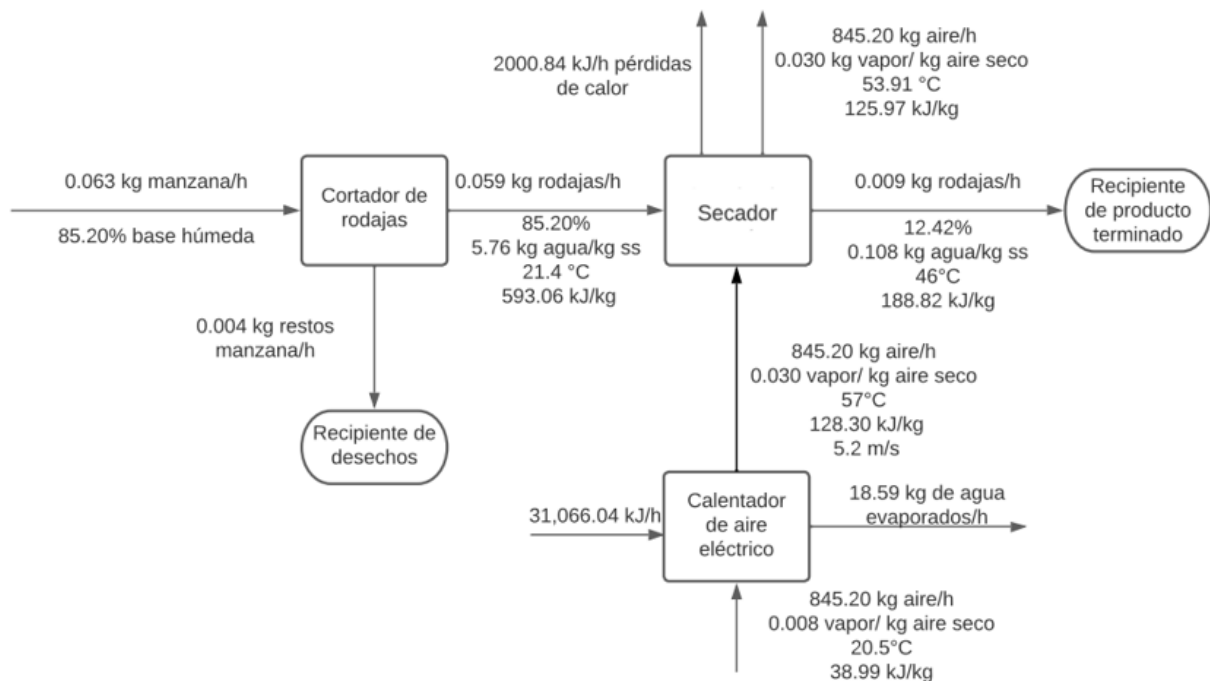
## Anexo G: Balances de masa y energía del proceso real

Esta sección permite observar los diagramas de balance de masa y energía de cada una de las corridas de la experimentación del trabajo, para elaborar estos diagramas se siguió la metodología. A continuación, se presentan los diagramas en las Figuras 56-64. Estos diagramas se realizaron con datos experimentales descritos en el Anexo 5 y se llevó a cabo en el secador de bandejas del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, en la ciudad de Guatemala.

Se elaboró el diagrama en la plataforma en línea de LucidChart. En estos diagramas se observan los flujos de aire, agua y materia prima, los procesos a los que se sometió para realizar el secado y demás pasos importantes del proceso.

**Figura 56.**

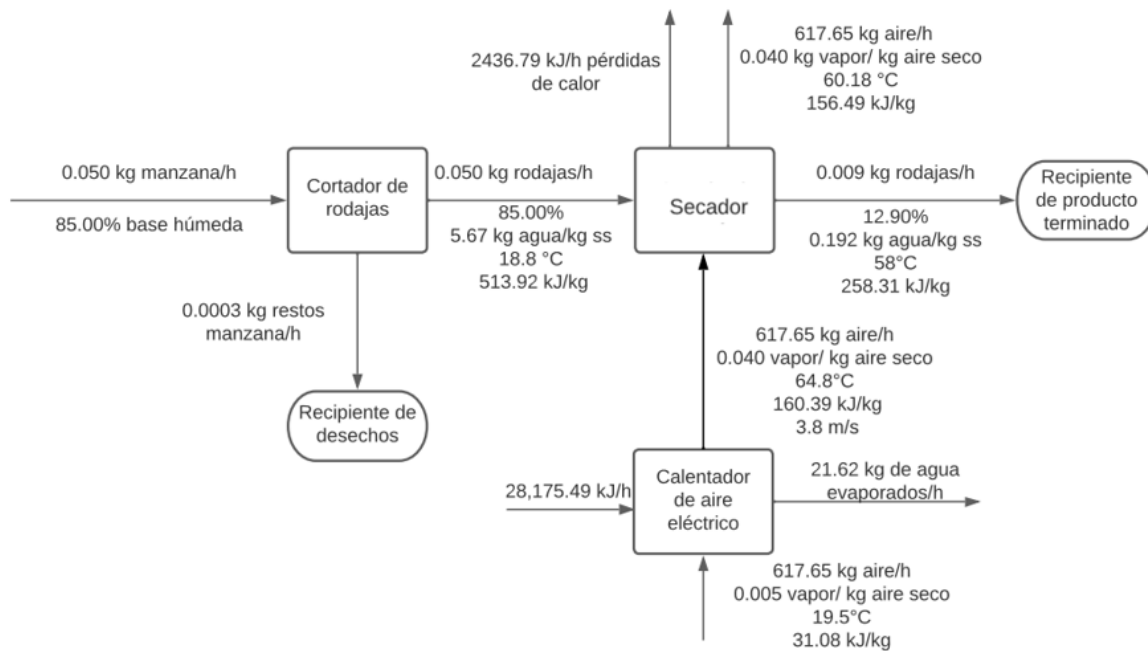
*Balance de masa y energía de Secado 3 a 55°C sin pretratamiento*



