

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN**  
**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE**  
**INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**



**“CINÉTICA DE SECADO DE LA CÚRCUMA LONGA**  
**(*Curcuma longa* L.) EVALUADO MEDIANTE VISIÓN**  
**COMPUTACIONAL”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN**  
**INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

**Autores: Bach. Elton Jhon Rojas Ocupa**  
**Bach. Justo Chumacero Mijahuanca**  
**Asesor: Mg. Polito Michael Huayama Soplá**

**JAÉN-PERÚ, NOVIEMBRE, 2019**



# UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Ley de Creación N° 29304

Universidad Licenciada con Resolución del Consejo Directivo N° 002-2018-SUNEDU/CD

## FORMATO 03: ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el día 25 de Noviembre del año 2019, siendo las 11:30 horas, se reunieron los integrantes del Jurado:

Presidente: Mg. Segundo Alipio Cruz Hoyos

Secretario: Mg. Sc. James Tirado Lara

Vocal: Mg. Hans Himbler Minchán Velayarce, para evaluar la

Sustentación del Informe Final:

Trabajo de Investigación

Tesis

Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado:

" Cinética de secado de la cúrcuma longa (Curcuma longa L.)  
evaluado mediante visión computacional "

presentado por estudiante/egresado o Bachiller Elton Jhon Rojas Ouya y Justo Chumacero Mijahuanca  
de la Carrera Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias

Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:

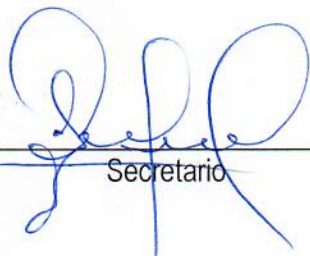
Aprobar       Desaprobar       Unanimidad       Mayoría

Con la siguiente mención:

- |                |            |               |
|----------------|------------|---------------|
| a) Excelente   | 18, 19, 20 | (    )        |
| b) Muy bueno   | 16, 17     | ( <u>17</u> ) |
| c) Bueno       | 14, 15     | (    )        |
| d) Regular     | 13         | (    )        |
| e) Desaprobado | 12 ó menos | (    )        |

Siendo las 13:00 horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmando su participación con la suscripción de la presente.

  
Presidente

  
Secretario

  
Vocal

## ÍNDICE GENERAL

|   |      |
|---|------|
| ÍNDICE GENERAL  | ii   |
| ÍNDICE DE TABLAS  | iv   |
| ÍNDICE DE FIGURAS                                       | x    |
| ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS                                   | xiv  |
| RESUMEN   | xvi  |
| ABSTRACT  | xvii |
| <br>  |      |
| I. INTRODUCCIÓN   | 1    |
| II. OBJETIVOS   | 8    |
| 2.1 General   | 8    |
| 2.2 Específicos   | 8    |
| III. MATERIALES Y MÉTODOS                               | 9    |
| 3.1 Materia prima                                       | 9    |
| 3.2 Materiales y equipos                                | 9    |
| 3.3 Procedimiento experimental                          | 10   |
| 3.3.1 Cinética de secado de la cúrcuma                  | 10   |
| 3.3.2 Selección y acondicionamiento de la materia prima | 12   |
| 3.3.3 Obtención de harina de cúrcuma                    | 12   |
| 3.3.4 Análisis fisicoquímico de la harina de cúrcuma    | 13   |
| 3.3.5 Análisis microbiológicos                          | 15   |
| 3.3.6 Análisis organolépticos                           | 15   |
| 3.3.7 Análisis mediante visión computacional            | 16   |
| 3.3.8 Diseño estadístico                                | 16   |
| 3.3.9 Análisis estadístico                              | 17   |
| IV. RESULTADOS  | 18   |
| 4.1 Características de la cúrcuma                       | 18   |
| 4.2 Cinética de secado de cúrcuma                       | 18   |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 4.3      | Modelamiento matemático de la cinética de secado de cúrcuma  | 24 |
| 4.4      | Análisis fisicoquímicos  | 26 |
| 4.5      | Análisis microbiológicos   | 26 |
| 4.6      | Análisis organoléptico   | 27 |
| 4.7      | Análisis mediante visión computacional   | 34 |
| V.       | DISCUSIONES  | 36 |
| VI.      | CONCLUSIONES   | 37 |
| VII.     | RECOMENDACIONES  | 38 |
| VIII.    | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS   | 39 |
| IX.      | DEDICATORIA  | 45 |
| X.       | AGRADECIMIENTOS  | 46 |
| ANEXO 01 | Imágenes de las operaciones para la obtención de harina de cúrcuma.  | 47 |
| ANEXO 02 | Secado de la cúrcuma en el laboratorio de Refrigeración y Deshidratación de la UNJ.  | 50 |
| ANEXO 03 | Obtención de los valores de las coordenadas $L^*a^*b^*$ mediante el software Matlab 17.0.  | 51 |
| ANEXO 04 | Imágenes de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos de la harina de cúrcuma.   | 52 |
| ANEXO 05 | Evaluación del análisis organoléptica de la harina de cúrcuma con escala hedónica.   | 53 |
| ANEXO 06 | Algoritmo usado en el programa Matlab 17.0 para la obtención de los valores de las coordenadas $L^* a^* b^*$ .   | 55 |
| ANEXO 07 | Análisis ANOVA para la evaluación organoléptica de la harina de cúrcuma.   | 56 |
| ANEXO 08 | Resultados de los datos experimentales de secado de rodajas de cúrcuma realizados con aire a $T = 45^{\circ}\text{C}$ y velocidades de 2.5, 3.0 y 3.5 m/s. | 57 |
| ANEXO 09 | Resultados de los datos experimentales de secado de rodajas de cúrcuma realizados con aire a $T = 50^{\circ}\text{C}$ y velocidades de 2.5,3.0 y 3.5 m/s.  | 71 |
| ANEXO 10 | Resultados de los datos experimentales de secado de rodajas de cúrcuma realizados con aire a $T = 55^{\circ}\text{C}$ y velocidades de 2.5, 3.0 y 3.5 m/s. | 85 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Tabla 1.  | Descripción de los nueve tratamientos y sus variables.   | 14 |
| Tabla 2.  | Análisis fisicoquímico de los rizomas frescos de cúrcuma.  | 16 |
| Tabla 3.  | Datos experimentales del secado de cúrcuma a 45 °C y a una velocidad de 2.5 m/s.   | 19 |
| Tabla 4.  | Ecuaciones correspondientes a la parte recta y a la parte curva de cada una de las gráficas experimentales analizadas con el software SPSS y sus parámetros cinéticos. | 25 |
| Tabla 5.  | Análisis fisicoquímicos de la harina de cúrcuma.   | 26 |
| Tabla 6.  | Análisis microbiológico de la harina de cúrcuma.   | 26 |
| Tabla 7.  | Puntajes de los panelistas para el color de la harina de cúrcuma.  | 27 |
| Tabla 8.  | Resultados de la evaluación del color de los panelistas a los tratamientos mediante la escala hedónica   | 28 |
| Tabla 9.  | Puntajes de los panelistas para el olor de la harina de cúrcuma.   | 30 |
| Tabla 10. | Resultados de la evaluación del olor de los panelistas a los tratamientos mediante la escala hedónica.   | 30 |
| Tabla 11. | Puntajes de los panelistas para la textura de la harina de cúrcuma.  | 32 |
| Tabla 12. | Resultados de la evaluación de la textura de los panelistas a los tratamientos mediante la escala hedónica.  | 32 |
| Tabla 13. | Resultados de las coordenadas L*a*b* de las harinas en comparación con los de la rodaja de cúrcuma fresca.   | 34 |
| Tabla 14. | Evaluación del color de la harina.   | 53 |
| Tabla 15. | Evaluación del olor de la harina.  | 53 |
| Tabla 16. | Evaluación de la textura de la harina.   | 54 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 17. Análisis de varianza (ANOVA) del color.  | 56 |
| Tabla 18. Análisis de varianza (ANOVA) del olor.   | 56 |
| Tabla 19. Análisis de varianza (ANOVA) de la textura.  | 56 |
| Tabla 20. Datos experimentales de la operación de secado de rodajas de cúrcuma, en un secador de bandejas con flujo de aire a 45°C y velocidad de 2,5 m/s. | 57 |
| Tabla 21. Resumen modelo de regresión lineal (T = 45 °C; velocidad =2.5 m/s).  | 59 |
| Tabla 22. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión lineal (T = 45 °C; velocidad = 2.5 m/s).  | 59 |
| Tabla 23. Coeficientes de la ecuación lineal (T = 45 °C; velocidad = 2.5 m/s).   | 59 |
| Tabla 24. Resumen del modelo de regresión logarítmica (T = 45 °C; velocidad = 2.5 m/s).  | 60 |
| Tabla 25. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión logarítmica (T = 45 °C; velocidad = 2,5 m/s).   | 60 |
| Tabla 26. Coeficientes de la ecuación logarítmica (T = 45 °C; velocidad = 2.5 m/s)   | 61 |
| Tabla 27. Datos experimentales de la operación de secado de rodajas de cúrcuma, en un secador de bandejas con flujo de aire a 45°C y velocidad de 3,0 m/s. | 62 |
| Tabla 28. Resumen modelo de regresión lineal (T = 45 °C; velocidad = 3.0 m/s).   | 64 |
| Tabla 29. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión lineal (T = 45 °C; velocidad = 3.0 m/s).  | 64 |
| Tabla 30. Coeficientes de la ecuación lineal (T = 45 °C; velocidad = 3.0 m/s).   | 64 |
| Tabla 31. Resumen del modelo de regresión exponencial (T = 45 °C; velocidad = 3.0 m/s).  | 65 |
| Tabla 32. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión exponencial (T = 45 °C; velocidad = 3.0 m/s).   | 65 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 33. Coeficientes de la ecuación exponencial (T = 45 °C; velocidad = 3.0 m/s).   | 66 |
| Tabla 34. Datos experimentales de la operación de secado de rodajas de cúrcuma, en un secador de bandejas con flujo de aire a 45°C y velocidad de 3,5 m/s.  | 67 |
| Tabla 35. Resumen modelo de regresión lineal (T = 45 °C; velocidad = 3.5 m/s).  | 68 |
| Tabla 36. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión lineal (T = 45 °C; velocidad = 3.5 m/s).   | 69 |
| Tabla 37. Coeficientes de la ecuación lineal (T = 45 °C; velocidad = 3.5 m/s).  | 69 |
| Tabla 38. Resumen del modelo de regresión logarítmica (T = 45 °C; velocidad = 3.5 m/s).   | 70 |
| Tabla 39. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión logarítmica (T = 45 °C; velocidad = 3.5 m/s)   | 70 |
| Tabla 40. Coeficientes de la ecuación logarítmica (T = 45 °C; velocidad = 3.5 m/s)  | 70 |
| Tabla 41. Datos experimentales de la operación de secado de rodajas de cúrcuma, en un secador de bandejas con flujo de aire a 50 °C y velocidad de 2,5 m/s. | 71 |
| Tabla 42. Resumen de modelo de regresión lineal (T = 50 °C; velocidad = 2.5 m/s).   | 73 |
| Tabla 43. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión lineal (T = 50 °C; velocidad = 2.5 m/s).   | 74 |
| Tabla 44. Coeficientes de la ecuación lineal (T = 50 °C; velocidad = 2.5 m/s).  | 74 |
| Tabla 45. Resumen del modelo de regresión logarítmica (T = 50 °C; velocidad = 2.5 m/s).   | 75 |
| Tabla 46. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión logarítmica (T = 50 °C; velocidad = 2.5 m/s).  | 75 |
| Tabla 47. Coeficientes de la ecuación logarítmica (T = 50 °C; velocidad = 2.5 m/s).   | 75 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Tabla 48. | Datos experimentales de la operación de secado de rodajas de cúrcuma, en un secador de bandejas con flujo de aire a 50 °C y velocidad de 3,0 m/s. | 76 |
| Tabla 49. | Resumen de modelo de regresión lineal (T = 50 °C; velocidad = 3.0 m/s).   | 78 |
| Tabla 50. | Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión lineal (T = 50 °C; velocidad = 3.0 m/s).   | 78 |
| Tabla 51. | Coeficientes de la ecuación lineal (T = 50 °C; velocidad = 3.0 m/s).  | 78 |
| Tabla 52. | Resumen del modelo de regresión exponencial (T = 50 °C; velocidad = 3.0 m/s).   | 79 |
| Tabla 53. | Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión exponencial (T = 50 °C; velocidad = 3.0 m/s).  | 79 |
| Tabla 54. | Coeficientes de la ecuación exponencial (T = 50 °C; velocidad = 3.0 m/s).   | 80 |
| Tabla 55. | Datos experimentales de la operación de secado de rodajas de cúrcuma, en un secador de bandejas con flujo de aire a 50 °C y velocidad de 3,5 m/s. | 81 |
| Tabla 56. | Resumen de modelo de regresión lineal (T = 50 °C; velocidad = 3.5 m/s).   | 82 |
| Tabla 57. | Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión lineal (T = 50 °C; velocidad = 3.5 m/s).   | 83 |
| Tabla 58. | Coeficientes de la ecuación lineal (T = 50 °C; velocidad = 3.5 m/s).  | 83 |
| Tabla 59. | Resumen del modelo de regresión exponencial (T = 50 °C; velocidad = 3.5 m/s).   | 84 |
| Tabla 60. | Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión exponencial (T = 50 °C; velocidad = 3.5 m/s).  | 84 |
| Tabla 61. | Coeficientes de la ecuación exponencial (T = 50 °C; velocidad = 3.5 m/s).   | 84 |
| Tabla 62. | Datos experimentales de la operación de secado de rodajas de cúrcuma en un secador de bandejas con flujo de aire a 55 °C y velocidad de 2,5 m/s.  | 85 |



|   |    |
|---|----|
| Tabla 63. Resumen de modelo de regresión lineal (T = 55 °C; velocidad = 2.5 m/s).   | 87 |
| Tabla 64. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión lineal (T = 55 °C; velocidad = 2.5 m/s).   | 87 |
| Tabla 65. Coeficientes de la ecuación lineal (T = 55 °C; velocidad = 2.5 m/s)   | 87 |
| Tabla 66. Resumen del modelo de regresión exponencial (T = 55 °C; velocidad = 2.5 m/s).   | 88 |
| Tabla 67. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión exponencial (T = 55 °C; velocidad = 2.5 m/s).  | 88 |
| Tabla 68. Coeficientes de la ecuación exponencial (T = 55 °C; velocidad = 2.5 m/s).   | 89 |
| Tabla 69. Datos experimentales de la operación de secado de rodajas de cúrcuma, en un secador de bandejas con flujo de aire a 55 °C y velocidad de 3,0 m/s. | 89 |
| Tabla 70. Resumen de modelo de regresión lineal (T = 55 °C; velocidad = 3.0 m/s).   | 91 |
| Tabla 71. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión lineal (T = 55 °C; velocidad = 3.0 m/s).   | 91 |
| Tabla 72. Coeficientes de la ecuación lineal (T = 55 °C; velocidad = 3.0 m/s).  | 92 |
| Tabla 73. Resumen del modelo de regresión exponencial (T = 55 °C; velocidad = 3.0 m/s).   | 92 |
| Tabla 74. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión exponencial (T = 55 °C; velocidad = 3.0 m/s).  | 92 |
| Tabla 75. Coeficientes de la ecuación exponencial (T = 55 °C; velocidad = 3.0 m/s).   | 93 |
| Tabla 76. Datos experimentales de la operación de secado de rodajas de cúrcuma, en un secador de bandejas con flujo de aire a 55 °C y velocidad de 3,5 m/s  | 93 |
| Tabla 77. Resumen de modelo de regresión lineal (T = 55 °C; velocidad = 3.5 m/s).   | 95 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 78. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión lineal ( $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.5 m/s).      | 95 |
| Tabla 79. Coeficientes de la ecuación lineal ( $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.0 m/s)                                | 95 |
| Tabla 80. Resumen del modelo de regresión exponencial ( $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.5 m/s).                      | 96 |
| Tabla 81. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión exponencial ( $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.5 m/s). | 96 |
| Tabla 82. Coeficientes de la ecuación exponencial ( $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.5 m/s).                          | 97 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Figura 1.  | Influencia de la velocidad del aire ( $w$ ) sobre la operación de secado, a temperatura constante $W_3 > W_2 > W_1$ .                                | 6  |
| Figura 2.  | Secador de bandejas.   | 10 |
| Figura 3.  | Plan experimental, para cada temperatura se controlarán tres velocidades de aire de secado.  | 11 |
| Figura 4.  | Flujograma para el proceso de obtención de harina de cúrcuma.  | 13 |
| Figura 5.  | Humedad residual en función del tiempo ( $T = 45\text{ }^\circ\text{C}$ , velocidades de 2.5, 3.0 y 3.5 m/s).  | 20 |
| Figura 6.  | Humedad residual en función del tiempo ( $T = 50\text{ }^\circ\text{C}$ , velocidades 2.5, 3.0 y 3.5 m/s).   | 21 |
| Figura 7.  | Humedad residual en función del tiempo ( $T = 55\text{ }^\circ\text{C}$ , velocidades de 2.5, 3.0 y 3.5 m/s).  | 22 |
| Figura 8.  | Variación de la humedad con el tiempo en función de la humedad residual promedio ( $T = 45\text{ }^\circ\text{C}$ , velocidades 2.5, 3.0 y 3.5 m/s). | 23 |
| Figura 9.  | Variación de la humedad con el tiempo en función de la humedad residual promedio ( $T = 50\text{ }^\circ\text{C}$ , velocidades 2.5, 3.0 y 3.5 m/s). | 23 |
| Figura 10. | Variación de la humedad con el tiempo en función de la humedad residual promedio ( $T = 55\text{ }^\circ\text{C}$ , velocidades 2.5, 3.0 y 3.5 m/s). | 24 |
| Figura 11. | Gráfico circular de proyección para la evaluación del color de la harina de cúrcuma.   | 29 |
| Figura 12. | Gráfico circular de proyección para la evaluación del olor de la harina de cúrcuma.  | 31 |
| Figura 13. | Gráfico circular de proyección para la evaluación de la textura de la harina de cúrcuma.   | 33 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 14. Comparación de los valores de coordenadas L*a*b* de las harinas de cúrcuma con la rodaja de cúrcuma fresca.   | 35 |
| Figura 15. Humedad residual en función del tiempo (T= 45°C, velocidad 2,5 m/s).  | 59 |
| Figura 16. Representación de los datos experimentales (0) y de la línea recta (-) generada por el SPSS. (T = 45 °C; velocidad = 2.5 m/s).  | 61 |
| Figura 17. Representación de los datos experimentales (0), de la curva logarítmica (-) y de la curva exponencial (-.) generada por el SPSS. La curva exponencial es la más representativa (T = 45 °C; velocidad = 2,5 m/s).  | 62 |
| Figura 18. Humedad residual en función del tiempo (T = 45 °C, velocidad = 3.0 m/s).  | 64 |
| Figura 19. Representación de los datos experimentales (0) y de la línea recta (-) generada por el SPSS. (T = 45 °C; velocidad = 3.0 m/s).  | 66 |
| Figura 20. Representación de los datos experimentales (0), de la curva logarítmica (-) y de la curva exponencial (-.) generada por el SPSS. La curva exponencial es la más representativa. (T = 55 °C; velocidad = 3.0 m/s). | 67 |
| Figura 21. Humedad residual en función del tiempo (T = 45 °C, velocidad = 3.5 m/s).  | 69 |
| Figura 22. Representación de los datos experimentales (0) y de la línea recta (-) generada por el SPSS. (T = 45 °C; velocidad = 3.5 m/s).  | 70 |
| Figura 23. Representación de los datos experimentales (0), de la curva logarítmica (-) y de la curva exponencial (-.) generada por el SPSS. La curva logarítmica es la más representativa (T = 45 °C; velocidad = 3.5 m/s).  | 72 |
| Figura 24. Humedad residual en función del tiempo (T = 50 °C, velocidad 2.5 m/s).  | 74 |
| Figura 25. Representación de los datos experimentales (0) y de la línea recta (-) generada por el SPSS. (T = 50 °C; velocidad = 2.5 m/s).  | 75 |

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Figura 26. | Representación de los datos experimentales (0), de la curva logarítmica (-) y de la curva exponencial (-.) generada por el SPSS. La curva logarítmica es la más representativa (T = 50°C; velocidad = 2.5 m/s).  | 77 |
| Figura 27. | Humedad residual en función del tiempo (T = 50 °C, velocidad 3.0 m/s).   | 78 |
| Figura 28. | Representación de los datos experimentales (0) y de la línea recta (-) generada por el SPSS. (T = 50 °C; velocidad = 3.0 m/s).   | 80 |
| Figura 29. | Representación de los datos experimentales (0), de la curva logarítmica (-) y de la curva exponencial (-.) generada por el SPSS. La curva exponencial es la más representativa. (T = 55°C; velocidad = 3.0 m/s). | 81 |
| Figura 30. | Humedad residual en función del tiempo (T = 50 °C, velocidad = 3.5 m/s).   | 83 |
| Figura 31. | Representación de los datos experimentales (0) y de la línea recta (-) generada por el SPSS. (T = 50 °C; velocidad = 3.5 m/s).   | 84 |
| Figura 32. | Representación de los datos experimentales (0), de la curva logarítmica (-) y de la curva exponencial (-.) generada por el SPSS. La curva exponencial es la más representativa. (T = 50°C; velocidad = 3.5 m/s). | 86 |
| Figura 33. | Humedad residual en función del tiempo (T = 55 °C, velocidad 2.5 m/s).   | 87 |
| Figura 34. | Representación de los datos experimentales (0) y de la línea recta (-) generada por el SPSS. (T = 55 °C; velocidad = 2.5 m/s).   | 89 |
| Figura 35. | Representación de los datos experimentales (0), de la curva logarítmica (-) y de la curva exponencial (-.) generada por el SPSS. La curva exponencial es la más representativa. (T = 55°C; velocidad = 2.5 m/s). | 90 |
| Figura 36. | Humedad residual en función del tiempo (T = 55 °C, velocidad = 3.0 m/s).   | 91 |
| Figura 37. | Representación de los datos experimentales (0) y de la línea recta (-) generada por el SPSS. (T = 55 °C; velocidad = 3.0 m/s).   | 91 |

- Figura 38. Representación de los datos experimentales (0), de la curva logarítmica (-) y 93  
de la curva exponencial (-.) generada por el SPSS. La curva exponencial es  
la más representativa. ( $T = 55^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.0 m/s).
- Figura 39. Humedad residual en función del tiempo ( $T = 55^{\circ}\text{C}$ , velocidad = 3.5 m/s). 95
- Figura 40. Representación de los datos experimentales (0) y de la línea recta (-) 91  
generada por el SPSS. ( $T = 55^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.5 m/s).
- Figura 41. Representación de los datos experimentales (0), de la curva logarítmica (-) y 98  
de la curva exponencial (-.) generada por el SPSS. La curva exponencial es  
la más representativa. ( $T = 55^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.5 m/s).