*Nota:* Elaboración propia.

**Figura 57.**

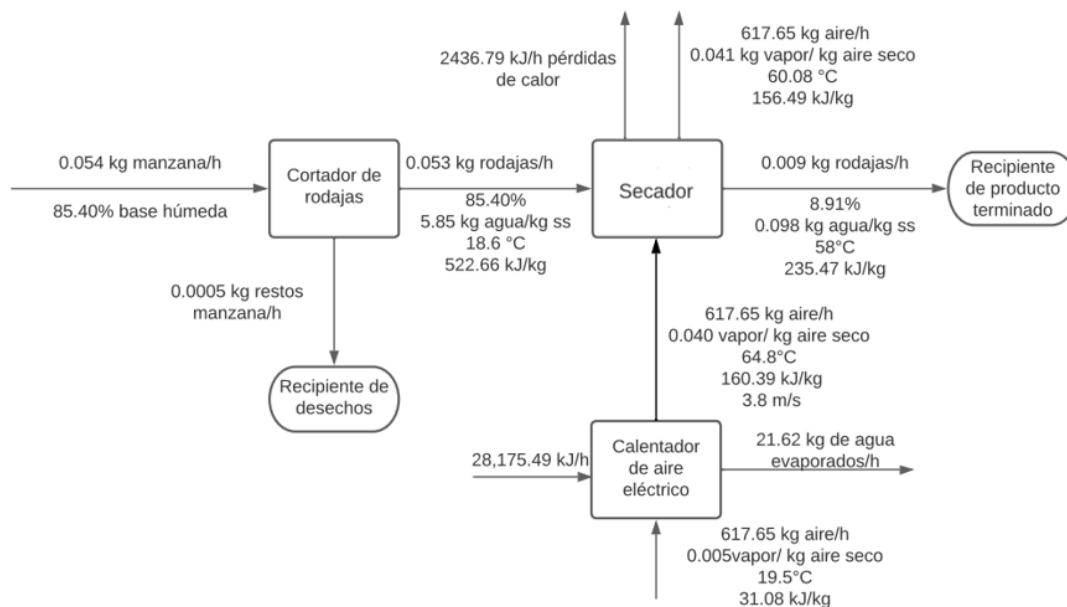
*Balance de masa y energía de Secado 4 a 60°C sin pretratamiento*



*Nota: Elaboración propia.*

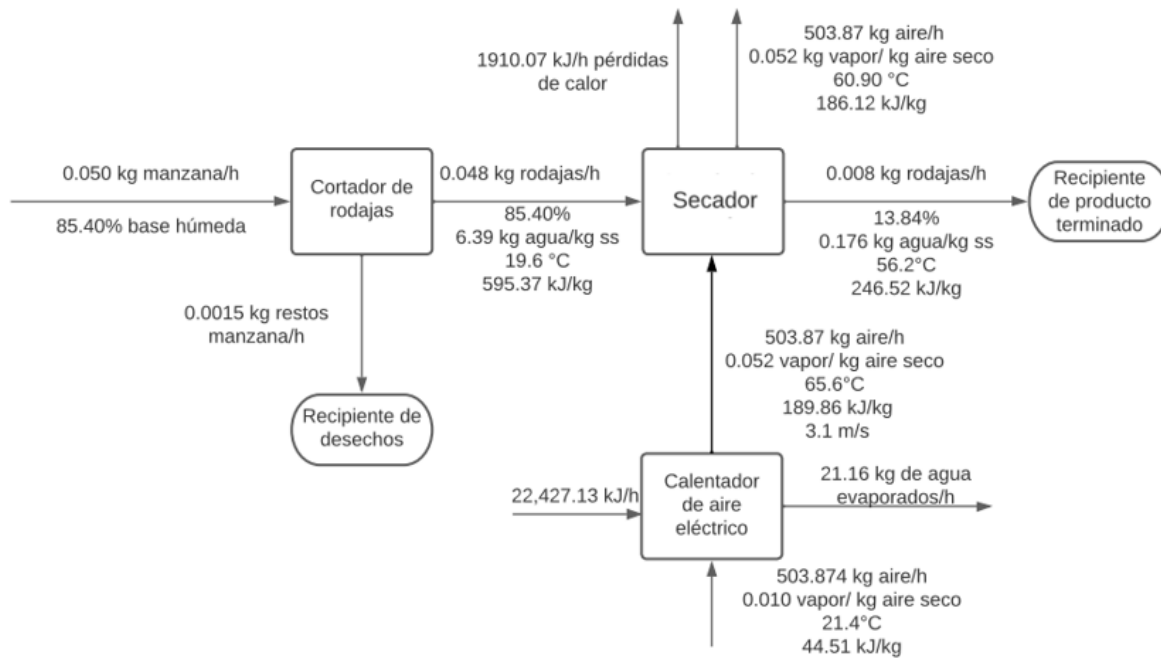
**Figura 58.**

*Balance de masa y energía de Secado 5 a 60°C sin pretratamiento*



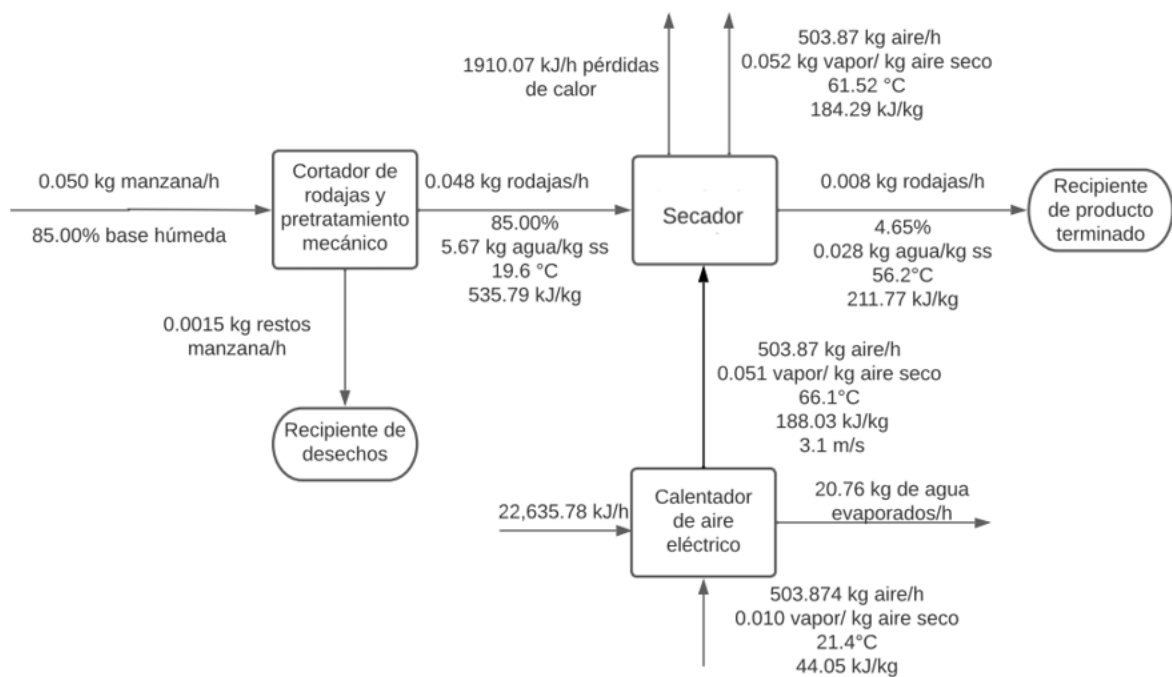
*Nota: Elaboración propia.*

**Figura 59.**  
Balance de masa y energía de Secado 6 a 65°C sin pretratamiento



Nota: Elaboración propia.