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| Fotografía 1.  | Rizomas de cúrcuma.  | 47 |
| Fotografía 2.  | Lavado manual de rizomas cúrcuma.  | 47 |
| Fotografía 3.  | Rizomas de cúrcuma recién lavado.  | 47 |
| Fotografía 4.  | Rodajas de cúrcuma después del deshidratado.                               | 47 |
| Fotografía 5.  | Escurrido de los rizomas de cúrcuma.                                       | 47 |
| Fotografía 6.  | Rodajas de cúrcuma.  | 47 |
| Fotografía 7.  | Vista frontal de la cámara de secado junto con la balanza de triple brazo. | 48 |
| Fotografía 8.  | Rodajas de cúrcuma después del secador.                                    | 48 |
| Fotografía 9.  | Rodajas de cúrcuma deshidrata en el desecador.                             | 48 |
| Fotografía 10. | Rodajas de cúrcuma para el molido.   | 48 |
| Fotografía 11. | Molido de rodajas de cúrcuma para la obtención de harina.                  | 48 |
| Fotografía 12. | Cúrcuma molida.  | 48 |
| Fotografía 13. | Tamiz de malla n°70 y 220 micrones.  | 49 |
| Fotografía 14. | Desinfectado del tamiz.  | 49 |
| Fotografía 15. | Tamizado de la cúrcuma molida para la obtención de harina.                 | 49 |
| Fotografía 16. | Envasado de la harina de cúrcuma.  | 49 |
| Fotografía 17. | Harina de cúrcuma envasada.  | 49 |
| Fotografía 18. | Almacenado de la harina de cúrcuma.  | 49 |
| Fotografía 19. | Deshidratado de cúrcuma.   | 50 |
| Fotografía 20. | Rodajas de cúrcuma para el deshidratado.                                   | 50 |

|                |   |    |
|----------------|---|----|
| Fotografía 21. | Secador de bandejas en el laboratorio de deshidratación.  | 50 |
| Fotografía 22. | Control de peso de rodajas de cúrcuma.  | 50 |
| Fotografía 23. | Anemómetro regulador de la velocidad de aire de secado.   | 50 |
| Fotografía 24. | Secado de rodajas de cúrcuma hasta su peso constante.   | 50 |
| Fotografía 25. | Muestra de la rodaja de cúrcuma y harina con una cámara digital SONY.   | 51 |
| Fotografía 26. | Harina de cúrcuma a una $T = 45^{\circ}\text{C}$ y velocidad de 2.5 m/s.  | 51 |
| Fotografía 27. | Cámara digital SONY de 21 Megapíxeles.  | 51 |
| Fotografía 28. | Segmentación de las imágenes mediante el programa Paint.  | 51 |
| Fotografía 29. | Obtención de los valores de las coordenadas $L^*a^*b^*$ mediante un algoritmo usado en el programa Matlab 17.0. | 51 |
| Fotografía 30. | Determinación de la humedad por el método de la estufa.   | 52 |
| Fotografía 31. | Determinación del Ph del rizoma de cúrcuma.   | 52 |
| Fotografía 32. | Filtrado de la muestra de rizoma de cúrcuma para determinar la acidez titulable.                                | 52 |
| Fotografía 33. | Enrase a una fiola de 250 ml con agua destilada.  | 52 |
| Fotografía 34. | Determinación de cenizas.   | 52 |
| Fotografía 35. | Resultados de análisis microbiológicos.   | 52 |



## RESUMEN

Se evaluó la cinética de secado de la cúrcuma (*Curcuma longa L.*) mediante visión computacional. Para ello se cortó el rizoma en rodajas, se colocaron en bandejas de un secador de aire caliente ensayándose tres temperaturas (45, 50 y 55 °C) y tres velocidades de aire (2.5, 3.0 y 3.5 m/s), aplicándose un diseño estadístico completamente al azar con arreglo factorial de 3Ax3B, con 3 repeticiones. Las muestras fueron molidas y tamizadas obteniendo harina, las cuales fueron analizadas el color mediante visión computacional. Los resultados determinaron que la mejor relación del color inicial, mediante las coordenadas L\*a\*b\* (L\*= 68.357, a\*= 44.418 y b\*= 72.734) y final (L\*= 77.754, a\*= 22.846 y b\*= 80.018), se obtienen trabajando en un secador de bandejas a 45 °C a una velocidad de 2.5 m/s, humedad crítica de 3.38 g agua/ g cúrcuma seca, humedad de equilibrio 0.33 g agua/g cúrcuma seca, tiempo crítico 50 minutos. El tiempo de secado fue 6 horas, la ecuación obtenida para línea recta es  $y = -0,028x + 4,771$  y para la parte logarítmica  $-1,607 \ln(x) + 9,781$  en base a  $R^2 = 0.999$ . Las características fisicoquímicas de la harina fueron: acidez 0,37 %, pH 6.5, cenizas 5%.

Palabras clave: cúrcuma, secado, visión computacional.

## ABSTRACT

The drying kinetics of turmeric (*Curcuma longa* L.) was evaluated by computational vision. For this, the rhizome was cut into slices, three temperatures (45, 50 and 55 °C) and three air velocities (2.5, 3.0 and 3.5 m/s) were placed on trays of a hot air dryer, applying a design completely random statistic with factorial arrangement of 3Ax3B, with 3 repetitions. The samples were ground and sieved to obtain flour, which were analyzed by computer vision. The results determined that the best ratio of the initial color, using the coordinates L\*a\*b\* (L\*= 68,357, a\*= 44,418 and b\*= 72,734) and final (L\*= 77,754, a\*= 22,846 y b\*= 80.018), are obtained by working in a tray dryer at 45 °C at a speed of 2.5 m/s, critical humidity of 3.38 g water/g dry turmeric, equilibrium humidity 0.33 g water/g dry turmeric, critical time 50 minutes. The drying time was 6 hours, the equation obtained for a straight line is  $y = -0.028x + 4,771$  and for the logarithmic part  $-1,607 \ln(x) + 9,781$  based on  $R^2 = 0.999$ . The physicochemical characteristics of the flour were: acidity 0.37%, pH 6.5, ash 5%.

Keywords: turmeric, drying, computational vision

## I. INTRODUCCIÓN

La cúrcuma (*Curcuma longa* L) se cultiva en China, India, Indonesia, Jamaica y Perú (Alvis & Arrazola, 2012), siendo Ayacucho y Cusco los departamentos productores (D´Arrigo, 2018). La cúrcuma como uno de los materiales naturales bioactivos, ha sido ampliamente utilizada por sus propiedades curativas, los efectos terapéuticos son relacionados con la presencia de diferentes compuestos curcuminoides (1,7 – bis (4-hidroxil-3-metoxifenil) -hepta-1,6-dieno-3,5-diona), demetoxi-curcumina (4-hidroxi-3-metoxicinamoil-(4-hidroxi-3-metoxicinamoilmetano) y curcumina bis-demetoxi (BDMC) (bis- (4-hidroxicinamoil) metano) (Gupta et al, 2011). También se ha utilizado como tratamiento medicinal para diversas afecciones como: enfermedad cardiovascular (Quin, 2017), diabetes (I.S.V, 2018), artritis (J. W., 2016), daño hepático (Farzaei, 2018) y neuroinflamación (Mishra, 2008).

El color es una de las características superficiales más importantes de los alimentos (Foca, Masino, Antonelli, & Ulrici, 2011; León, Mery, Pedreschi, & León, 2006). Esta característica es usada como un medio para juzgar la calidad de un producto (Kays, 1999), mediante características físicas como tamaño, forma, estado de maduración y ausencia de defectos visuales (López-García, et al., 2010; Omid, Khojastehnazhand, & Tabataeefar, 2010; Spreer, & Müller, 2011; Wu & Sun, 2013) siendo el color una de las características más importantes en la decisión final del consumidor.

El ojo humano tiene receptores de longitudes de onda conocidos como receptores azul, verde y rojo (Red, Green and Blue), por lo tanto se requieren tres parámetros para describir una sensación de un color específico. El método para asociar tres parámetros (o valores triestímulo) se denomina color. El XYZ fue el primer espacio de color que matemáticamente definió la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE) en 1931. El color de los alimentos se mide en  $L^*a^*b^*$ , o CIELab, que es una medición del color estándar establecido por la CIE;  $L^*$  es el valor que indica luminosidad, con rangos desde 0 (negro) a 100 (blanco), y los parámetros  $a^*$  (de

verde a rojo) y  $b^*$  (de azul a amarillo) componentes cromáticos con rangos de -120 a 120 (Papadakis et al, 2000; Segnini et al, 1999; Yam & Papadakis, 2004)

En la industria alimentaria existe la cuantificación del color que puede ser por evaluación visual, que es una técnica cualitativa realizada por paneles entrenados, la deficiencia que presenta este método se debe a que el resultado depende de la iluminación, tipo de luz y tamaño de la habitación, además que la percepción del color es subjetiva variando de un observador a otro (León et al, 2006; Meléndez-Martínez et al, 2005; Wu & Sun, 2013). Los sistemas de visión computacional (Computer Vision System) se han utilizado para medir el color de diferentes alimentos, ya que proporcionan algunas ventajas obvias sobre un colorímetro convencional, como la posibilidad de analizar cada píxel de toda la superficie del alimento y cuantificación de las características y defectos de la superficie (Brosnan & Sun, 2004; Du & Sun, 2004; León et al., 2006; Meléndez-Martínez et al, 2005). Se ha medido el color de muchos alimentos utilizando la técnica de visión por computadora (Papadakis et al., 2000), además en plátanos (Mendoza & Aguilera, 2006), papas fritas (Pedreschi et al., 2004; Scanlon et al., 1994; Segnini et al., 1999), carne de vaca (Larraín et al., 2008; Sun et al., 2011), carne de cerdo (Lu et al., 2000; Tan et al., 2001; O'Sullivan et al., 2003), pescado (Oliveira & Balaban, 2006; Yagiz et al., 2009; Quevedo et al., 2010), jugo de naranja (Fernández-Vásquez et al., 2011), vino (Martin et al., 2007), cerveza (Sun et al., 2004), trigo (Zapotocsny, 2010), etc.

Fernández (2005) capturó imágenes de manzana a través de una cámara. El sistema de visión computacional percibió el color como señales RGB luego se convirtieron en valores triestímulo XYZ y más tarde a las coordenadas de color CIE  $L^*a^*b^*$  utilizando un macro escrita en Matlab 6.5. Determinó que los cambios de color medidos por análisis de imagen dieron alta correlación promedio para los valores de las coordenadas de color  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  ( $R^2 = 0.91, 0.94$  y  $0.95$ , respectivamente). Los valores de luminosidad ( $L^*$ ) variaron entre 62 y 75. Este comportamiento poco claro, también reportado por (Krokida M. K., 2007) se atribuyó a error experimental. La variación de los valores experimentales para las coordenadas cromáticas  $a^*$  y  $b^*$  aumenta a medida que avanza el secado. Estos resultados fueron similares a los reportados por (Krokida M. K., 2008) el color de las manzanas fue medido con un colorímetro durante el secado al aire convencional. Concluyó que el secado produce cambios drásticos en la forma, el color y la textura de la imagen de las rodajas de manzana.

Hashim (2014) diseñó un secador de aire caliente convectivo más eficientes. Las calabazas utilizadas en este estudio fueron limpiadas, peladas y cortadas en cubos de 2 x 2 cm con diferentes espesores, es decir, 2 mm y 4 mm. Las muestras se secaron a 50, 60 y 70 °C durante 11 horas y la recolección de datos se realizó por cada intervalo de 1 hora. El estudio muestra el efecto de la temperatura del aire de secado en la reducción del contenido de humedad en función del tiempo con una disminución de 57.7 a 9.2% a 50 °C, 80.5 a 0.1% a 60 °C y 82.4 a 0.8% a 70 °C todo en base húmeda. Los resultados muestran que la humedad se redujo considerablemente con el aumento de la temperatura del aire. El tiempo de secado para alcanzar una relación de humedad de 0.15 para 50 °C fue de 300 min, mientras que 60 °C requirió 200 min. Y 70 °C requiere 170 minutos. Este comportamiento está de acuerdo con los hallazgos reportados en la literatura para el secado de algunas plantas medicinales y aromáticas, incluida la calabaza (Akpınar, 2007), menta (Lebert, 1992), té negro (Temple, 1999), hojas de laurel (Demir, 2004) y hojas de perejil (Doymaz, 2006).

Matiacevich (2011) estudió los indicadores de calidad de diferentes cultivares de arándano mediante visión computacional. El color se midió usando una escala CIEL\*a\*b\*. El color azul característico de los arándanos frescos no era uniforme en todos. El cv. Duke mostró los valores más bajos de L\*=60. Los valores de a\* estaban entre -8 y 6 y b\* estaba entre -13 y 6 para todos los cultivares; el análisis de imagen detectó cambios de color (a\* vs b\*) de azul a rojo y se ha dicho que el color rojo no es aceptable para los consumidores (Matiacevich et al, 2010). El estudio concluyó que el análisis de visión por computadora, basado en su simplicidad y bajo costo, demostró ser un herramienta útil para evaluar las propiedades ópticas de estas frutas como el color, los signos de deshidratación y el crecimiento de hongos.

Krokida (2001) estudió el efecto del secado en el color de los alimentos. Usando manzanas frescas, plátanos, zanahorias, y papas con métodos de secado de aire convencional, secado al vacío, pretratamiento con microondas más secado convencional, secado en frío y pretratamiento osmótico más secado convencional. Determinó que el parámetro L disminuyó significativamente para el secado convencional, vacío y microondas para plátanos, zanahorias y papas (L\*= 40) y los valores de a y b aumentaron significativamente (a\*= 7 y b\*= 20). Concluyó que el pretratamiento osmótico y secado a vacío producen productos con mejor características de color.

Odetunmibi (2017) trabajó con puré de yuca rayada a temperaturas de 40, 55, 70, 85, 100 °C y la velocidad de aire de 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3,0 m/s. Se observó que el tiempo de secado se reduce con el aumento de los niveles de temperatura. A la temperatura más baja nivel 40 °C, se observó que el tiempo promedio de secado más alto fue de 2 h: 57 min. Esto fue seguido por nivel de temperatura 55 °C con tiempo de secado promedio de 2 h: 22 min observados, luego a 70 °C, y el tiempo promedio de secado fue de 1 h: 47 min. En el siguiente nivel de temperatura que es 85 °C, el tiempo de secado fue de 1 h: 30 min. El nivel de temperatura más alto, que fue de 100 °C, el tiempo promedio de secado fue 1 h: 25 min; concluyó que tanto el tiempo de secado como la velocidad de secado depende del contenido de humedad inicial (deshidratación) del puré, la temperatura del secador, la velocidad del aire de la máquina

Carranza (2014) estudió la influencia de la cinética de secado en las características fisicoquímicas y sensoriales de un aditivo alimentario en polvo, obtenido a partir de la cúrcuma longa “azafrán” en estado fresco y cocido. Trabajó con tratamientos de 0, 30 y 60 minutos de cocción y secado en bandejas con aire a temperaturas de 50, 55 y 60°C y velocidad de aire de 2.5, 3.0 y 3,5 m/s, determinando que al incrementar la temperatura y velocidad del aire las muestras van perdiendo su color original, pierden su forma y la textura es más rugosa.

Barrena (2011) diseñó un secador de bandejas empleando los parámetros de la cinética de secado de lúcuma en rodajas de 0.3 cm de espesor, empleando aire a 50 °C y una velocidad de 3.5 m/s: tiempo crítico de secado de 40 minutos, humedad crítica de 0.48 g agua/g lúcuma seca, humedad de equilibrio de 0.04 g agua/g lúcuma seca y velocidad de 0.020 g agua/ g lúcuma seca.min.

Lakshmi (2018) comparó el color de muestras de cúrcuma negra (*Curcuma caesia*) frescas y muestras secadas en un secador solar y secadas a sol abierto, usó dos muestras de 200 g de cúrcuma negra y la colocó en el secador solar y a sol abierto, la humedad disminuyó de 73.4 a 8.5 %. Determinó que en el secado el color de rodajas fresca y secas disminuye la luminosidad (45.31 rodajas frescas, 40.35 secado solar y 35.92 a sol abierto) y b\* (15.24 rodaja fresca, 15.18 secado solar y 12.66 a sol abierto) e incrementa el valor de la coordenada cromática a\* (-1.87 muestra fresca, 1.54 secado solar y 1.98 a sol abierto). Concluyó que el secado a sol abierto afecta más la calidad del color que un secador solar y que el secador solar es definitivamente una mejor opción para secar productos agrícolas.

Monton (2019) estudió la cantidad de aceite volátil y cantidad de curcuminodes individuales y totales en el polvo de cúrcuma secada en diferentes condiciones de secado, 0-30 minutos en secado por convección y 20-60 minutos en microondas. Según el porcentaje de área cromatografía y espectrometría los compuestos en el aceite volátil fueron ar-turmerona (43–49%), turmerone (13–16%) y curlone (17–18%), respectivamente; resultados iguales a los de (Leela, 2002): ar-turmerone, curlone y turmerone fueron 31.1, 10.6 y 10%, respectivamente. Concluyó que el secado combinado por microondas por convección afectó la calidad de las composiciones de aceites volátiles y la cantidad de curcuminoides de materia prima de la cúrcuma.

Para efectos de la presente investigación (Ocón, 1980; Perry y Chilton, 1982 y Geankopolis) definen los términos empleados para describir el contenido de humedad de las sustancias.

**Contenido de humedad en base seca**, es la que expresa la humedad de un material como porcentaje del peso de sólido seco. Se define como:

$$Y_s = [(masa\ sólida\ a\ secar - masa\ sólido\ seco) / masa\ sólido\ seco] \times 100$$

**Contenido de humedad en equilibrio ( $Y_{eq}$ )**, es la humedad límite a la cual un material dado se puede secar, en condiciones específicas de temperatura y humedad del aire.

**Contenido de humedad crítica ( $Y_c$ )**, es el contenido de humedad promedio cuando concluye el periodo de velocidad constante.

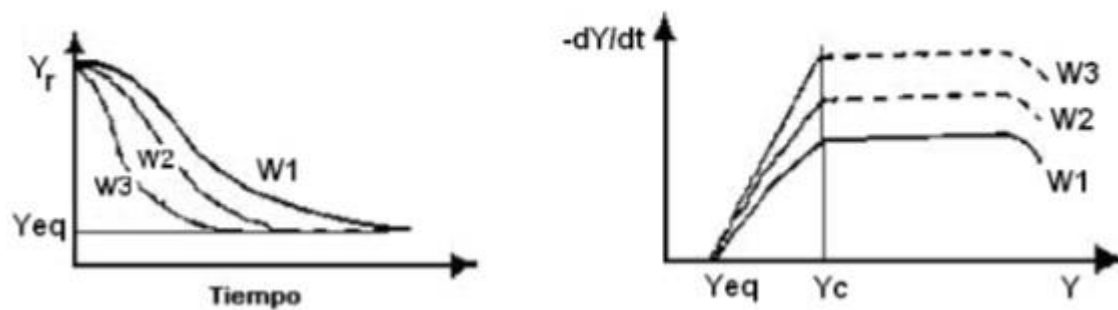
**Contenido de humedad libre ( $Y_l$ ) o humedad residual ( $Y_r$ )**, es el líquido que se puede separar a una temperatura y humedad dadas. Este valor llega a incluir tanto la humedad ocluida como la no ocluida (retenida). Si  $m$  es el peso del sólido húmedo (agua más sólido seco) en kilogramos y  $S$  es el peso del sólido seco en Kg:  $Y_r = (m-S) / S$

**Periodo de velocidad constante**, es el tiempo de secado durante el cual la velocidad de eliminación de agua por unidad de superficie es constante o uniforme.

**Periodo de velocidad decreciente**, es el tiempo de secado durante el cual la velocidad instantánea de secado disminuye en forma continua.

Así mismo para reducir el contenido de humedad de diversos materiales, se debe de evaluar experimentalmente las diferentes condiciones de velocidad y temperatura del aire empleado, y el tiempo requerido para lograr el grado de secado deseado. Las mediciones de velocidad de secado por lotes se obtienen a partir de datos experimentales y proporcionan mucha información por lotes y también para la continua (Ocón y Tojo, 1980).

Por otro lado, la velocidad del aire de secado ( $W$ ) influye sobre esta operación. A mayor velocidad, menor tiempo de secado; sin embargo, para una muestra dada, a cualquier velocidad del aire, manteniendo su temperatura constante, humedad crítica ( $Y_c$ ) y la humedad de equilibrio ( $Y_{eq}$ ) no variarán (Vernom, 2000). (Figura 1)



**Figura 1.** Influencia de la velocidad de la ( $W$ ) sobre la operación de secado, a temperatura constante  $W3 > W2 > W1$ . Fuente: Vernom, 2000

Un secador de bandejas es un equipo totalmente cerrado y aislado en el cual los sólidos se colocan sobre bandejas perforadas o de malla metálica. La transmisión de calor es directa del aire a los sólidos, utilizando la circulación de grandes volúmenes de aire caliente (Perry y Chilton, 1982). El funcionamiento satisfactorio de los secadores de bandejas depende de mantener una temperatura constante y una velocidad de aire uniforme sobre todo el material que se esté secando. Conviene tener una circulación de aire con velocidades de 1 a 10 m/s para mejorar el coeficiente de transferencia de calor en la superficie con el propósito de eliminar bolsas de aire estancado (Vernom, 2000 y Perry y Chilton, 1982).

Los productores no cuentan con información de procesos de transformación de la cúrcuma (*Curcuma longa* L.), tienen bajo interés en la mejora de los procesos de cosecha y postcosecha, inclusive en su producción, y desconocimiento de aplicación de tecnologías para el mejor



aprovechamiento del producto transformado, por lo que no se le brinda el valor agregado que debería de tener esta planta, limitándose solo a su cosecha y procesamiento artesanal como condimento o sazónador de comida y en otros casos a su venta.

El aprovechamiento de la cúrcuma (*C. longa*) a nivel industrial tecnológico es escaso. La mejora del producto llevada a procesos de transformación como secado permitirá que el producto tenga el valor comparable al de un producto de alta calidad nutricional. Por su importante fuente de nutrientes, y capacidad anticancerígena, se debería considerar en la dieta básica del consumidor. La conservación de cúrcuma a través del deshidratado, permitirá el mejor aprovechamiento de esta planta para dejar de ser un cultivo secundario en los agricultores ya que se asegura su vida útil y por el proceso de deshidratación se genera una alternativa para darle mayor valor agregado.

Bajo este contexto, se desarrolló el presente estudio, planteándose los objetivos: a) identificar los parámetros óptimos de la cinética de secado, b) analizar los parámetros físicoquímicos, microbiológicos y organolépticos de la harina de cúrcuma, y c) evaluar la propiedad física del color de los tratamientos de la harina de cúrcuma.

## **II. OBJETIVOS**

### **2.1 . General**

Evaluar la cinética de secado mediante visión computacional.

### **2.2 . Específicos**

- ❖ Identificar los parámetros óptimos de la cinética de secado.
- ❖ Analizar los parámetros fisicoquímicos; microbiológicos y organolépticos de la harina de cúrcuma.
- ❖ Evaluar la propiedad física del color de los tratamientos de la cinética de secado mediante visión computacional.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Materia prima

Rizomas de cúrcuma (*C. longa*) en estado de madurez fisiológica provenientes del distrito de San José de Lourdes, provincia de San Ignacio, región Cajamarca.

#### 3.2 Materiales y equipos

- ❖ Ph-metro
- ❖ Equipo de titulación
- ❖ Secador de bandejas
- ❖ Anemómetro digital
- ❖ Balanza digital
- ❖ Balanza analítica
- ❖ Balanza de triple brazo
- ❖ Equipo de cómputo
- ❖ Cámara digital Sony 21 Megapíxeles
- ❖ Estufa
- ❖ Mufla
- ❖ Tamiz n° 70 de malla 220 micrones
- ❖ Placas Petri
- ❖ Bandejas de malla metálica
- ❖ Pipetas
- ❖ Equipo experimental
- ❖ Fiola

El secador de bandejas en la parte izquierda tiene un ventilador que genera una corriente de aire caliente, 4 resistencias de 1000 W cada una, un soporte para las tres bandejas de malla metálica.



**Figura 2.** Secador de bandejas

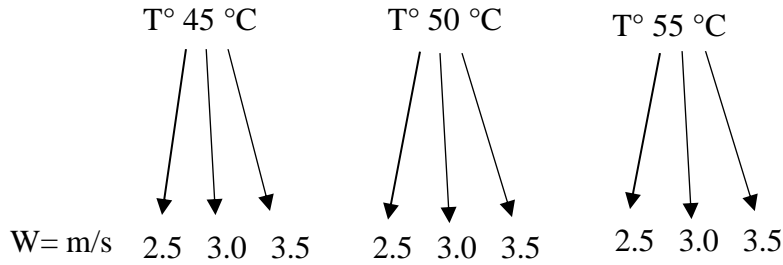
El aire es conducido a la cámara de secado el cual es calentado por las resistencias eléctricas de 1000 W cada una. Se trabajó las temperaturas de temperaturas (45, 50 y 55 °C), las cuales fueron controlados a través de una caja de control que consta de un sensor de temperatura lo que permitió regular y estabilizar las temperaturas.

La cámara de secado consta de tres bandejas con malla metálica cargadas con rodajas de cúrcuma; estuvieron sostenidas en el soporte (SB) que se colgó de una balanza de triple brazo ubicada encima de la cámara de secado, con la cual se midió la masa del soporte, bandejas y rodajas de cúrcuma cada 5 minutos ( $P_1$ ) desde el inicio del secado (tiempo cero) hasta el final (410 minutos aproximadamente), en la cual se redujo la humedad de las rodajas hasta su humedad de equilibrio. Al concluir este tiempo se dispuso las rodajas de cúrcuma seca en placas Petri y se llevó a la estufa a las mismas temperaturas de trabajo (45, 50 y 55°C) para secarlas hasta su peso constante y determinar el peso seco (S).

### **3.3 Procedimiento experimental**

#### **3.3.1 Cinética de secado de la cúrcuma**

En la investigación se emplearon tres temperaturas (45, 50 y 55 °C) de aire y tres velocidades del aire: 2,5 m/s, 3,0 m/s y 3,5 m/s. Al inicio de cada corrida experimental se verificó la temperatura y la velocidad del aire. Enseguida, se pesó el soporte junto con las tres bandejas metálica (SB). Para cada temperatura – velocidad del aire, se realizaron pruebas por triplicado.



**Figura 3.** Plan experimental, para cada temperatura se controlaron tres velocidades de aire de secado.

El peso de las rodajas de cúrcuma cada 5 minutos ( $t$ ) se calculó con la siguiente fórmula:  $P_2 = P_1 - SB$

Para calcular la humedad residual de las rodajas de cúrcuma cada 5 minutos se empleó la siguiente fórmula:  $Y = (P_2 - S)/S$

La variación de la humedad con el tiempo ( $-Dy/dt$ ) se calculó con la siguiente fórmula:  
 $-Dy/dt = (Y_i - Y_{i+1})/(t_i - t_{i+1})$

Para calcular la humedad residual promedio ( $Y_m$ ) se empleó la siguiente fórmula:  $Y_m = (Y_i + Y_{i+1})/2$  (ver tablas de los Anexos)

Al inicio del secado, la muestra se coloca en la cámara del secador a una temperatura menor a la de esta cámara; debido a ello, los datos iniciales tienden a generar una curva por lo que se desprecian, los siguientes datos recién se ajustan a una recta y son los que interesan. A esta primera etapa del secado se le denomina periodo de inducción donde se produce un calentamiento del producto, adaptándose el material a las condiciones del secado y dado que su duración es muy corta con respecto al tiempo total de secado, no se toma en cuenta para el diseño de secadores industriales. (Ibarz, 2000)

Las características que muestran las curvas de secado, cuando se grafica la humedad residual vs tiempo, son una sección recta que corresponde a la etapa de secado a velocidad constante y una sección curva que corresponde a la etapa de secado a velocidad decreciente. Cuando termina la sección recta y se inicia la curva, se lee en la

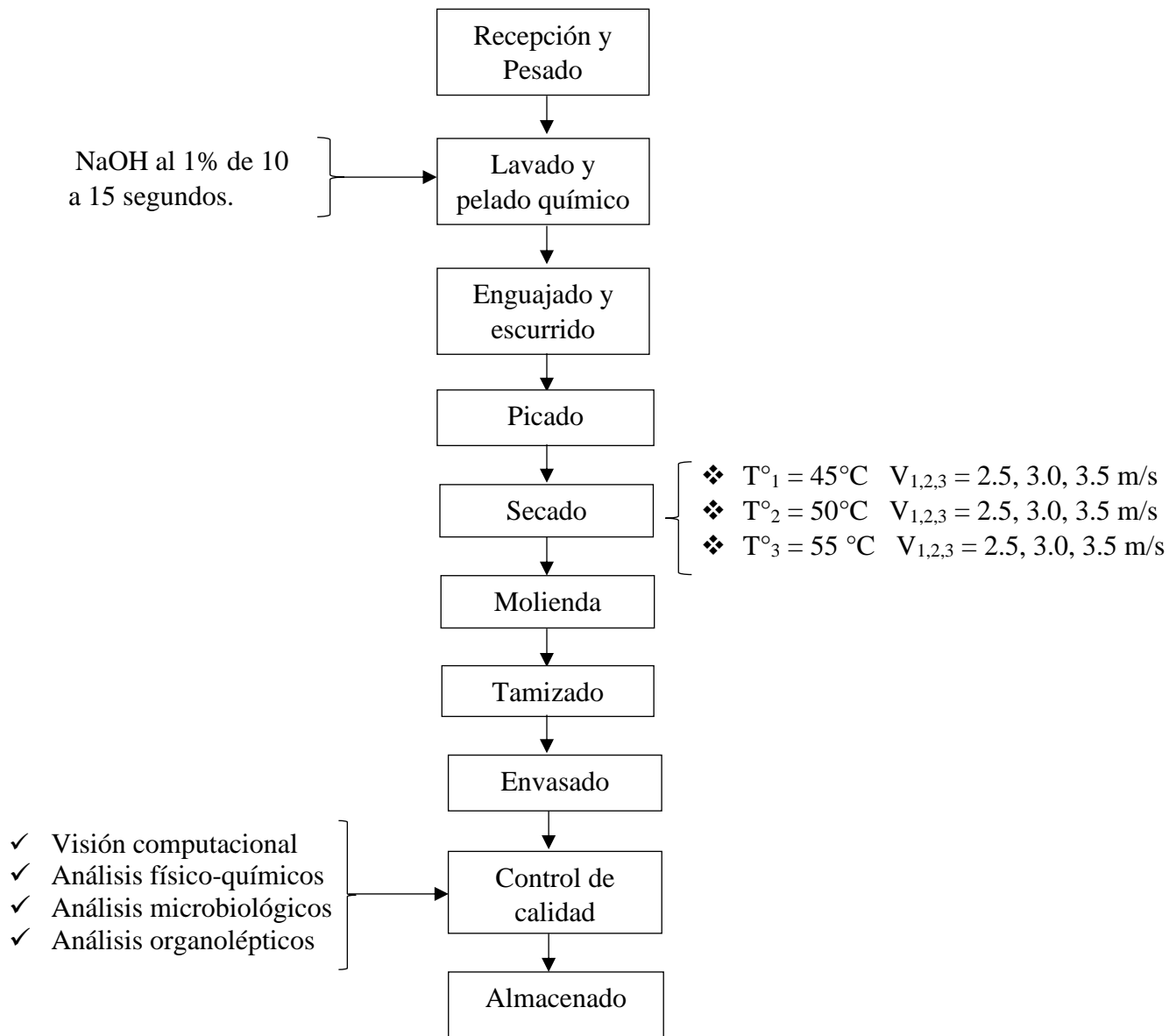
gráfica el tiempo crítico ( $T_c$ ) y la humedad crítica ( $Y_c$ ). Al final la curva tiene un comportamiento asintótico con el eje de las abscisas (tiempo) y permite leer en la gráfica la humedad de equilibrio ( $Y_{eq}$ ). (Barrena, 2011)

### **3.3.2 Selección y acondicionamiento de la materia prima**

A los rizomas de cúrcuma en su estado de madurez fisiológica, los cuales se les realizó un pelado químico, para retirar la cáscara. Antes de llevarlo al secador de bandejas se midió Ph, acidez y humedad, a los rizomas frescos, luego fueron cortados en rodajas, se colocaron ordenadamente en cada bandeja de malla metálica del secador con flujo de aire caliente. El aire es conducido a la cámara de secado a través de un ducto en el cual es calentado por las resistencias eléctricas de 1000 W a temperaturas de trabajo (45, 50 y 55 °C), el cual es controlado a través de una caja de control que consta de un sensor de temperatura en la cámara de secado lo que permitió regular y estabilizar las temperaturas.

### **3.3.3 Obtención de harina de cúrcuma**

Se sacó la muestra seca de la estufa y se procedió a moler en un molino manual reduciendo a partes pequeñas obteniendo la harina de cúrcuma, luego se tamizó en el tamiz n° 70, malla 220 micrones del laboratorio y se realizó el control de calidad mediante análisis fisicoquímico, microbiológico, organoléptico y visión computacional, se procedió al envasado en frascos de vidrio y se almacenó en ambientes secos.



**Figura 4.** Flujograma para la obtención de harina de cúrcuma.

### 3.3.4 Análisis fisicoquímico de la harina de cúrcuma

#### ❖ Determinación de acidez total

- Método: Titulación (A.O.A.C. 11.042/84.962.12/90)
- Fundamento: Los ácidos presentes en la muestra son neutralizados con una solución alcalina estandarizada (NaOH) y utilizando un indicador como la fenolftaleína.

Se pesó 10 g de muestra, luego se trituró en un mortero de porcelana, se diluyó en una fiola de 250 mL y se enrazó con agua destilada, se agitó y se filtró. Posteriormente se succionó 25 mL en 3 matraces Erlen Meyer, luego se midió 25 mL de agua destilada en una probeta y se añade a tres matraces. Añadimos tres gotas de fenolftaleína y finalmente se titula hasta el viraje del color.

#### ❖ **Determinación del pH**

- Método: Potenciométrico (AOAC 981.12, 2005)
- Fundamento: Medición electrométrica de la actividad de los iones hidrogeno presentes en la muestra mediante un aparato medidor de pH previamente calibrado con Buffer de pH 4, 7 y 10.

Se pesó 5 g de muestra, se trituró en mortero de porcelana y finalmente se llevó al potenciómetro.

#### ❖ **Determinación de cenizas**

- Método: gravimétrico, siguiendo el método de la NTP 208.015:2015.

Se realizó el análisis por triplicado, reportándose el promedio de las tres mediciones, referido al porcentaje (100 g de muestra inicial). Se pesó 1 g de muestra original de harina de cúrcuma en un crisol previamente pesado. Posteriormente el crisol con la muestra fue colocado en la mufla a una temperatura de 150 °C y 10 minutos, 250 °C por 20 minutos, 450 °C por 10 minutos, 650 °C por 30 minutos y 800 °C por 3 horas. Al terminar se verificó que el contenido del crisol sea solo cenizas (muestra color blanco) para luego colocarla en un desecador por unos minutos, tras lo cual se efectuó la medición de su peso.

#### ❖ **Determinación de humedad**

- Método: gravimétrico

Se pesó la placa Petri vacía y se anotó el peso, luego se pesó 5 – 10 g de muestra y se llevó a la estufa a 105 °C por 2 horas. Después de las dos horas se retira una placa y se deja un desecador hasta enfriar para registrar su peso y se registra. Se volvió a dejar la placa Petri en el desecador. Después de 1 hora se retiró nuevamente la misma placa y se dejó enfriar, se pesó y se anotó el peso.



Posteriormente se volvió a dejar en la estufa y se controló 30 minutos. Finalmente se registró el último peso (peso constante) y se determinó el porcentaje de humedad.

### **3.3.5 Análisis microbiológicos**

#### **❖ Determinación de mohos y levaduras**

Se realizó el análisis de la muestra de harina de cúrcuma. Se eligió el mejor tratamiento expuesto al ambiente. A la muestra analizada (harina de cúrcuma) se le realizó el recuento en placa en profundidad de recuento en mohos/levaduras de acuerdo con las metodologías descritas por las entidades de regulación nacional (MINSA).

Para la evaluación de los mohos y levaduras se, esterilizó las placas y pipetas en la estufa, luego se pesó el agar papa glucosado y agar peptona, se mezcló con agua destilada en un matraz de 100 ml posteriormente, se puso a una cocina eléctrica hasta hervir, luego se tapó con un algodón para llevarlo a la autoclave por una hora, después que terminó se enfrió con agua.

Se pesó 10 g de muestra de harina y se mezcló con el caldo peptona. Luego se pipetea con la propipeta un 1 ml de la muestra se le agregó los 9 ml de caldo peptona. Se usó el método de siembra en profundidad que consiste en añadir medio de cultivo fundido y enfriado a 50 °C sobre Placa de Petri que contiene una cantidad determinada de la muestra diluida. Cuando el agar se solidifica se incuban las placas. Las colonias se desarrollan tanto dentro del Agar como en la superficie del medio; se dejó en lugar oscuro a temperatura ambiente por 48 horas. Finalmente se realizó el recuento de colonias tanto para mohos y levaduras en el contador de colonias.