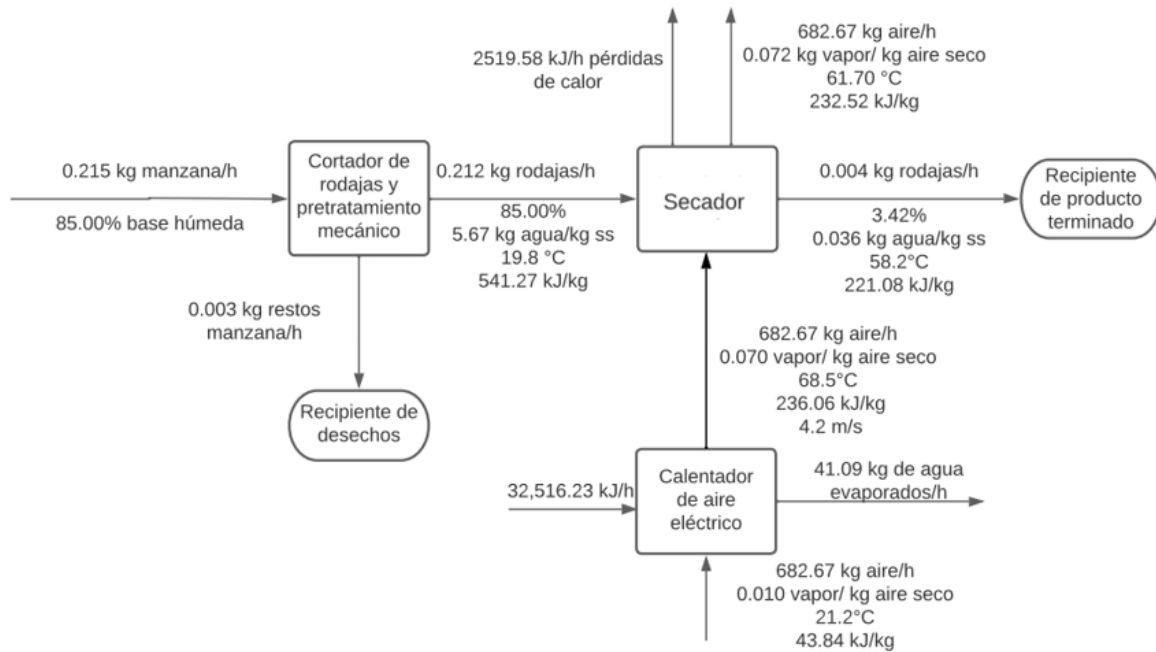
**Figura 60.**  
Balance de masa y energía de Secado 7 a 65°C sin pretratamiento



Nota: Elaboración propia.

**Figura 61.**

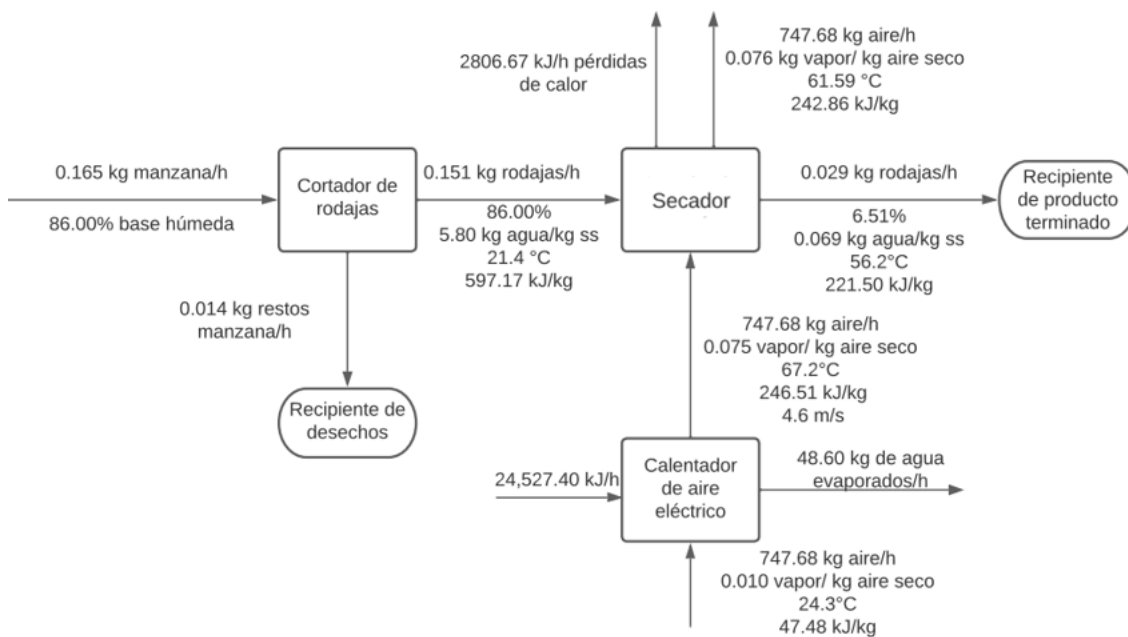
*Balance de masa y energía de Secado 8 a 65°C con pretratamiento mecánico*



*Nota: Elaboración propia.*

**Figura 62.**

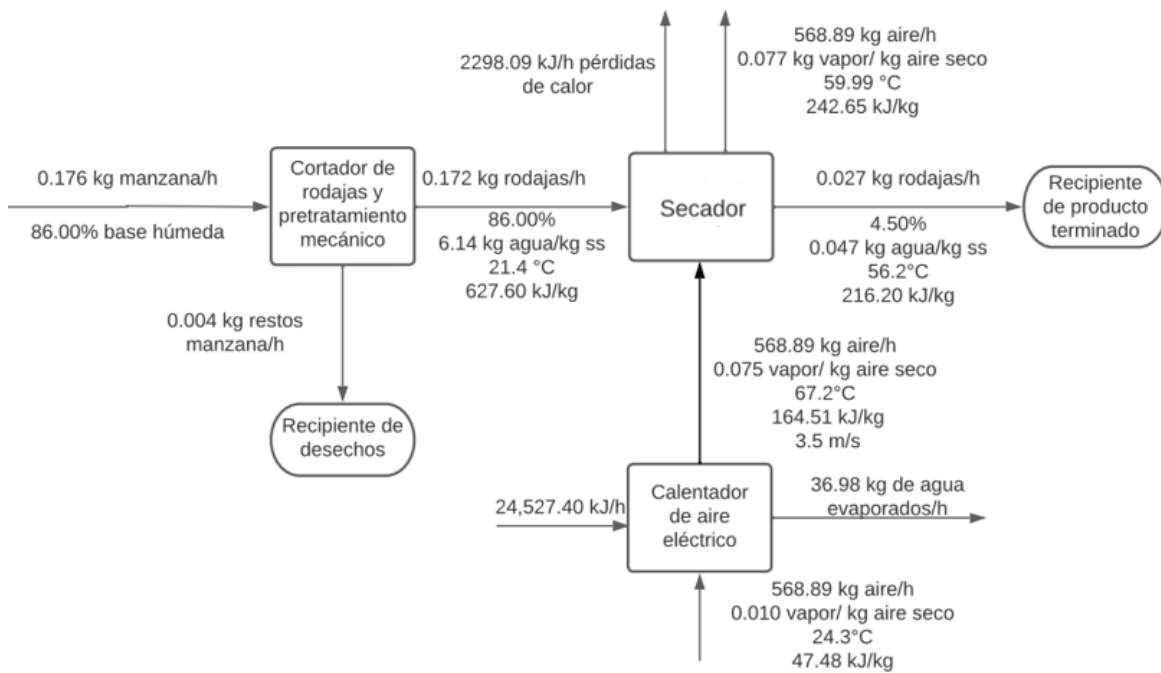
*Balance de masa y energía de Secado 9 a 65°C sin pretratamiento*



*Nota: Elaboración propia.*

**Figura 63.**

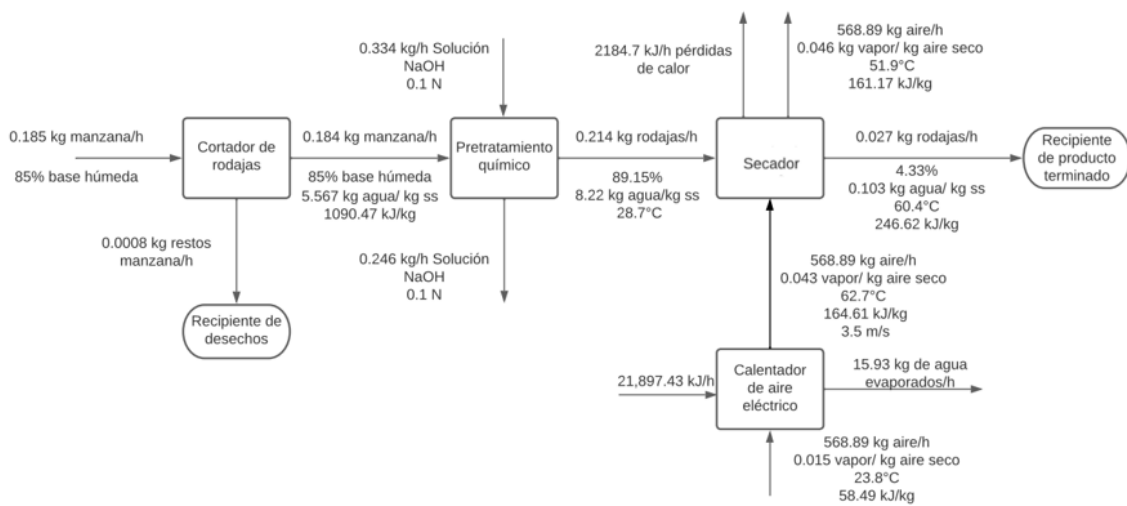
*Balance de masa y energía de Secado 10 a 65°C con pretratamiento mecánico*



Nota: Elaboración propia.

**Figura 64.**

*Balance de masa y energía de Secado 11 a 65°C con pretratamiento químico*



Nota: Elaboración propia.

## Anexo H: Fotografías de experimentación

En este apartado se tiene fotografías de la experimentación, materia prima, proceso de corte, proceso de pretratamiento químico, equipo utilizado, características del producto final, entre otros aspectos relevantes de la experimentación.

### Figura 65.

*Manzanas Gala de muestra utilizadas para el estudio*



*Nota:* Se compró manzanas Gala para la experimentación obtenidas en un supermercado. Procurando que fueran del mismo radio y del mismo color.