### **3.3.6 Análisis organoléptico**

Se evaluó el color, textura y color de la harina de cúrcuma con 15 panelistas semientrenados constituidos por egresados de la carrera profesional de ingeniería de industrias alimentarias de la UNJ, para ello se utilizó una escala hedónica. (ver anexos)

### 3.3.7 Análisis mediante visión computacional

- ❖ Método: Modelo de color CIELAB
- ❖ Fundamento: El modelo  $L^*a^*b^*$  determina el color de acuerdo a la posición en el espacio en tres dimensiones (3D) (Noor, 2012), el componente L corresponde a la luminosidad del color (L=0 significa negro, L=100 significa blanco),  $a^*$  es el croma donde los valores positivos corresponden a rojo y los negativos al color verde,  $b^*$  es el componente donde los valores positivos corresponden a amarillo y aquellos valores negativos corresponden a azul,  $a^*$  y  $b^*$  son los dos componentes cromáticos cuyos valores van desde -120 a 120. (León, 2006)

El análisis de visión computacional se realizó a la cúrcuma fresca (rizoma) y a las harinas obtenidas de cada tratamiento para la cual se calibro la cámara Sony de 21 MP (4:3) en una cámara cerrada de color negro con una cinta de código de colores, las fotos obtenidas fueron procesadas en una computadora Toshiba al programa 16aint para su segmentación. Se guardó la imagen en formato JPEG para su análisis. Luego se introdujo un algoritmo (Ver anexo 6) en el programa MatLab 17.0 para determinar los valores numéricos de las coordenadas  $L^*a^*b^*$ . Seguidamente se compararon los valores  $L^*a^*b^*$  de las harinas de cúrcuma con los valores  $L^*a^*b^*$  de una rodaja del lote de rizomas frescos mediante análisis estadísticos para determinar que harina presenta similares valores para las coordenadas  $L^*a^*b^*$  de la rodaja de cúrcuma fresca para definirla como la más óptima.

### 3.3.8 Diseño estadístico

Se utilizó el diseño estadístico Completamente al Azar (DCA) con arreglo factorial de  $3A \times 3B$  con 9 tratamientos y 3 repeticiones, las variables estudiadas son las siguientes (ver Tabla 1):

- ❖ Variables independientes.
  - Temperatura: 45, 50 y 55 °C
  - Velocidad: 2.5, 3.0 y 3.5 m/s
- ❖ Variables dependientes.
  - Humedad de la harina de cúrcuma.
  - Color de la harina de cúrcuma.

Tabla 1  
*Descripción de los nueve tratamientos y sus variables.*

| Tratamiento |        |             |           |
|-------------|--------|-------------|-----------|
| N°          | Código | Temperatura | Velocidad |
| T1          | T1V1   | 45 °C       | 2.5 m/s   |
| T2          | T1V2   | 45 °C       | 3.0 m/s   |
| T3          | T1V3   | 45 °C       | 3.5 m/s   |
| T4          | T2V1   | 50 °C       | 2.5 m/s   |
| T5          | T2V2   | 50 °C       | 3.0 m/s   |
| T6          | T2V3   | 50 °C       | 3.5 m/s   |
| T7          | T3V1   | 55 °C       | 2.5 m/s   |
| T8          | T3V2   | 55 °C       | 3.0 m/s   |
| T9          | T3V3   | 55 °C       | 3.5 m/s   |

T1 = Temperatura 45 °C  
T2 = Temperatura 50 °C  
T3 = Temperatura 55 °C

---

V1 = Velocidad 2.5 m/s  
V2 = Velocidad 3.0 m/s  
V3 = Velocidad 3.5 m/s

### 3.3.9 Análisis estadístico

Se realizó el ANVA de los datos de la regresión lineal y regresión logarítmica o exponencial de cada tratamiento y datos de la prueba organoléptica, usando el software estadístico IBM SPSS Statistics 25

## IV. RESULTADOS

### 4.1 Características de la cúrcuma

Los análisis del rizoma fresco se reportan en la tabla 2.

Tabla 2  
*Análisis fisicoquímico de los rizomas frescos de cúrcuma.*

| Acidez (%) | pH   | % Humedad | Humedad en base húmeda |
|------------|------|-----------|------------------------|
| 0.47       | 6.53 | 82        | 0.82                   |

### 4.2 Cinética de secado de cúrcuma

Los resultados del secado de rodajas de cúrcuma a 45 °C y velocidades de 2.5, 3.0 y 3.5 m/s se muestran en la figura 5 (Datos experimentales en Anexos 8, 9 y 10); donde se determinó que la humedad crítica ( $Y_c$ ) es de 3,38 g agua/g de cúrcuma seca y la humedad de equilibrio ( $Y_{eq}$ ) es 0,33 g agua/g de cúrcuma seca; estos datos se mantuvieron iguales durante las tres velocidades después de haber alternado las velocidades de trabajo y a temperatura constante. Existe una variación en el tiempo crítico ( $T_c$ ) de secado donde las dos primeras velocidades (2,5 y 3,0 m/s) son diferentes de la velocidad 3,5 m/s demostrando que a medida que aumenta la velocidad de secado el tiempo crítico disminuye.

Tabla 3

*Datos experimentales del secado de cúrcuma a 45 °C y a una velocidad de 2.5 m/s*

|    | T            | P <sub>1</sub>                            | P <sub>2</sub> =P <sub>1</sub> -SB | (P <sub>2</sub> -S)/S                      |                                     |                              |
|----|--------------|---|------------------------------------|--|-------------------------------------|------------------------------|
| N° | Tiempo (min) | Peso estructura + cúrcuma al tiempo t (g) | Peso rodajas al tiempo t (g)       | Humedad residual (g agua / g cúrcuma seca) | Dy/dt (g agua / g cúrcuma seca.min) | Ym (g agua / g cúrcuma seca) |
| 1  | 0            | 1835.7                                    | 822.7                              | 4.79                                       | 0.032                               | 4.63                         |
| 3  | 10           | 1789.9                                    | 776.9                              | 4.47                                       | 0.026                               | 4.34                         |
| 5  | 20           | 1753.2                                    | 740.2                              | 4.21                                       | 0.027                               | 4.08                         |
| 7  | 30           | 1715.5                                    | 702.5                              | 3.95                                       | 0.027                               | 3.81                         |
| 9  | 40           | 1677.1                                    | 664.1                              | 3.68                                       | 0.029                               | 3.53                         |
| 11 | 50           | 1635.6                                    | 622.6                              | 3.38                                       | 0.014                               | 3.31                         |
| 13 | 60           | 1615.5                                    | 602.5                              | 3.24                                       | 0.023                               | 3.12                         |
| 15 | 70           | 1582.2                                    | 569.2                              | 3.01                                       | 0.019                               | 2.91                         |
| 17 | 80           | 1555.8                                    | 542.8                              | 2.82                                       | 0.019                               | 2.73                         |
| 19 | 90           | 1528.7                                    | 515.7                              | 2.63                                       | 0.018                               | 2.54                         |
| 21 | 100          | 1503.5                                    | 490.5                              | 2.45                                       | 0.022                               | 2.34                         |
| 23 | 110          | 1472.5                                    | 459.5                              | 2.24                                       | 0.013                               | 2.17                         |
| 25 | 120          | 1453.5                                    | 440.5                              | 2.10                                       | 0.011                               | 2.05                         |
| 27 | 130          | 1437.6                                    | 424.6                              | 1.99                                       | 0.016                               | 1.91                         |
| 29 | 140          | 1415.0                                    | 402.0                              | 1.83                                       | 0.014                               | 1.76                         |
| 31 | 150          | 1395.5                                    | 382.5                              | 1.69                                       | 0.007                               | 1.66                         |
| 33 | 160          | 1385.1                                    | 372.1                              | 1.62                                       | 0.015                               | 1.54                         |
| 35 | 170          | 1363.7                                    | 350.7                              | 1.47                                       | 0.011                               | 1.41                         |
| 37 | 180          | 1348.2                                    | 335.2                              | 1.36                                       | 0.009                               | 1.32                         |
| 39 | 190          | 1336.1                                    | 323.1                              | 1.27                                       | 0.011                               | 1.22                         |
| 41 | 200          | 1320.6                                    | 307.6                              | 1.17                                       | 0.008                               | 1.13                         |
| 43 | 210          | 1309.4                                    | 296.4                              | 1.09                                       | 0.006                               | 1.06                         |
| 45 | 220          | 1300.6                                    | 287.6                              | 1.02                                       | 0.007                               | 0.99                         |
| 47 | 230          | 1290.0                                    | 277.0                              | 0.95                                       | 0.007                               | 0.91                         |
| 49 | 240          | 1280.0                                    | 267.0                              | 0.88                                       | 0.006                               | 0.85                         |
| 51 | 250          | 1271.6                                    | 258.6                              | 0.82                                       | 0.006                               | 0.79                         |
| 53 | 260          | 1263.7                                    | 250.7                              | 0.76                                       | 0.005                               | 0.74                         |
| 55 | 270          | 1256.6                                    | 243.6                              | 0.72                                       | 0.005                               | 0.69                         |
| 57 | 280          | 1250.1                                    | 237.1                              | 0.67                                       | 0.005                               | 0.64                         |
| 59 | 290          | 1243.2                                    | 230.2                              | 0.62                                       | 0.003                               | 0.60                         |
| 61 | 300          | 1238.7                                    | 225.7                              | 0.59                                       | 0.005                               | 0.57                         |
| 63 | 310          | 1231.9                                    | 218.9                              | 0.54                                       | 0.003                               | 0.53                         |
| 65 | 320          | 1227.5                                    | 214.5                              | 0.51                                       | 0.003                               | 0.49                         |
| 67 | 330          | 1223.1                                    | 210.1                              | 0.48                                       | 0.003                               | 0.46                         |

|    |     |        |       |      |       |      |
|----|-----|--------|-------|------|-------|------|
| 69 | 340 | 1219.0 | 206.0 | 0.45 | 0.002 | 0.44 |
| 71 | 350 | 1215.8 | 202.8 | 0.43 | 0.003 | 0.41 |
| 73 | 360 | 1211.0 | 198.0 | 0.39 | 0.003 | 0.38 |
| 75 | 370 | 1207.3 | 194.3 | 0.37 | 0.002 | 0.36 |
| 77 | 380 | 1204.5 | 191.5 | 0.35 | 0.002 | 0.34 |
| 79 | 390 | 1201.6 | 188.6 | 0.33 | 0.001 | 0.32 |
| 81 | 400 | 1200.0 | 187.0 | 0.32 | 0.032 | 0.16 |

SB = 1013 S = 142,04

A continuación, se presentan las curvas en una sola figura para observar la diferencia entre ellas; la humedad crítica y la humedad de equilibrio se mantienen constantes a diferencia del tiempo crítico que disminuye al aumentar la velocidad de secado.

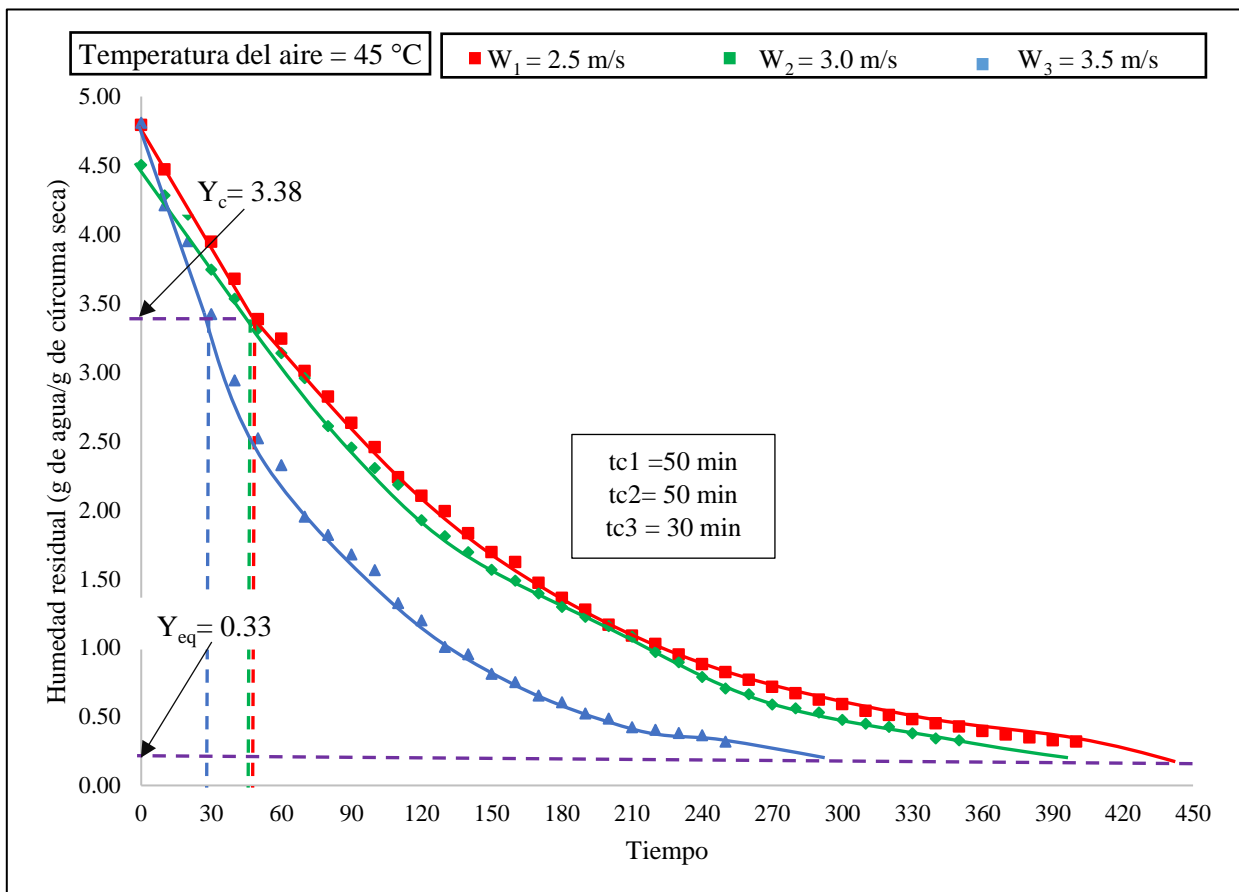
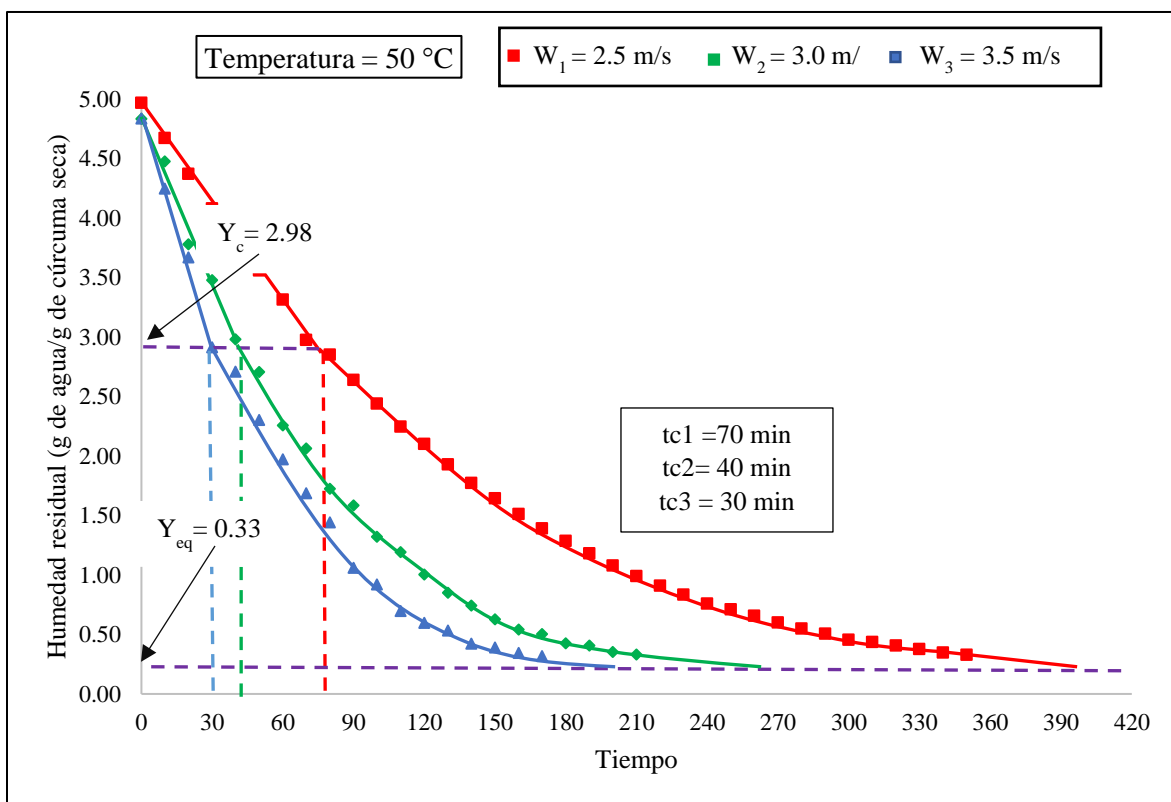


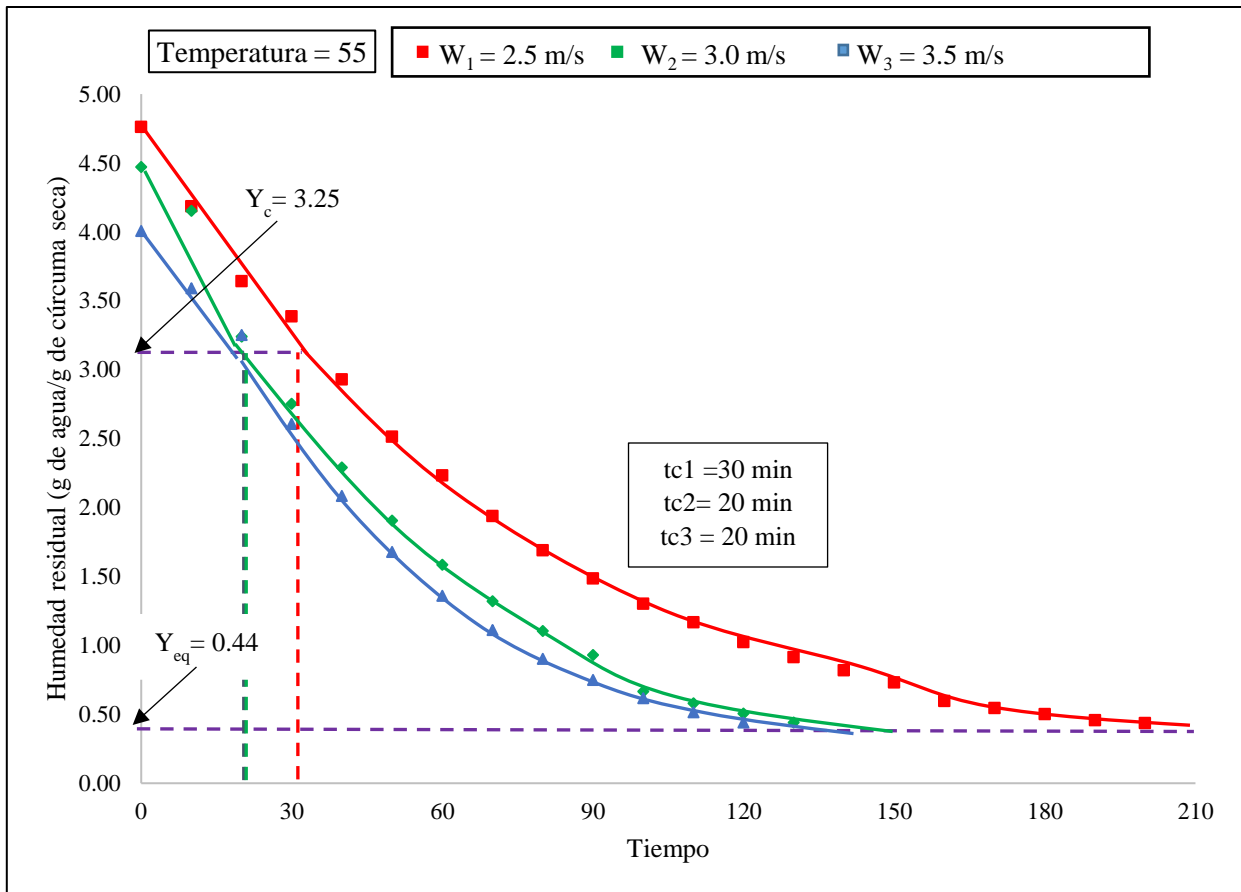
Figura 5. Humedad residual en función del tiempo ( $T = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ , velocidades de 2.5, 3.0 y 3.5 m/s).