### Figura 66.

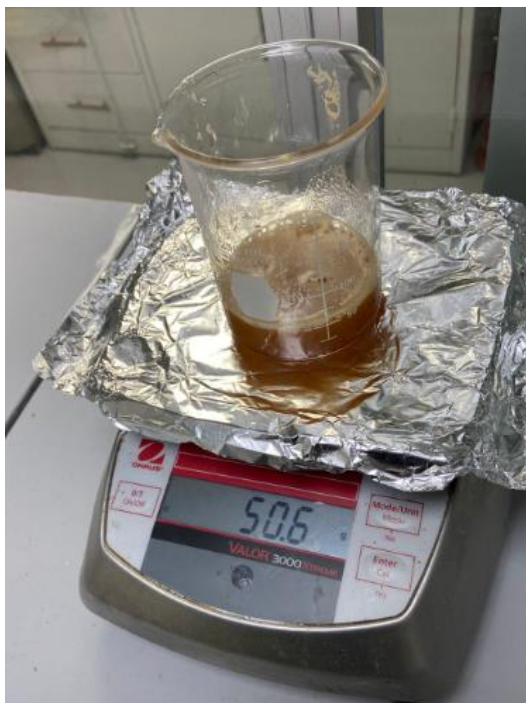
*Pesaje de manzana gala de muestra para estudio*



*Nota:* Se utilizó la balanza OHAUS para determinar la masa de cada una de las manzanas utilizadas durante la experimentación. Se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

**Figura 67.**

*Pesaje de volumen de jugo extraído de manzana pelada y descorazonada*



*Nota:* Por medio de un extractor de jugo doméstico se extrajo el jugo de una manzana pelada y descorazonada y posteriormente se midió y se determinó la masa de jugo en la balanza OHAUS. Se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

**Figura 68.**

*Pesaje de cáscara y corazones de manzanas de muestra de caracterización fisicoquímica*



*Nota:* Se determinó la masa de desperdicios (cáscaras y corazones de manzana) por medio de la balanza OHAUS en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

**Figura 69.**

*Gabinets de deshidratador utilizado para el estudio y respectivas bandejas*



*Nota:* Este equipo fue el que se utilizó durante la experimentación. Se colocó a diferentes condiciones de temperatura. Se utilizó principalmente las primeras dos repisas de bandejas para la experimentación y se colocó dos termocuplas para el monitoreo de la temperatura dentro del secador. Este equipo se encuentra dentro del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

**Figura 70.**

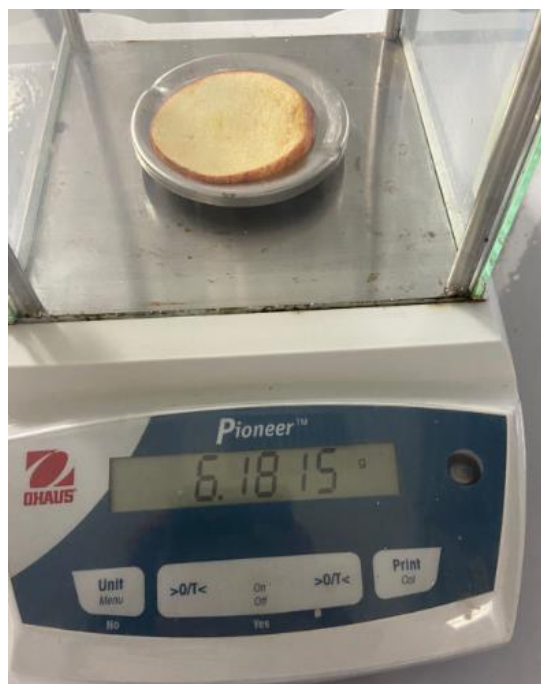
*Resultado de humedad en balanza de humedad OHAUS*



*Nota:* Se determinó la humedad de las muestras utilizadas durante la experimentación por medio de una balanza de humedad marca OHAUS MB120 operada a las condiciones de cada una de las corridas y a presión atmosférica. Esta se encuentra dentro del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

**Figura 71.**

*Pesaje inicial de muestra de manzana para elaboración de curva de secado*



*Nota:* Se determinó el peso de cada una de las muestras de la curva de secado, previo al secado y cada 5, 10, 15 o 20 minutos dependiendo de la corrida y el tiempo de secado acumulado. Esto con el fin de contar con los datos necesarios para las curvas. Estas mediciones se tomaron en la balanza analítica OHAUS Pioneer, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

**Figura 72.**

*Pesaje de rodajas de manzana para secado*



*Nota:* Se tomó la medición de la masa de las rodajas de manzana para poder determinar la masa de entrada y así poder tener el balance de masa del producto. Se utilizó la balanza OHAUS y se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

**Figura 73.**

*Rodajas de manzana posteriores a secado sin pretratamiento*



*Nota:* Se tomó la medición de las rodajas secas para determinar la masa de salida del producto y así poder completar el balance de masa y energía. Se utilizó la balanza OHAUS y se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