Los resultados de secado de rodajas de cúrcuma a 50 °C y velocidades de 2.5, 3.0 y 3.5 m/s que se muestran en la figura 6 donde se aprecia la misma tendencia que la figura 5, pero la humedad crítica es de 2,98 g agua/g cúrcuma seca y la humedad de equilibrio 0,33 g de agua/g de cúrcuma seca



**Figura 6.** Humedad residual en función del tiempo ( $T = 50 \text{ °C}$ , velocidades 2.5, 3.0 y 3.5 m/s).

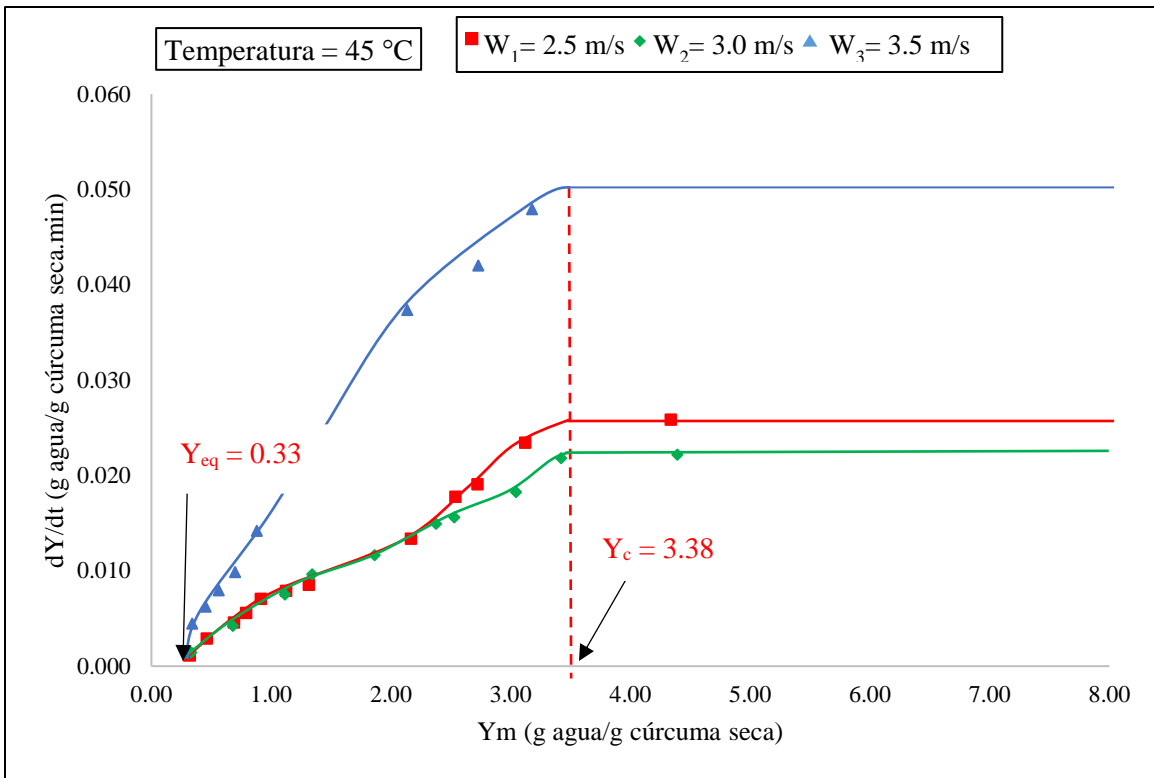
Los resultados de secado de rodajas de cúrcuma a 55 °C y velocidades de 2.5, 3.0 y 3.5 m/s en la figura 7, el secado se aprecia con la misma tendencia que las dos temperaturas anteriores, la diferencia es que esta temperatura presenta una humedad crítica de 3,25 g agua/g cúrcuma seca y una humedad de equilibrio de 0,44 g agua/g cúrcuma seca.



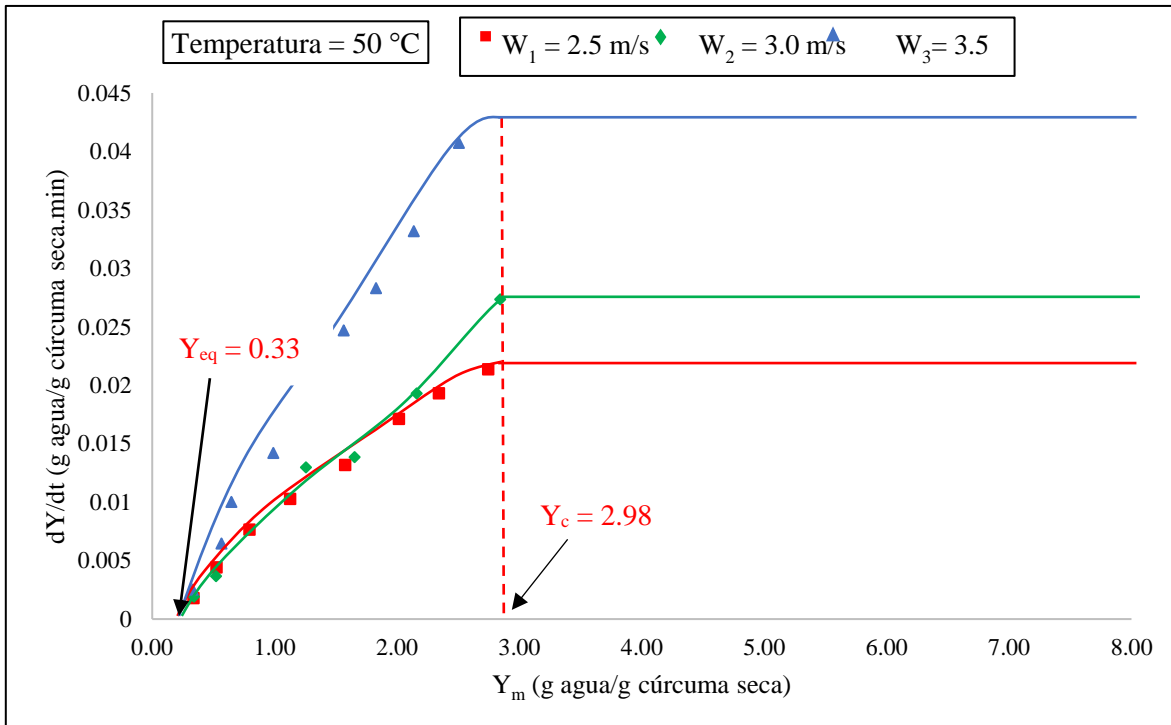
**Figura 7.** Humedad residual en función del tiempo ( $T = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ , velocidades de 2.5, 3.0 y 3.5 m/s).

Las Figuras 8, 9 y 10 muestran la velocidad de secado ( $Dy/dt$ ) vs humedad residual promedio ( $Y_m$ ), para las temperaturas de trabajo; nótese que los parámetros cinéticos como tiempo crítico, humedad crítica y humedad de equilibrio concuerdan con los de las Figuras 5, 6 y 7.

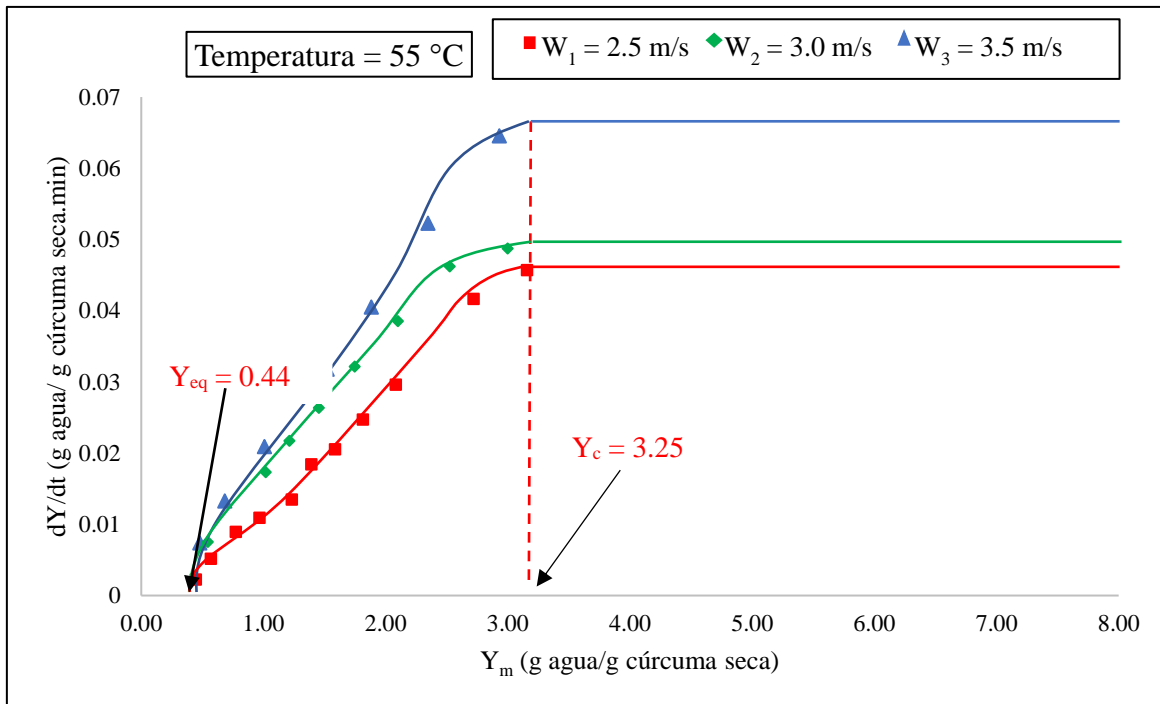




**Figura 8.** Variación de la humedad con el tiempo en función de la humedad residual promedio ( $T = 45^\circ\text{C}$ , velocidades 2.5, 3.0 y 3.5 m/s).



**Figura 9.** Variación de la humedad con el tiempo en función de la humedad residual promedio ( $T = 50^\circ\text{C}$ , velocidades 2.5, 3.0 y 3.5 m/s).



**Figura 10.** Variación de la humedad con el tiempo en función de la humedad residual promedio ( $T= 55$  °C, velocidades 2.5, 3.0 y 3.5 m/s).

En las Figuras 5, 6 y 7, el tramo horizontal de las gráficas es el periodo de velocidad constante del secado. En este periodo la superficie del sólido está saturada con agua.

Teniendo en cuenta la semejanza del color de las rodajas de cúrcuma en estado natural con el de la harina de cúrcuma obtenida experimentalmente, se debe trabajar con una temperatura de  $45$  °C y velocidad de  $2.5$  m/s; bajo estas condiciones del aire, el tiempo crítico de secado ( $T_c$ ) fue de 50 minutos (Figura 5), la humedad crítica ( $Y_c$ ) de  $3.8$  g agua/g cúrcuma seca, la humedad de equilibrio ( $Y_{eq}$ ) de  $0,33$  g agua/g cúrcuma seca. Los valores de  $L^*= 77.755$ ,  $a^*= 22.846$  y  $b^*= 80.019$  son los que más se aproximan a los valores de las coordenadas de la rodaja de cúrcuma fresca ( $L^*= 68.358$ ,  $a^*= 44.418$  y  $b^*= 72.734$ ) en comparación con las demás harinas de cúrcuma deshidratada (ver Figura 8).

### 4.3 Modelamiento matemático de la cinética de secado de cúrcuma

En la Tabla 4 se muestran las ecuaciones, las que representan el modelo matemático de la cinética del secado de cúrcuma para cada una de las temperaturas y velocidades experimentalmente trabajadas.

Tabla 4

*Ecuaciones correspondientes a la parte recta y a la parte curva de cada una de las gráficas experimentales analizadas con el software SPSS y sus parámetros cinéticos (Anexos).*

| Temperatura del aire (°C) | Velocidad del aire (m/s) | Ecuación de la parte recta | R <sup>2</sup> | Tiempo crítico (min) | Humedad crítica (g agua/g cúrcuma seca) | Ecuación de la parte logarítmica | R <sup>2</sup> | Humedad de equilibrio (g agua/g cúrcuma seca) |
|---------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------|----------------------|---|----------------------------------|----------------|---|
|                           | 2,5                      | $y = -0,028x + 4,771$      | 0,999          | 50                   |   | $y = -1,607 \ln(x) + 9,781$      | 0,992          |   |
| 45                        | 3,0                      | $y = -0,025x + 4,531$      | 0,987          | 50                   | 3,38                                    | $y = 5,116e^{(-0,008x)}$         | 0,997          | 0,33  |
|                           | 3,5                      | $y = -0,044x + 4,762$      | 0,980          | 30                   |   | $y = -1,455 \ln(x) + 8,201$      | 0,990          |   |
|                           | 2,5                      | $y = -0,028x + 4,945$      | 0,999          | 70                   |   | $y = -1,757 \ln(x) + 10,469$     | 0,992          |   |
| 50                        | 3,0                      | $y = -0,047x + 4,850$      | 0,987          | 40                   | 2,98                                    | $y = 5,165e^{(-0,014x)}$         | 0,995          | 0,33  |
|                           | 3,5                      | $y = -0,064x + 4,873$      | 0,996          | 30                   |   | $y = 5,443e^{(-0,018x)}$         | 0,989          |   |
|                           | 2,5                      | $y = -0,047x + 4,694$      | 0,974          | 30                   |   | $y = 4,536e^{(-0,012x)}$         | 0,996          |   |
| 55                        | 3,0                      | $y = -0,062x + 4,568$      | 0,929          | 20                   | 3,25                                    | $y = 4,896e^{(-0,019x)}$         | 0,996          | 0,44  |
|                           | 3,5                      | $y = -0,038x + 3,997$      | 0,996          | 20                   |   | $y = 4,546e^{(-0,020x)}$         | 0,996          |   |

#### 4.4 Análisis fisicoquímicos

En la Tabla 5, se muestra los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a la harina de cúrcuma.

Tabla 5  
*Análisis fisicoquímicos de la harina de cúrcuma.*

| Temperatura (°C) | Velocidad (m/s) | Acidez (%) | pH   | Cenizas (%) | Humedad (%) |
|------------------|-----------------|------------|------|-------------|-------------|
| 45               | 2.5             | 0.37       | 6.52 | 5           | 15          |
|                  | 3.0             | 0.36       | 6.52 | 5           | 15          |
|                  | 3.5             | 0.37       | 6.58 | 4           | 14          |
| 50               | 2.5             | 0.37       | 6.51 | 5           | 15          |
|                  | 3.0             | 0.36       | 6.52 | 5           | 14          |
|                  | 3.5             | 0.37       | 6.51 | 6           | 15          |
| 55               | 2.5             | 0.37       | 6.52 | 6           | 14          |
|                  | 3.0             | 0.37       | 6.57 | 8           | 14          |
|                  | 3.5             | 0.37       | 6.51 | 6           | 15          |

#### 4.5 Análisis microbiológicos

En la Tabla 6 se muestra los resultados del análisis microbiológico en la cual se observa que la harina es inocua y apta para el consumo humano.

Tabla 6  
*Análisis microbiológico de la harina de cúrcuma.*

| Muestra   | Agente microbiano | N° de colonias | U.F.C/ g              | Límite por g |        |
|-----------|-------------------|----------------|-----------------------|--------------|--------|
|           |                   |                |                       | Mínimo       | Máximo |
| T= 45 °C  | Levaduras         | 45.5           | $45.5 \times 10^{-1}$ | $10^3$       | $10^4$ |
| V= 2.5 °C | Mohos             | -              | -                     | $10^3$       | $10^4$ |

#### 4.6 Evaluación organoléptica

A continuación se muestra los datos obtenidos a través de la encuesta a 15 panelistas semientrenados, evaluado mediante la siguiente escala:

1. Me disgusta mucho
2. Me disgusta moderadamente
3. Me disgusta poco
4. No me gusta ni me disgusta
5. Me gusta poco
6. Me gusta moderadamente
7. Me gusta mucho

##### a) Evaluación del color

En la Tabla 7 se muestra el puntaje asignado, según los valores de la escala hedónica, por cada panelista a las harinas de cúrcuma de tres tratamientos seleccionados al azar.

Tabla 7  
*Puntaje de los panelistas para el color de la harina de cúrcuma.*

|              | Tratamiento 1 | Tratamiento 5 | Tratamiento 9 |
|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Panelista 1  | 4             | 3             | 2             |
| Panelista 2  | 4             | 2             | 3             |
| Panelista 3  | 3             | 3             | 4             |
| Panelista 4  | 5             | 3             | 1             |
| Panelista 5  | 4             | 3             | 5             |
| Panelista 6  | 6             | 5             | 6             |
| Panelista 7  | 2             | 3             | 5             |
| Panelista 8  | 5             | 3             | 3             |
| Panelista 9  | 6             | 4             | 5             |
| Panelista 10 | 2             | 4             | 5             |
| Panelista 11 | 2             | 5             | 1             |
| Panelista 12 | 4             | 5             | 6             |
| Panelista 13 | 3             | 5             | 2             |
| Panelista 14 | 4             | 5             | 5             |
| Panelista 15 | 3             | 3             | 5             |

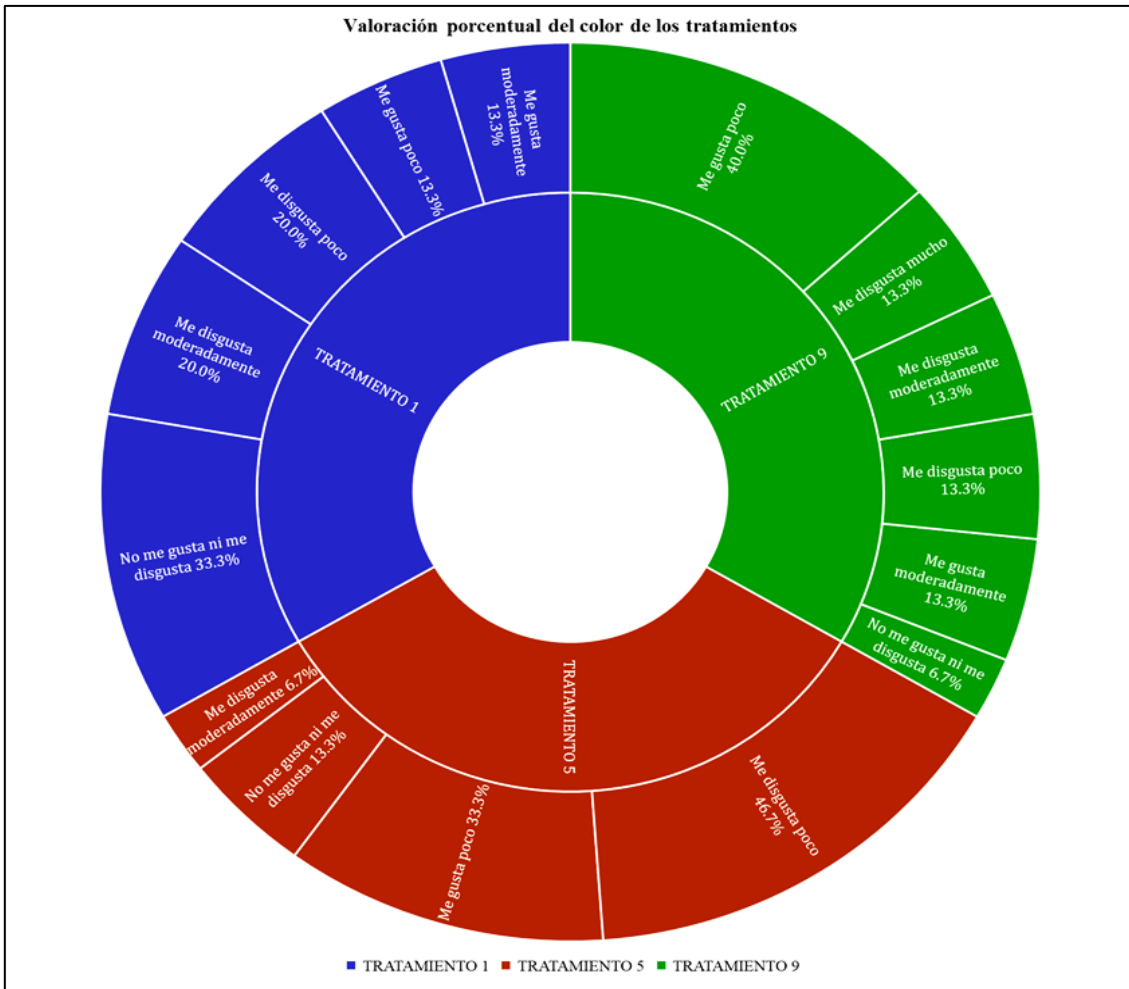
Tratamiento 1 = 45°C, 2.5 m/s  
Tratamiento 5 = 50 °C, 3.0 m/s  
Tratamiento 9 = 55 °C, 3.5 m/s

La Tabla 8 muestra el resultado de la evaluación del color realizado por los panelistas a los tratamientos (1,5 y 9)

Tabla 8  
*Resultados de la evaluación de color de los panelistas a los tratamientos mediante la escala hedónica.*

| Tratamiento | Me<br>disgusta<br>mucho | Me disgusta<br>moderadamente | Me<br>disgusta<br>poco | No me<br>gusta ni<br>me<br>disgusta | Me<br>gusta<br>poco | Me gusta<br>moderadamente | Me<br>gusta<br>mucho | Total |
|-------------|-------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------|-------|
| Trat1       | 0                       | 3                            | 3                      | 5                                   | 2                   | 2                         | 0                    | 15    |
| Trat5       | 0                       | 1                            | 7                      | 2                                   | 5                   | 0                         | 0                    | 15    |
| Trat9       | 2                       | 2                            | 2                      | 1                                   | 6                   | 2                         | 0                    | 15    |
| Total       | 2                       | 6                            | 12                     | 8                                   | 13                  | 4                         | 0                    | 45    |
| Porcentaje  | 4.4%                    | 13.3%                        | 26.7%                  | 17.8%                               | 28.9%               | 8.9%                      | 0.0%                 | 100   |

La figura 11 nos muestra la valoración porcentual del puntaje asignado por los quince panelistas a los tres tratamientos elegidos al azar para la evaluación del color, en donde se observa al menos 5 panelistas le asignaron un puntaje de me gusta poco al tratamiento 9 lo que representa al 40% de los quince panelistas; se observa que ningún panelista asignó un puntaje de me gusta mucho a ninguna de las harinas de los tratamientos. Se les aplicó ANVA a los tres tratamientos para determinar si existe diferencia significativa entre ellos (Ver anexo 07).



**Figura 11.** Gráfico circular de proyección para la evaluación del color de la harina de cúrcuma.

**b) Evaluación del olor**

Tabla 9

*Puntaje de los panelistas para el olor de la harina de cúrcuma.*

|              | Tratamiento 3 | Tratamiento 6 | Tratamiento 7 |
|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Panelista 1  | 5             | 5             | 3             |
| Panelista 2  | 4             | 4             | 3             |
| Panelista 3  | 6             | 5             | 6             |
| Panelista 4  | 5             | 3             | 1             |
| Panelista 5  | 5             | 4             | 2             |
| Panelista 6  | 4             | 3             | 6             |
| Panelista 7  | 3             | 5             | 6             |
| Panelista 8  | 5             | 5             | 6             |
| Panelista 9  | 4             | 5             | 6             |
| Panelista 10 | 5             | 2             | 1             |
| Panelista 11 | 3             | 3             | 4             |
| Panelista 12 | 3             | 4             | 3             |
| Panelista 13 | 4             | 3             | 5             |
| Panelista 14 | 4             | 5             | 3             |
| Panelista 15 | 5             | 3             | 2             |

Tratamiento 3 = 45°C, 3.5 m/s

Tratamiento 6 = 50 °C, 3.5 m/s

Tratamiento 7 = 55 °C, 2.5 m/s

La Tabla 10 muestra el resultado de la evaluación del olor realizado por los panelistas a los tratamientos (3,6 y 7).

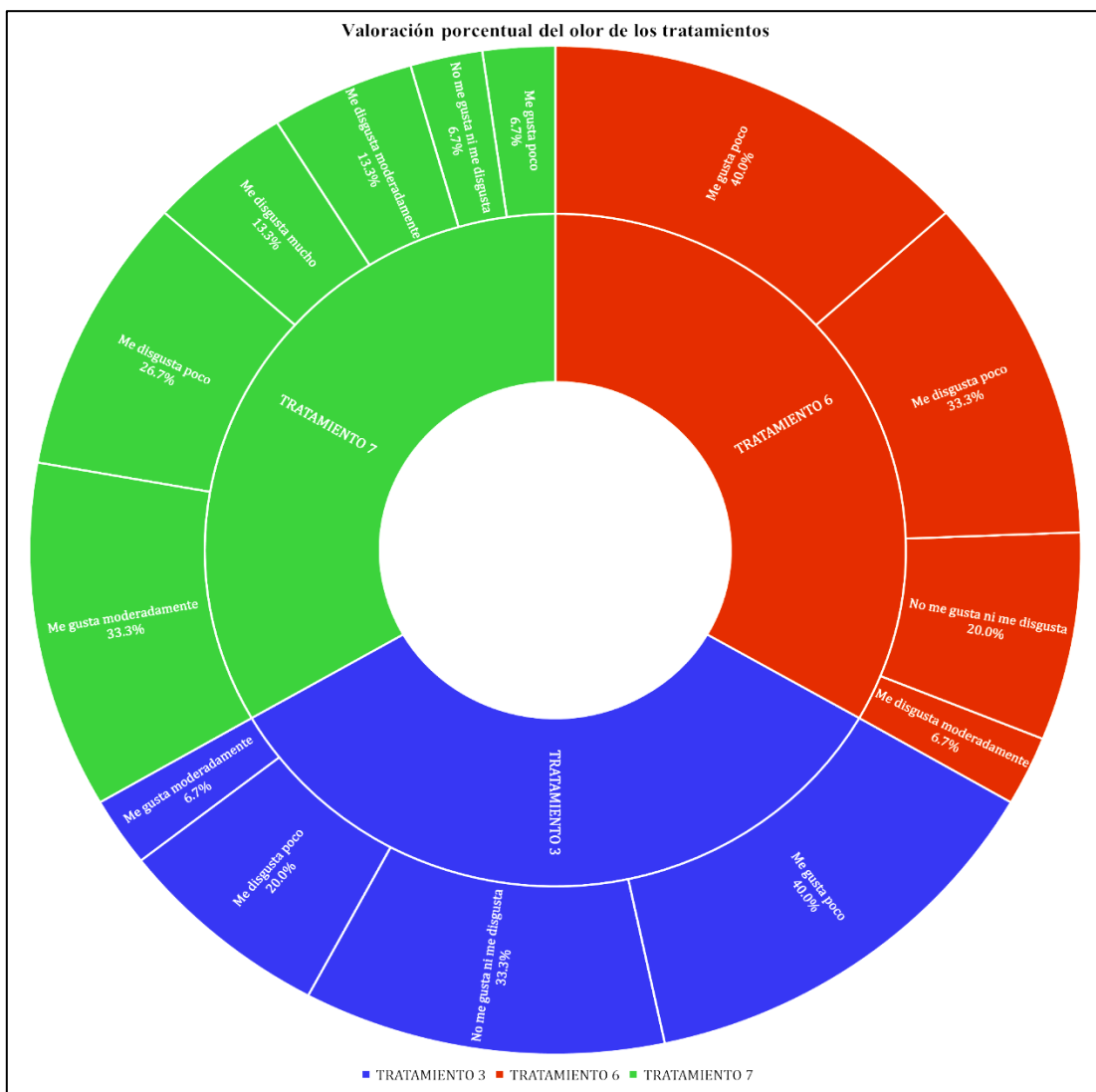
Tabla 10

*Resultados de la evaluación de olor de los panelistas a los tratamientos mediante la escala hedónica.*

| Tratamiento | Me disgusta mucho | Me disgusta moderadamente | Me disgusta poco | No me gusta ni me disgusta | Me gusta poco | Me gusta moderadamente | Me gusta mucho | Total |
|-------------|-------------------|---------------------------|------------------|----------------------------|---------------|------------------------|----------------|-------|
| Trat3       | 0                 | 0                         | 3                | 5                          | 6             | 1                      | 0              | 15    |
| Trat6       | 0                 | 1                         | 5                | 3                          | 6             | 0                      | 0              | 15    |
| Trat7       | 2                 | 2                         | 4                | 1                          | 1             | 5                      | 0              | 15    |
| Total       | 2                 | 3                         | 12               | 9                          | 13            | 6                      | 0              | 45    |
| Porcentaje  | 4.40%             | 6.70%                     | 26.70%           | 20.0%                      | 28.90%        | 13.30%                 | 0.00%          | 100   |



La figura 12 nos muestra la valoración porcentual del puntaje asignado por los quince panelistas a los tres tratamientos elegidos al azar para la evaluación del olor, en donde se observa que 5 panelistas le asignaron un puntaje de me gusta moderadamente al tratamiento 7, el valor más alto en la escala hedónica para esta evaluación, lo que representa al 33.3% de los quince panelistas; se observa que ningún panelista asignó un puntaje de me gusta mucho a ninguna de las harinas de los tratamientos. Se les aplicó ANVA a los tres tratamientos para determinar si existe diferencia significativa entre ellos (Ver anexo 07).



**Figura 12.** Gráfico de proyección de la evaluación para el olor de la harina de cúrcuma.

**c) Evaluación de la textura**

Tabla 11  
*Puntaje de los panelistas para la textura de la harina de cúrcuma.*

|              | Tratamiento 2 | Tratamiento 4 | Tratamiento 8 |
|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Panelista 1  | 5             | 3             | 1             |
| Panelista 2  | 4             | 2             | 3             |
| Panelista 3  | 5             | 4             | 5             |
| Panelista 4  | 2             | 4             | 6             |
| Panelista 5  | 5             | 4             | 3             |
| Panelista 6  | 5             | 6             | 6             |
| Panelista 7  | 3             | 4             | 4             |
| Panelista 8  | 5             | 4             | 4             |
| Panelista 9  | 4             | 6             | 5             |
| Panelista 10 | 6             | 4             | 2             |
| Panelista 11 | 3             | 4             | 1             |
| Panelista 12 | 2             | 3             | 1             |
| Panelista 13 | 3             | 4             | 2             |
| Panelista 14 | 4             | 3             | 1             |
| Panelista 15 | 2             | 3             | 5             |

Tratamiento 2 = 45°C, 3.0 m/s

Tratamiento 4 = 50 °C, 2.5 m/s

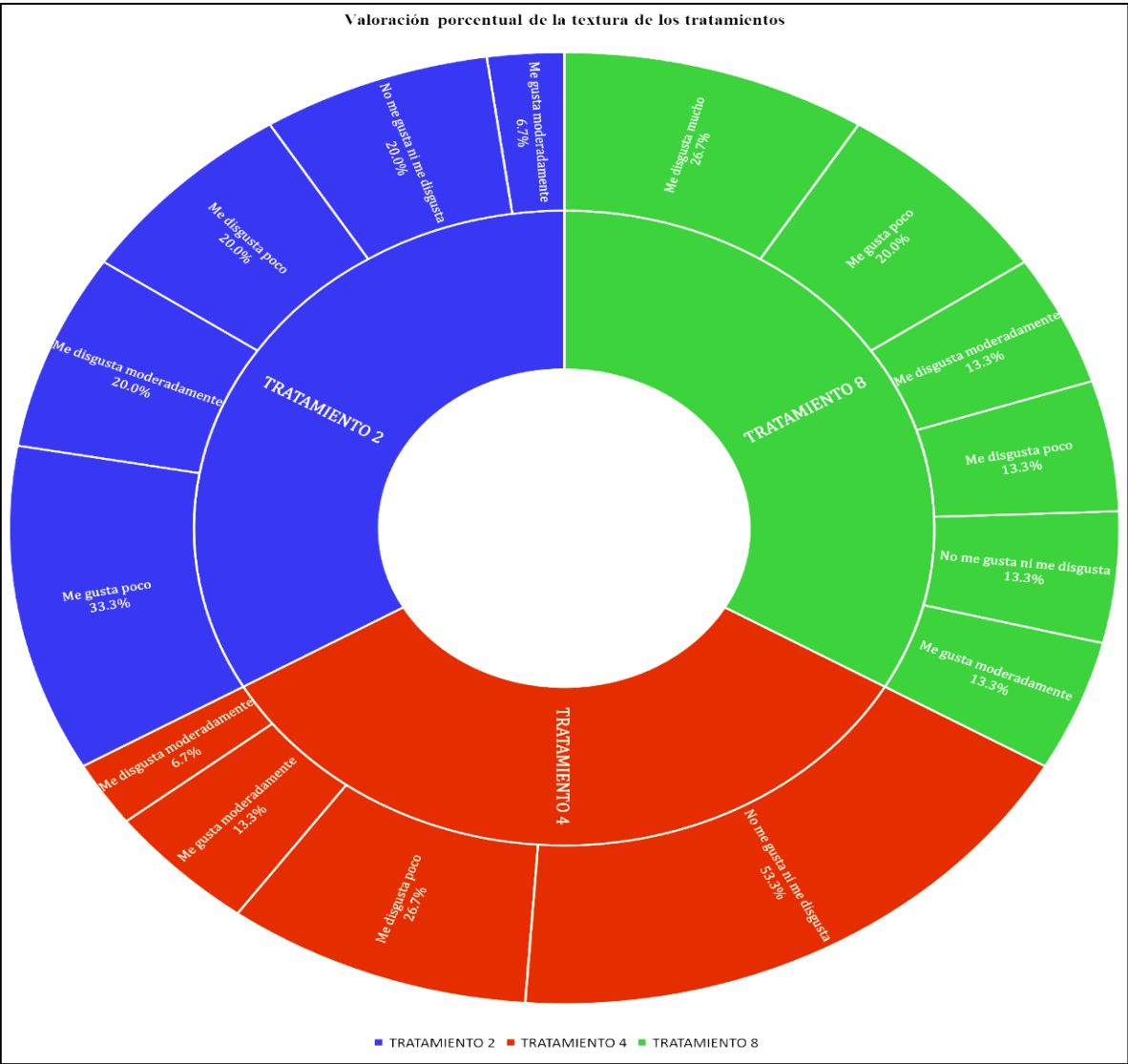
Tratamiento 8 = 55 °C, 3.0 m/s

La Tabla 12 muestra el resultado de la evaluación del color realizado por los panelistas a los tratamientos (2,4 y 8).

Tabla 12  
*Resultados de la evaluación de la textura de los panelistas a los tratamientos mediante la escala hedónica*

| Tratamiento | Me disgusta mucho | Me disgusta moderadamente | Me disgusta poco | No me gusta ni me disgusta | Me gusta poco | Me gusta moderadamente | Me gusta mucho | Total |
|-------------|-------------------|---------------------------|------------------|----------------------------|---------------|------------------------|----------------|-------|
| Trat2       | 0                 | 3                         | 3                | 3                          | 5             | 1                      | 0              | 15    |
| Trat4       | 0                 | 1                         | 4                | 8                          | 0             | 2                      | 0              | 15    |
| Trat8       | 4                 | 2                         | 2                | 2                          | 3             | 2                      | 0              | 15    |
| Total       | 4                 | 6                         | 9                | 13                         | 8             | 5                      | 0              | 45    |
| Porcentaje  | 8.90%             | 13.30%                    | 20.00%           | 28.90%                     | 17.80%        | 11.10%                 | 0.00%          | 100   |

La figura 13 nos muestra la valoración porcentual del puntaje asignado por los quince panelistas a los tres tratamientos elegidos al azar para la evaluación de la textura, en donde se observa que 5 panelistas le asignaron un puntaje de me gusta poco al tratamiento , el valor más alto en la escala hedónica para esta evaluación, lo que representa al 33.3% de los quince evaluaciones de los panelistas. Se les aplicó ANVA a los tres tratamientos para determinar si existe diferencia significativa entre ellos (Ver anexo 07).



**Figura13.** Gráfico de proyección para la evaluación de la textura de la harina de cúrcuma.

#### 4.7 Análisis mediante visión computacional

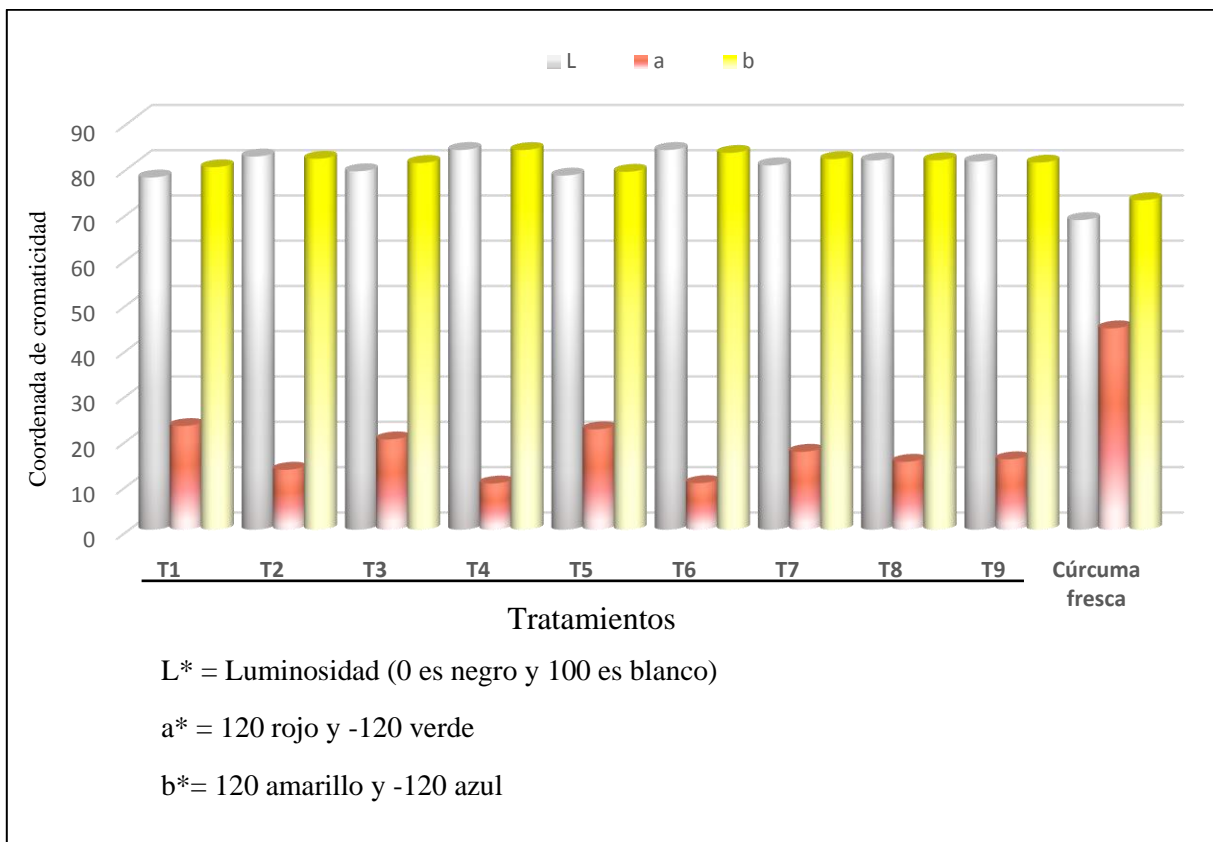
En la Tabla 7 se muestra los resultados del análisis mediante visión computacional en la cual se observa las coordenadas L\* a\* b\* de las rodajas de cúrcuma en fresco y de la harina.