**Figura 74.**

*Rodajas de muestra utilizadas para curva de secado con pretratamiento mecánico*



*Nota:* Se realizó daño mecánico por medio de la mandolina, por lo que en esta fotografía se puede observar el daño realizado por el instrumento utilizado. Estas fueron las 6 muestras que se utilizaron para la curva de secado para el pretratamiento mecánico. El corte de las rodajas se realizó a temperatura de 23.4°C y 1.0 atm en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

**Figura 75.**

*Secado de manzanas en bandeja monitoreado por termocupla digital*



*Nota:* En esta imagen se puede observar cómo se realizaba el secado en las corridas y se observa la termocupla digital colocada para monitorear la temperatura dentro del secador. Esta corresponde a una de las corridas del pretratamiento mecánico

**Figura 76.**

*Rodajas de manzana secas con pretratamiento de mecánico*



*Nota:* En esta imagen se puede observar las rodajas secas en donde se observa el daño mecánico. Estas fueron secadas a 65°C y a 1.0 atm. Utilizando el deshidratador de gabinetes en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

**Figura 77.**

*Bandeja de rodajas de manzanas sin pretratamiento*



*Nota:* En esta imagen se puede observar cómo se realizaba el secado en las corridas utilizando las primeras dos bandejas. Esta corresponde a una de las corridas sin pretratamiento. Gabinetes del deshidratador ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

**Figura 78.**

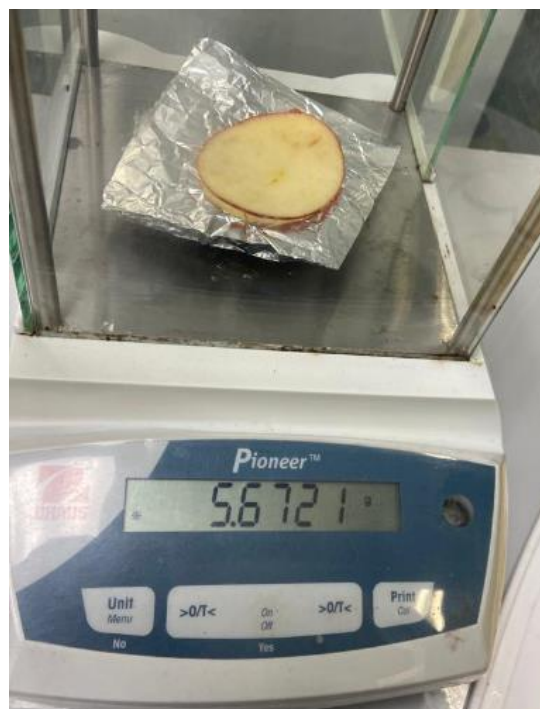
*Bandeja de rodajas de manzana secas con pretratamiento*



*Nora:* En esta imagen se puede observar las rodajas secas en donde se observa el daño mecánico. Estas fueron secadas a 65°C y a 1.0 atm. Utilizando el deshidratador de gabinetes en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

**Figura 79.**

*Muestra de rodaja de manzana previo al pretratamiento químico*



*Nota:* Se midió la masa de la rodaja previa al pretratamiento químico para determinar el aumento de agua en la muestra. Utilizando la balanza OHAUS. En el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

**Figura 80.**

*Rodaja de manzana de muestra posterior al pretratamiento químico*



*Nota:* Se midió la masa de la rodaja posterior al pretratamiento químico para determinar el aumento de agua en la muestra. Utilizando la balanza OHAUS. En el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

**Figura 81.**

*Muestras de Rodaja de manzana secas con pretratamiento químico*



*Nota:* Características de las muestras secadas utilizando el pretratamiento químico a 65°C en el secador de gabinetes en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

**Figura 82.**

*Residuos de rodajas de manzana adheridos a la bandeja en el secado por pretratamiento químico*



*Nota:* Pérdidas de muestra en las bandejas debido a que las muestras se pegaban debido a la humedad aumentada por el pretratamiento químico.

**Figura 83.**

*Comparación de resultado de rodajas de manzana secadas*



*Nota:* La primera columna de izquierda a derecha de rodajas corresponde a manzanas secadas a 65°C sin pretratamiento, la columna de en medio son manzanas secadas con pretratamiento químico a 65°C y la última columna corresponde a manzanas con pretratamiento mecánico secadas a 65°C.