Tabla 13

*Resultados de las coordenadas L\*a\*b\* de las harinas en comparación con los de la rodaja de cúrcuma fresca.*

| Temperatura<br>(°C) | Velocidad<br>(m/s) | Harinas |        |        | Rizoma fresco |        |        |
|---------------------|--------------------|---------|--------|--------|---------------|--------|--------|
|                     |                    | L*      | a*     | b*     | L*p           | a*p    | b*p    |
| 45                  | 2.5                | 77.755  | 22.846 | 80.019 |               |        |        |
|                     | 3                  | 82.384  | 13.206 | 81.887 |               |        |        |
|                     | 3.5                | 79.131  | 19.895 | 80.966 |               |        |        |
| 50                  | 2.5                | 83.836  | 10.171 | 83.829 |               |        |        |
|                     | 3                  | 78.176  | 22.121 | 79.024 | 68.358        | 44.418 | 72.734 |
|                     | 3.5                | 83.836  | 10.258 | 83.193 |               |        |        |
| 55                  | 2.5                | 80.439  | 17.165 | 81.806 |               |        |        |
|                     | 3                  | 81.529  | 14.962 | 81.567 |               |        |        |
|                     | 3.5                | 81.281  | 15.51  | 81.054 |               |        |        |

\*p= patrón (muestra fresca)



**Figura 14.** Comparación de los valores de coordenadas L\*a\*b\* de las harinas de cúrcuma con la rodaja de cúrcuma fresca.

La Figura 14 muestra la comparación entre los valores L\*a\*b\* de las harinas con respecto al de la rodaja fresca; en donde se puede apreciar que los valores para L\* van desde 77 hasta 83, para a\* presenta valores desde 10 hasta 22 y finalmente los valores de b\* van desde 79 hasta 83. En comparación con los valores de la rodaja de cúrcuma en su estado natural que presenta L\*= 68, a\*= 44 y b\*= 72. De lo anterior podemos deducir que el factor L\* (luminosidad) y b\* han aumentado presentando valores positivos más altos que los de la rodaja de cúrcuma en su estado natural, esto se aproxima a blanco y amarillo respectivamente; para a\* se observó una disminución muy notable debido a que disminuyó considerablemente siendo el pico más bajo 10. 258.

Consideramos que el tratamiento con los valores más óptimos ocurren con una temperatura de 45°C y a una velocidad de 2,5 m/s, en donde se puede apreciar que el color de la harina se asemeja más al de la rodaja de cúrcuma en su estado natural, para los demás tratamientos consideramos que presentan un valor regular.

## V. DISCUSIONES

Se determinó que a altas temperaturas y velocidades de secado de rodajas de cúrcuma, el tiempo de secado es menor, mientras que si los valores de la temperatura y velocidad son bajos el tiempo de secado aumenta. Se obtuvo que a 55 °C y 3.5 m/s el tiempo crítico fue de 20 minutos, hecho que coincide con Carranza (2014) que observó que a 55 °C y una velocidad de 3.5 m/s el tiempo de secado es de 130 minutos.

Se observó mediante las gráficas de secado que para cada velocidad de trabajo (2.5, 3.0 y 3.5 m/s) y a una misma temperatura, la humedad crítica y la humedad de equilibrio son iguales. Así para 55 °C la humedad crítica fue 3.25 g agua/g cúrcuma seca y la humedad de equilibrio 0.44 g agua/g cúrcuma seca para las tres velocidades de trabajo, lo que confirma lo dicho por Vernom (2000) que manifiesta que la humedad crítica y la humedad de equilibrio no variarán a cualquier velocidad del aire manteniendo su temperatura constante.

Se comparó el color de rodajas de cúrcuma fresca con rodajas deshidratadas en un secador de bandejas y se obtuvo que las coordenadas del color  $L^*$  y  $b^*$  aumentaron su valor ( $L^*= 77.455$  hasta  $83.836$  y  $b^*= 79.023$  hasta  $83.829$ ) y la coordenada  $a^*$  fue significativamente reducida ( $44.418$  muestra fresca,  $22.846$  muestra deshidratada) en comparación con Lakshmi (2018) que evaluó el color de muestras frescas de cúrcuma negra con muestras secadas en un secador solar y secado a sol abierto. Determinando que el secado disminuye el valor de  $L^*$  ( $45.31$  rodajas frescas,  $40.35$  secado solar y  $35.92$  a sol abierto) y  $b^*$  ( $15.24$  rodaja fresca,  $15.18$  secado solar y  $12.66$  a sol abierto) e incrementa el valor de la coordenada cromática  $a^*$  ( $-1.87$  muestra fresca,  $1.54$  secado solar y  $1.98$  a sol abierto).

## VI. CONCLUSIONES

Los mejores valores para las coordenadas de color de la harina son  $L^*= 77.754$ ,  $a^*= 22.846$  y  $b^*= 80.018$  y los valores que más difieren del color deseado son  $L^*= 83.836$ ,  $a^*= 10.170$  y  $b^*= 83.829$  mediante el análisis de imágenes del sistema de visión computacional en la evaluación de la cinética de secado en secador de bandejas de los tratamientos.

Los parámetros óptimos de la cinética de secado se obtuvieron trabajando a  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  y a una velocidad de  $2.5\text{ m/s}$  donde la humedad de equilibrio es  $0.33\text{ g agua/g cúrcuma seca}$ , la humedad crítica  $3.38\text{ g agua /g cúrcuma seca}$  y el tiempo crítico fue  $50\text{ min}$ .

Para el producto obtenido con los parámetros óptimos de secado sus características fisicoquímicas fueron las siguientes: acidez  $0,37\%$ , pH  $6.5$ , cenizas  $5\%$ , y humedad  $15\%$ ; para los parámetros microbiológicos en levaduras  $45.5 \times 10^{-1}\text{ U.F.C/g}$  y en mohos no desarrollaron colonias, y finalmente en la encuesta del análisis organoléptico la preferencia para el color es el tratamiento 9, olor el tratamiento 7 y para la textura el tratamiento 2.

Se determinó que la propiedad física del color evaluado mediante visión computacional para los tratamientos está determinada por la temperatura; los valores de las coordenadas CIELab de la harina de cúrcuma trabajada a  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una velocidad de  $2.5\text{ m/s}$  ( $L^*= 77.754$ ,  $a^*= 22.846$  y  $b^*= 80.018$ ) son los que más se asemejan a los valores  $L^*a^*b^*$  de la rodaja de cúrcuma fresca.

## **VII. RECOMENDACIONES**

1. Realizar investigaciones de cinética usando secador solar porque cuenta con una tecnología sencilla, económica y rápida para deshidratar alimentos.
2. Realizar el análisis de las propiedades de la cúrcuma a fin de determinar la calidad de la harina para el uso en la industria alimentaria.
3. Realizar estudios de la harina de cúrcuma como uso de colorante para la elaboración de diferentes productos alimenticios



## VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.O.A.C. (2012). Association of Official Analytical; Official Methods of Analysis, USA. Obtenido de [http://members.aoac.org/aoac\\_prod\\_imis/AOAC\\_Docs/AOAC\\_Presentation/AOAC\\_2014\\_PRESENTATION.pdf](http://members.aoac.org/aoac_prod_imis/AOAC_Docs/AOAC_Presentation/AOAC_2014_PRESENTATION.pdf)
- Akpinar, E. K. (30 de Enero de 2007). MODELING and EXPERIMENTAL STUDY ON DRYING of APPLE SLICES IN A CONVECTIVE CYCLONE DRYER. *Journal of Food Process Engineering*, 26(6), 515-541. doi:10.1111/j.1745-4530.2003.tb00654.x
- Alvis, A., & Arrazola, G. y. (2012). Evaluación de la Actividad y el Potencial Antioxidante de Extractos Hidro-Alcohólicos de Cúrcuma (*Cúrcuma longa*). 11-18.
- Barrena, M. (2011). Modelamiento de la cinética de secado de lúcumas (poutería lúcumas). Obtenido de <http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/8185/Tesis%20DoctoradoX%20-%20Miguel%20Angel%20Barrena%20Gurbill%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Brennan G., J. (2008). Manual del procesamiento de alimentos. Zaragoza: ACRIBIA.
- Brosnan, T. & Sun D. (2004). Improving quality inspection of food products by computer vision—a review. *Journal of Food Engineering*, 61(1), 3-16. doi:10.1016/S0260-8774(03)00183-3
- Carranza, v. (2014). Influencia De La Cinética De Secado En Las Características Físicoquímicas Y Sensoriales De Un Aditivo Alimentario En Polvo, Obtenido A Partir De La Cúrcuma Longa "Azafran" En Estado Fresco Y Cocido ;Proveniente De La Provincia De Utucubamba. Obtenido de [http://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/UNTRM/659/FIA\\_174.pdf?sequence=1](http://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/UNTRM/659/FIA_174.pdf?sequence=1)
- D'Arrigo, E. Fernández, C., Olarte, M. y Ramberg, K.. (2018). Estudio De Prefactibilidad Para La Instalación De Una Planta Procesadora De Cúrcuma En La Provincia De La Convención, Cusco. Obtenido de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3405/d-arrigo-huapaya->

edc-fernandez-pinto-cr-olarte-ambia-mo-ramberg-jelkman-KG.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Demir, V. G., Gunhan, T., Yagcioglu, A. K., & Degirmencioglu, A. (Julio de 2004). Mathematical Modelling and the Determination of Some Quality Parameters of Air-dried Bay Leaves. *Byosystems Engineering*, 88(3), 325-335. doi:10.1016/j.biosystemseng.2004.04.005
- Doymaz, I. (Junio de 2006). Thin-layer drying behaviour of mint leaves. *Journal of Food Engineering*, 74(3), 370-375. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.03.009
- Du, C. & Sun D. (2004). Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation. *Trends in Food Science & Technology*, 15(5), 230-249. doi:10.1016/j.tifs.2003.10.006
- Farzaei, M. H., Zobeiri, M., Parvizi, F., El-Senduny, F. F., Marmoui, I., Coy-Barrera, E., Naseri, R., Nabavi, S. M., Rahimi, R., & Abdollahi, M. (1 de Julio de 2018). Curcumin in Liver Diseases: A Systematic Review of the Cellular Mechanisms of Oxidative Stress and Clinical Perspective. *Nutrients*, 10(7), 855. doi:10.3390/nu10070855
- Ferández-Vásquez, R., Meléndez-Martínez, A. J., Stinco, C. M., & Heredia, F. J. (2011). Visual and instrumental evaluation of orange juice color: A consumers' preference study. *Journal of Sensory Studies*, 26(6), 436-444. doi:10.1111/j.1745-459X.2011.00360.x
- Fernández, L., Castellero, C., y Aguilera, J. M.. (2005). An application of image analysis to dehydration of apple discs. *Journal of Food Engineering*, 67 (1-2), 185-193. doi:10.1016/j.jfoodeng.2004.05.070
- Foca, G., Masino, F. Antonelli, A., & Ulrici, A.. (2011). Prediction of compositional and sensory characteristics using RGB digital images and multivariate calibration techniques. *Analytica Chimica Acta*, 706(2), 238 - 245. doi:10.1016/j.aca.2011.08.046
- Geankopolis, J. C. (1993). *Transport of Process and Unit Operations*. USA: Prentice-Hall, Inc.
- Gupta, S., Prasad, S. Kim, J. H. Patchva, S. Webb, L. J., Priyadarsini, I. K., & Aggarwal, B. (2011). Multitargeting by curcumin as revealed by molecular interaction studies. *Natural Products Reports*, 28(19), 37-55. doi:10.1039/c1np00051a
- Hashim, N., Daniel, O. & Rahaman E. (2014). A Preliminary Study: Kinetic Model of Drying Process of Pumpkins (*Curcubita Mostacha*) in a Convectivo Hot Air Dryer. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2, 345-352. doi:10.1016/j.aaspro.2014.11.048
- I.S.V, De Melo, A.F, Dos santos, & N.B, Bueno. (Febrero de 2018). Curcumin or combined curcuminoids are effective in lowering the fasting blood glucose concentrations of individuals with dysglycemia: Systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Pharmacologica research*, 128, 137-144. doi:10.1016/j.phrs.2017.09.010

- Ibarz, A. y Barboza-Cánovas G. (2000). *Métodos Experimentales en la Industria Alimentaria*. Zaragoza, España: ACRIBIA S.A.
- J. W., Daily, M., Yang, & Park, S. (Agosto de 2016). Efficacy of Turmeric Extracts and Curcumin for Alleviating the Symptoms of Joint Arthritis: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Clinical Trials. *Journal of Medicina Food*, 19(8), 717-729. doi:10.1089/jmf.2016.3705
- Kays, S. J. (1999). Preharvest factors affecting appearance. *Postharvest Biology and Technology*, 15(3), 233-247. doi:10.1016/S0925-5214(98)00088-X
- Krokida, M. K. & Marouliz, Z. B. (2001). The effect of the method of drying on the colour of dehydrated colour. *Journal of Food Science and Technology*, 36, 56-59. doi:10.1046/j.1365-2621.2001.00426.x
- Krokida, M. K. & Marouliz, Z. B. (03 de Mayo de 2007). Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology*, 15(10), 2441-2458. doi:10.1080/07373939708917369
- Krokida, M. K., Maroulis, Z. B., & Sarabacos G. D. (13 de Julio de 2008). The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products. *International Journal of Food Science and Technology*, 36(1), 53-59. doi:10.1046/j.1365-2621.2001.00426.x
- Lakshmi, D.V. N., Mathukumar, P., Layek, A., Nayak, P. K. (Mayo de 2018). Drying kinetics and quality analysis of black turmeric (*Curcuma caesia*) drying in a mixed mode forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage. *Renewable Energy*, 120, 23-24. doi:10.1016/j.renene.2017.12.053
- Larraín, R. E., Schaefer, D. M., & Reed, J. D. (2008). Use of digital images to estimate CIE color coordinates of beef. *Food Research International*, 41(4), 380-385. doi:10.1016/j.foodres.2008.01.002
- Lebert, A., Tarrhault, T., Rocha, C, & Marty Audouin, C. (1992). The drying kinetics of mint (*Mentha spicata* Huds). *Journal of Food Engineering*, 17(1), 15-28. doi:10.1016/0260-8774(92)90062-B
- Leela, N. K., Tava, A. Shafi, P. M., John, S. P., Chempakam, B. (2002). Chemical composition of essential oils of turmeric (*Curcuma longa* L.). *Acta Pharm*, 52, 137-141.
- León, K., Mery, D. Pedreschi, F. & León, J. (2006). Color measurement in Lab units from RGB digital images. *Food Research International*, 39, 1084 - 1091. doi:10.1016/j.foodres.2006.03.006
- López-García, F., Andreu-García, G., Blasco, J., Aleixos, N., & Valiente, J. (2010). Automatic detection of skin defects in citrus fruits using a multivariate image analysis approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 71(2), 189-197. doi:10.1016/j.compag.2010.02.001

- Lu, J., Tan, J., Shatadal, P., Gerrard, D. E. (2000). Evaluation of pork color by using computer vision. *Meat Science*, 56(1), 57-60. doi:10.1016/S0309-1740(00)00020-6
- Martin, M. L. G. M., Ji, W., Luo, R., Hutchings, J., & Heredia, F. J. (2007). Measuring colour appearance of red wines. *Food Quality and Preference*, 18(6), 862-871. doi:10.1016/j.foodqual.2007.01.013
- Matiacevich, S., Silva, P., Herrerca, c., & Osorio, F. (2010). Storage Effects on blueberries color. *Color and Food: From the Farm to the Table: Proceedings*, 522-525.
- Matiacevich, S., Silvia, P., Enrione, J. y Osorio, F. (2011). Quality assessment of blueberries by computer vision. *Procedia Food Science*, 1, 421-425. doi:10.1016/j.profoo.2011.09.065
- Meléndez-Martínez, A. J., Vicario, I., & Heredia, F. (Julio de 2005). Correlation between visual and instrumental colour measurements of orange juice dilutions: effect of the background. *Food Quality and Preference*, 16(5), 471-478. doi:10.1016/j.foodqual.2004.09.003
- Mendoza, F. A., & Aguilera, J. M. (2006). Application of Image Analysis for Classification of Ripening Bananas. *Journal of Food Science*, 69(9), 471-477. doi:10.1111/j.1365-2621.2004.tb09932.x
- Mishra, S., & Kalpana, P. (Enero de 2008). The effect of curcumin (turmeric) on Alzheimer's disease: An overview. *Annals of Indian Academy of Neurology*, 11(1), 13-19. doi:10.4103/0972-2327.40220
- Monton, C., Luprasong, C., & Charoenchai, L. (Julio de 2019). The aim of the work was to estimate the quality of some compositions in turmeric volatile oil and quantity of individual and total curcuminoids in turmeric powder dried under different conditions. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 29(4), 434-440. doi:10.1016/j.bjp.2019.04.006
- Noor, A., Mokhtar, M., Rafiqi, Z., & Pramod, K. (2012). Understanding Color Models: A Review. *ARNP Journal of Science and Technology*, 2(3), 265 - 275.
- O'Sullivan, M. G., Byrne, D. V., Martens, H., Gidskehaug, L. H., Andersen, H. J., & Martens, M. (2003). Evaluation of pork colour: prediction of visual sensory quality of meat from instrumental and computer vision methods of colour analysis. *Meat Science*, 65(2), 909-918. doi:10.1016/S0309-1740(02)00298-X
- Ocón, G. J., y Tojo, G. (1980). *Problemas de ingeniería química*. Tomo II. España: Aguilar S.A.
- Odetunmibi, O., Adejumo, O., Oguntunde, P. Okagbue, H., Adejumo, A. y Suleiman E. (2017). Drying kinetic of industrial cassava flour: Experimental data in view. *Data in Brief*, 15, 501-510. doi:10.1016/j.dib.2017.10.008
- Oliveira, A. C. M., & Balaban, M. O. (2006). Comparison of a colorimeter with a machine vision system in measuring color of Gulf of Mexico sturgeon fillets. doi:10.13031/2013.21211

- Omid, M., Khojastehnazhand, M., & Tabatabaefar, A. (Septiembre de 2010). Estimating volume and mass of citrus fruits by image processing technique. *Journal of Food Engineering*, 100(2), 315-321. doi:10.1016/j.jfoodeng.2010.04.015
- Papadakis, S. E., Kamdem, R. E., Abdul-Malek, S., & Yam, K. L. (2000). A versatile and inexpensive technique for measuring color of foods. *Food Technology*, 54(12), 48-51.
- Pedreschi, F., & Mery, P. (2004). Classification of Potato Chips Using Pattern Recognition. *Journal of Food Science*, 69(86), 264-270. doi:10.1111/j.1365-2621.2004.tb10996.x
- Perry, J. y Chilton C. (1982). *Manual del Ingeniero Químico* (2da. Edición ed.). Bogotá: Editorial MacGraw-Hill.
- Quevedo, R., Pedreschi, F., & Aguilera, J. M. (2010). Color of Salmon Fillets By Computer Vision and Sensory Panel. *Food and Bioprocess Technology*, 3(5), 637-643. doi:10.1007/s11947-008-0106-6
- Quin, S., Huang, L., Gong, J., Shen, S., Huang, J., Ren, H., & Hu, H. (11 de Octubre de 2017). Efficacy and safety of turmeric and curcumin in lowering blood lipid levels in patients with cardiovascular risk factors: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Nutrition Journal*, 16(1), 68. doi:10.1186/s12937-017-0293-y.
- Scanlon, M. G., Roller, R., Mazza, G., Pritchard, M. K. (1994). Computerized video image analysis to quantify color of potato chips. *American Potato Journal*, 717-734.
- Segnini, S., Dejmek, P., & Öste, R. (1999). A Low Cost Video Technique for Colour Measurement of Potato Chips. *LWT - Food Science and Technology*, 32(4), 216-222. doi:10.1006/fstl.1999.0536
- Spreer, W., & Müller, J. (Enero de 2011). Estimating the mass of mango fruit (*Mangifera indica*, cv. Chok Anan) from its geometric dimensions by optical measurement. *Computers and Electronics in Agriculture*, 75(1), 125-131. doi:10.1016/j.compag.2010.10.007
- Sun, F., Yuwen, C., Zhangming, Z., & Yifeng, Y. (2004). Determination of Beer Color Using Image Analysis. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 62, 163-167. doi:doi.org/10.1094/ASBCJ-62-0163
- Sun, X., Berg, E. P., Chen, K., & Magolski, J. D. (2011). Predicting Fresh Beef Color Grade Using Machine Vision Imaging and Support Vector Machine (SVM) Analysis. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 10(12), 1504-1511. doi:10.3923/javaa.2011.1504.1511
- Tan, F. J., Ludas, L. I., Morgan, M., & Forrest, J. C. (2001). Assessment of fresh pork color with color machine vision. *Journal of Animal Science*, 78(12), 3078-3085. doi:10.2527/2000.78123078x
- Temple, S. J., & Van Boxtel, A.J.B. (1999). Fluidization of Tea. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74(1), 5-11. doi:10.1006/jaer.1999.0421

- Vernom, C. J. (2000). Laboratorio de Operaciones Unitarias. México: Universidad Autónoma de México, Unidad Itztapalapa.
- Wu, D., & Sun, D. W. (Enero de 2013). Colour measurements by computer vision for food quality control – A review. *Trend in Food Science & Technology*, 29(1), 5-20. doi:10.1016/j.tifs.2012.08.004
- Yagiz, Y., Kristinsson, H., Balaban, M. & Welt, B. A. (2009). Comparison of Minolta colorimeter and machine vision system in measuring color of irradiated Atlantic salmon. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(4), 728-730. doi:10.1002/jsfa.3467
- Yam, K. L., & Papadakis, S. E. (2004). A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering*, 61(1), 137-142. doi:10.1016/S0260-8774(03)00195-X
- Zapotocsny, P. & Majewska, K. (2010). A Comparative Analysis of Colour Measurements of the Seed Coat and Endosperm of Wheat Kernels Performed by Various Techniques. *International Journal of Food Properties*, 13(1), 75-89. doi:10.1080/10942910802180174

## **IX. DEDICATORIA**

A Dios por darme lo que tengo, lo que tuve y lo que algún día tendré; por estar siempre presente en cada una de las decisiones más importantes en mi vida. A las dos mujeres más importantes de mi vida mamita Magna, mi segunda madre, a quien debo la grandísima lección de que si quieres algo en la vida tendrás que esforzarte el doble, ser perseverante y tenaz; y mi madre María a quien debo todo por darme la vida y como no olvidar el apoyo de cada uno de mi querida familia, a todos ellos gracias totales.