### XIII. Glosario

- **Ácidos hidroxicinámicos.** Se derivan del ácido cinámico, normalmente están presentes en plantas y frutas en forma de ésteres de ácidos orgánicos o glucósidos o inclusive unidos a proteínas y otras moléculas de la pared celular como celulosa, xilanos y lignina (Chem y Ho, 1997)
- **Actividad del agua.** Expresa la disponibilidad, es decir el grado de libertad del agua en el producto. Es la relación entre la presión parcial del agua en el alimento y la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura (Casp y Abril, 1998).
- **Antocianinas.** Las antocianinas son pigmentos responsables de la gama de colores que abarcan desde el rojo hasta el azul de muchas frutas, vegetales y cereales (Garzón, 2008).
- **Contenido de humedad, base húmeda.** El contenido de humedad de un sólido o solución generalmente se describe en función del porcentaje de masa de humedad (Treybal, 1998).
- **Contenido de humedad. Base seca.** Se expresa como kilogramos de humedad por cada kilogramo de sólido seco (Treybal, 1998).
- **Eficiencia energética.** Esta es la eficiencia de producción, distribución y uso de la energía necesaria para garantizar calidad total, es parte del conjunto de problemas que afectan la competitividad de las empresas o instituciones (Monterroso y Cifuentes, s.f.).
- **Eficiencia.** La eficiencia es una virtud o facultad para lograr un efecto. También es la acción con que se logra ese efecto. En el área de la física, la eficiencia física se refiere a la energía que se invierte en comparación a la energía obtenida en un proceso o dispositivo (Monterroso y Cifuentes, s.f.).
- **Energía.** Como la capacidad de realizar un trabajo que poseen los cuerpos, cualquier que sea su causa (González, 2009).
- **Flavanoles.** Los flavanoles son un subtipo de flavonoides, un grupo de sustancias químicas. Los flavonoides se encuentran en una gran variedad de especies y supuestamente contribuyen a los beneficios para la salud que aportan estos alimentos. Se cree que un tipo de flavanoles, llamados catequinas, contribuyen al efecto antioxidante y cardioprotector de algunos alimentos y bebidas saludables (De Pascual, Moreno y Garcia, 2010).
- **Fruta deshidratada.** Son aquellas frutas a las que se les ha eliminado el contenido de agua mediante una operación de secado, ya sea utilizando el sol o por deshidratadores o secadores especializados (EMR, 2022).
- **Humedad en el equilibrio.** Es el contenido de humedad de una sustancia que está en equilibrio con la presión parcial dada de vapor (Treybal, 1998).
- **Humedad libre.** Es aquella humedad contenida por una sustancia en exceso de la humedad en el equilibrio. Solo puede evaporarse la humedad libre, el contenido de humedad libre de un sólido depende de la concentración del vapor en el gas (Treybal, 1998).
- **Humedad ligada.** Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura (Treybal, 1998).
- **Humedad no ligada.** Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura (Treybal, 1998).
- **Pretratamiento mecánico.** Consisten en producir algún tipo de daño mecánico sobre la piel de los frutos, que produce grietas en la capa impermeable facilitando la llegada de humedad desde el interior de los frutos hasta la superficie de estos (Ohaco et al., 2011).
- **Pretratamiento químico.** Son aquellos que permiten crear micro canales que disminuyen la impermeabilidad, aumentando así la velocidad de secado. Algunos también minimizan las reacciones enzimáticas o no enzimáticas que producen degradación de la calidad del producto (Ohaco et al., 2011).
- **Secador de bandejas.** Son utilizados para el secado de sólidos que deben ejecutarse sobre platos. En estos equipos se puede secar sólidos o materiales pastosos, como puede ser las tortas resultantes de algún proceso de filtración (Treybal, 1998).
- **Secador directo.** Transfieren el calor por contacto del producto con un gas calentado, generalmente por aire caliente, donde da lugar a la evaporación. El líquido vaporizado es arrastrado con medio de desecación, con los gases calientes. Este tipo de secadores también se les conoce como secadores por convección (Treybal, 1998).

- **Secador indirecto:** estos no utilizan el contacto directo con el gas para secar el material. Estos dependen el calor que emana de la cáscara del tambor para secar el material por conducción y radiación (Treybal, 1998).
- **Snack:** refiere a un alimento sólido ligero consumido entre comidas, ya sea con la mano o con un utensilio, acompañada con bebidas o sin ellas, sin corresponder a un sustituto de una comida (Romero, Díaz y Aguirre, 2016).
- **Transferencia de calor:** Se denomina transferencia de calor, transferencia térmica o transmisión de calor al fenómeno físico que consiste en el traspaso de energía calórica de un medio a otro (Treybal, 1998).
- **Transferencia de materia:** La transferencia de masa es el movimiento neto de masa desde una ubicación, lo que generalmente significa flujo, fase, fracción o componente, a otra. La transferencia de masa ocurre en muchos procesos, como la absorción, evaporación, secado, precipitación, filtración por membrana y destilación (Treybal, 1998).
- **Velocidad o flux de secado:** La velocidad de secado se define como la disminución del contenido en humedad libre de un sólido por unidad de tiempo (Treybal, 1998).
- **Difusión:** es un proceso mediante el cual un fluido se mezcla gradualmente con otro debido a sus propiedades cinéticas, lo que constituye una demostración del movimiento aleatorio de los líquidos y los gases (Treybal, 1998).