De: Elton Jhon Rojas Ocupa

A Dios y a mis padres por haberme forjado como la persona que soy. En la actualidad muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que incluyen este proyecto de investigación.

De: Justo Chumacero Mijahuanca

## **X. AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darnos la capacidad y salud para poder lograr cada una de nuestras metas trazadas a lo largo de nuestra vida.

A la profesora Nelly Jiménez Córdova y su esposo Elmer Ruffasto Castro por ser mi segunda familia durante mi estadía en la Universidad Nacional de Jaén.

A la Universidad Nacional de Jaén por darnos la oportunidad de forjarnos como profesionales en el campo de la Ingeniería de Industrias Alimentarias para ser hombres de bien y servir a la sociedad.

Al ingeniero Polito Michael Huayama Sopla, Coordinador de la Carrera Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias, por aceptar ser nuestro asesor de tesis y por compartir sus valiosos conocimientos y consejos, fruto del esfuerzo y experiencia a lo largo de los años en cuanto a investigación científica.

Al ingeniero Adán Díaz Ruiz, jefe del laboratorio de Taller de Tecnología de los alimentos de la carrera profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias, por su valioso tiempo y conocimientos para la ejecución del presente proyecto de investigación.

Al personal de la biblioteca de la Universidad Nacional de Jaén por su bondadosa actitud cuando solicitamos el material de consulta para las fuentes bibliográficas.

A nuestro compañero Edson Troyes Mego por el apoyo durante todo el proceso de la ejecución del presente proyecto de investigación.



## ANEXO 01

Imágenes de las operaciones para la obtención de harina de cúrcuma.



Fotografía 1. Rizomas de cúrcuma.



Fotografía 2. Lavado manual de rizomas de cúrcuma.



Fotografía 3. Rizomas de cúrcuma recién lavado.



Fotografía 4. Pesado de los rizomas de cúrcuma.



Fotografía 5. Ecurrido de los rizomas de cúrcuma.



Fotografía 6. Rodajas de cúrcuma.



Fotografía 7. Vista frontal de la cámara de secado junto con la balanza de triple brazo.



Fotografía 8. Rodajas de cúrcuma después del deshidratador.



Fotografía 9. Rodajas de cúrcuma deshidratada en el desecador.



Fotografía 10. Rodajas de cúrcuma para el molido.



Fotografía 11. Molido de rodajas de cúrcuma para obtención de harina.



Fotografía 12. Cúrcuma molida.



Fotografía 13. Tamiz, malla de malla n° 70 y 220 micrones.



Fotografía 14. Desinfectado del tamiz.



Fotografía 15. Tamizado de la cúrcuma molida para la obtención de harina.



Fotografía 16. Envasado de harina de cúrcuma.



Fotografía 17. Harina de cúrcuma envasada.



Fotografía 18. Almacenado de la harina de cúrcuma.

## ANEXO 2

Secado de la cúrcuma en el laboratorio de Refrigeración y Deshidratación de la UNJ



Fotografía 19. Deshidratado de cúrcuma.



Fotografía 20. Rodajas de cúrcuma para deshidratado.



Fotografía 21. Secador de bandejas en el laboratorio de Deshidratación.



Fotografía 22. Control de peso de rodajas de cúrcuma.



Fotografía 23. Anemómetro regulador de la velocidad de aire de secado.



Fotografía 24. Secado de rodajas de cúrcuma hasta su peso constante.

### ANEXO 03

Obtención de los valores de las coordenadas  $L^*a^*b^*$  mediante el software MatLab 17.0.



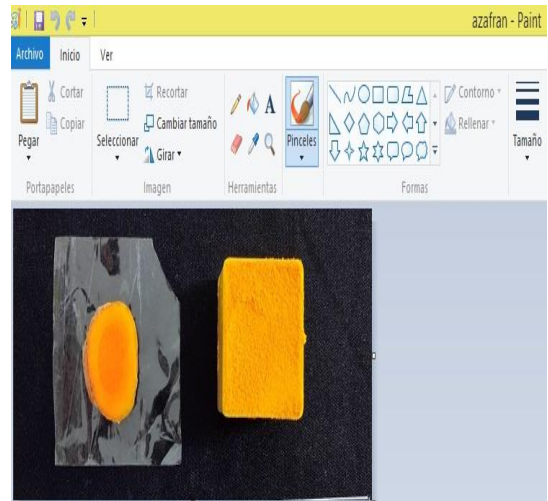
Fotografía 25. Muestra de cúrcuma, en rodaja fresca y harina, para análisis de imagen.



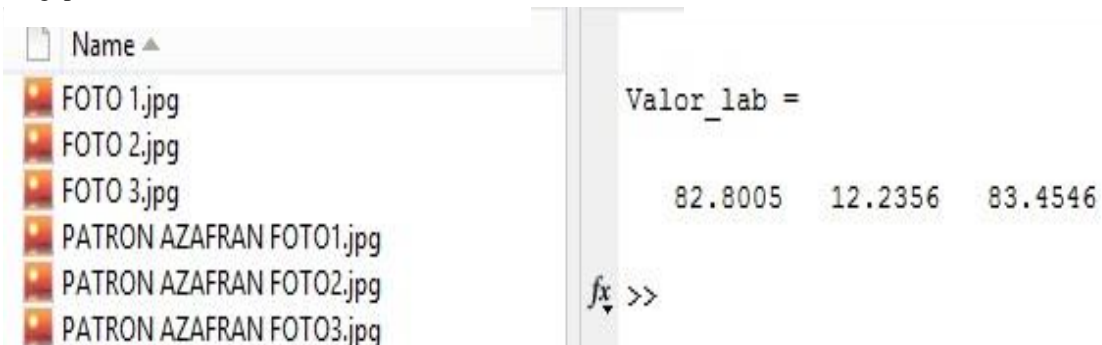
Fotografía 26. Harina de cúrcuma a 45 °C y una velocidad de 2.5 m/s.



Fotografía 27. Cámara digital SONY de 21 Megapíxeles.



Fotografía 28. Segmentación de las imágenes mediante el programa Paint.



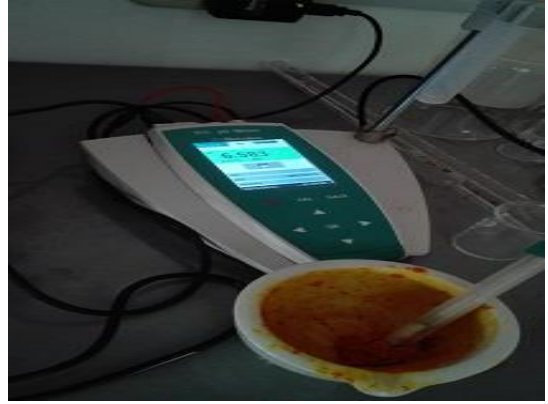
Fotografía 29. Obtención de los valores de las coordenadas  $L^*a^*b^*$  mediante un algoritmo usando el programa software MatLab 17.0.

## ANEXO 04

Imágenes de los análisis físico-químicos y microbiológicos de la harina cúrcuma.



Fotografía 30. Determinación de la humedad por el método de la estufa.



Fotografía 31. Determinación del pH del rizoma cúrcuma.



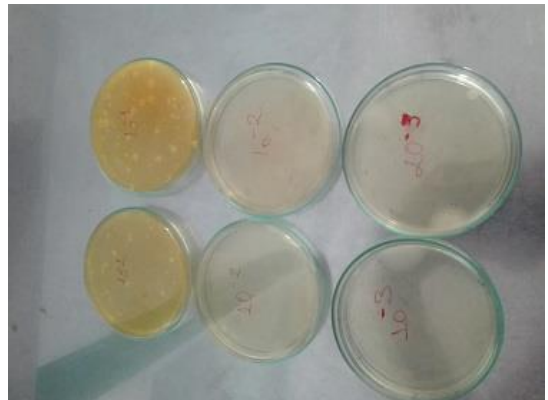
Fotografía 32. Filtrado de la muestra del rizoma de cúrcuma para determinación de acidez titulable.



Fotografía 33. Enrase de una fiola con agua destilada.



Fotografía 34. Determinación de cenizas.



Fotografía 35. Resultados de análisis microbiológicos.

## ANEXO 05

Evaluación organoléptica de la harina de cúrcuma con escala hedónica:

1. Me disgusta mucho.
2. Me disgusta moderadamente.
3. Me disgusta poco.
4. No me gusta ni me disgusta
5. Me gusta poco.
6. Me gusta moderadamente.
7. Me gusta mucho.

Tabla 14  
*Evaluación del color de la harina.*

| Escala<br>Tratamiento | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| Trat 1                |   |   |   |   |   |   |   |
| Trat. 5               |   |   |   |   |   |   |   |
| Trat. 9               |   |   |   |   |   |   |   |

OBSERVACIONES:

Tabla 15  
*Evaluación del olor de la harina*

| Escala<br>Tratamiento | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| Trat. 3               |   |   |   |   |   |   |   |
| Trat. 6               |   |   |   |   |   |   |   |
| Trat. 7               |   |   |   |   |   |   |   |

OBSERVACIONES

Tabla 16  
*Evaluación de la textura de la harina.*

| Escala<br>Tratamiento | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| Trat. 2               |   |   |   |   |   |   |   |
| Trat. 4               |   |   |   |   |   |   |   |
| Trat. 8               |   |   |   |   |   |   |   |

OBSERVACIONES



## ANEXO 6

Algoritmo usado en el programa Matlab 17.0 para la obtención de los valores de las coordenadas  $L*a*b^*$

```
% Comandos para cerrar y limpiar la memoria, pantalla
clc, clear
% Cargar la imagen
B=imread('azafran1.jpg');
imshow(B)
B2=im2double(B);
% B1=roipoly(B);
[d1,d2]=size(B2);
c=0;
L=[];
for a=1:d1
    for b=1:d2
        if B2(a,b)==1
            n=1;
            c=c+1;
            L(n,c)=a;
            n=2;
            L(n,c)=b;
        end
    end
end
end
% figure (1),imshow (B);
cform=makecform('srgb2lab');
Y=applycform(B2,cform);
P=[];
for n=1:c
    P(n,:)=impixel(Y,L(2*n),L(2*n-1));
end
ProL=[];Proa=[];Prob=[];
Sum_L=0;Sum_a=0;Sum_b=0;
for n=1:c
    Sum_L=Sum_L+P(n,1);
    Sum_a=Sum_a+P(n,2);
    Sum_b=Sum_b+P(n,3);
end
ProL=Sum_L/c;
Proa=Sum_a/c;
Prob=Sum_b/c;
Valor_lab=[ProL Proa Prob]
```

## ANEXO 07

### ❖ Análisis ANOVA para la evaluación organoléptica de la harina de cúrcuma.

Tabla 17  
*Análisis de varianza (ANOVA) del color.*

|                  | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F     | Sig.  |
|------------------|-------------------|----|------------------|-------|-------|
| Entre grupos     | 0.133             | 2  | 0.067            | 0.035 | 0.966 |
| Dentro de grupos | 81.067            | 42 | 1.930            |       |       |
| Total            | 81.200            | 44 |                  |       |       |

Tabla 18  
*Análisis de varianza (ANOVA) del olor.*

|                  | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F     | Sig.  |
|------------------|-------------------|----|------------------|-------|-------|
| Entre grupos     | 2.311             | 2  | 1.156            | 0.633 | 0.536 |
| Dentro de grupos | 76.667            | 42 | 1.825            |       |       |
| Total            | 78.978            | 44 |                  |       |       |

Tabla 19  
*Análisis de varianza (ANOVA) de la textura.*

|                  | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F     | Sig.  |
|------------------|-------------------|----|------------------|-------|-------|
| Entre grupos     | 3.600             | 2  | 1.800            | 0.855 | 0.432 |
| Dentro de grupos | 88.400            | 42 | 2.105            |       |       |
| Total            | 92.000            | 44 |                  |       |       |

## ANEXO 08

**Resultados de los datos experimentales de secado de rodajas de cúrcuma realizados con aire a  $T = 45^\circ\text{C}$  y velocidades de 2,5, 3,0, 3,5 m/s.**

Tabla 20

*Datos experimentales de la operación de secado de rodajas de cúrcuma, en un secador de bandejas con flujo de aire a  $45^\circ\text{C}$  y velocidad de 2,5 m/s.*

|    | t            | $P_1$                                     | $P_2=P_1-SB$                 | $(P_2-S)/S$                                |                                     |                              |
|----|--------------|---|------------------------------|--|-------------------------------------|------------------------------|
| Nº | Tiempo (min) | Peso estructura + cúrcuma al tiempo t (g) | Peso rodajas al tiempo t (g) | Humedad residual (g agua / g cúrcuma seca) | Dy/dt (g agua / g cúrcuma seca.min) | Ym (g agua / g cúrcuma seca) |
| 1  | 0            | 1835.7                                    | 822.7                        | 4.79                                       | 0.032                               | 4.63                         |
| 3  | 10           | 1789.9                                    | 776.9                        | 4.47                                       | 0.026                               | 4.34                         |
| 5  | 20           | 1753.2                                    | 740.2                        | 4.21                                       | 0.027                               | 4.08                         |
| 7  | 30           | 1715.5                                    | 702.5                        | 3.95                                       | 0.027                               | 3.81                         |
| 9  | 40           | 1677.1                                    | 664.1                        | 3.68                                       | 0.029                               | 3.53                         |
| 11 | 50           | 1635.6                                    | 622.6                        | 3.38                                       | 0.014                               | 3.31                         |
| 13 | 60           | 1615.5                                    | 602.5                        | 3.24                                       | 0.023                               | 3.12                         |
| 15 | 70           | 1582.2                                    | 569.2                        | 3.01                                       | 0.019                               | 2.91                         |
| 17 | 80           | 1555.8                                    | 542.8                        | 2.82                                       | 0.019                               | 2.73                         |
| 19 | 90           | 1528.7                                    | 515.7                        | 2.63                                       | 0.018                               | 2.54                         |
| 21 | 100          | 1503.5                                    | 490.5                        | 2.45                                       | 0.022                               | 2.34                         |
| 23 | 110          | 1472.5                                    | 459.5                        | 2.24                                       | 0.013                               | 2.17                         |
| 25 | 120          | 1453.5                                    | 440.5                        | 2.10                                       | 0.011                               | 2.05                         |
| 27 | 130          | 1437.6                                    | 424.6                        | 1.99                                       | 0.016                               | 1.91                         |
| 29 | 140          | 1415.0                                    | 402.0                        | 1.83                                       | 0.014                               | 1.76                         |
| 31 | 150          | 1395.5                                    | 382.5                        | 1.69                                       | 0.007                               | 1.66                         |
| 33 | 160          | 1385.1                                    | 372.1                        | 1.62                                       | 0.015                               | 1.54                         |
| 35 | 170          | 1363.7                                    | 350.7                        | 1.47                                       | 0.011                               | 1.41                         |
| 37 | 180          | 1348.2                                    | 335.2                        | 1.36                                       | 0.009                               | 1.32                         |
| 39 | 190          | 1336.1                                    | 323.1                        | 1.27                                       | 0.011                               | 1.22                         |
| 41 | 200          | 1320.6                                    | 307.6                        | 1.17                                       | 0.008                               | 1.13                         |
| 43 | 210          | 1309.4                                    | 296.4                        | 1.09                                       | 0.006                               | 1.06                         |
| 45 | 220          | 1300.6                                    | 287.6                        | 1.02                                       | 0.007                               | 0.99                         |
| 47 | 230          | 1290.0                                    | 277.0                        | 0.95                                       | 0.007                               | 0.91                         |
| 49 | 240          | 1280.0                                    | 267.0                        | 0.88                                       | 0.006                               | 0.85                         |
| 51 | 250          | 1271.6                                    | 258.6                        | 0.82                                       | 0.006                               | 0.79                         |
| 53 | 260          | 1263.7                                    | 250.7                        | 0.76                                       | 0.005                               | 0.74                         |
| 55 | 270          | 1256.6                                    | 243.6                        | 0.72                                       | 0.005                               | 0.69                         |

|    |     |        |       |      |       |      |
|----|-----|--------|-------|------|-------|------|
| 57 | 280 | 1250.1 | 237.1 | 0.67 | 0.005 | 0.64 |
| 59 | 290 | 1243.2 | 230.2 | 0.62 | 0.003 | 0.60 |
| 61 | 300 | 1238.7 | 225.7 | 0.59 | 0.005 | 0.57 |
| 63 | 310 | 1231.9 | 218.9 | 0.54 | 0.003 | 0.53 |
| 65 | 320 | 1227.5 | 214.5 | 0.51 | 0.003 | 0.49 |
| 67 | 330 | 1223.1 | 210.1 | 0.48 | 0.003 | 0.46 |
| 69 | 340 | 1219.0 | 206.0 | 0.45 | 0.002 | 0.44 |
| 71 | 350 | 1215.8 | 202.8 | 0.43 | 0.003 | 0.41 |
| 73 | 360 | 1211.0 | 198.0 | 0.39 | 0.003 | 0.38 |
| 75 | 370 | 1207.3 | 194.3 | 0.37 | 0.002 | 0.36 |
| 77 | 380 | 1204.5 | 191.5 | 0.35 | 0.002 | 0.34 |
| 79 | 390 | 1201.6 | 188.6 | 0.33 | 0.001 | 0.32 |
| 81 | 400 | 1200.0 | 187.0 | 0.32 | 0.032 | 0.16 |

SB = 1013 S = 142,04

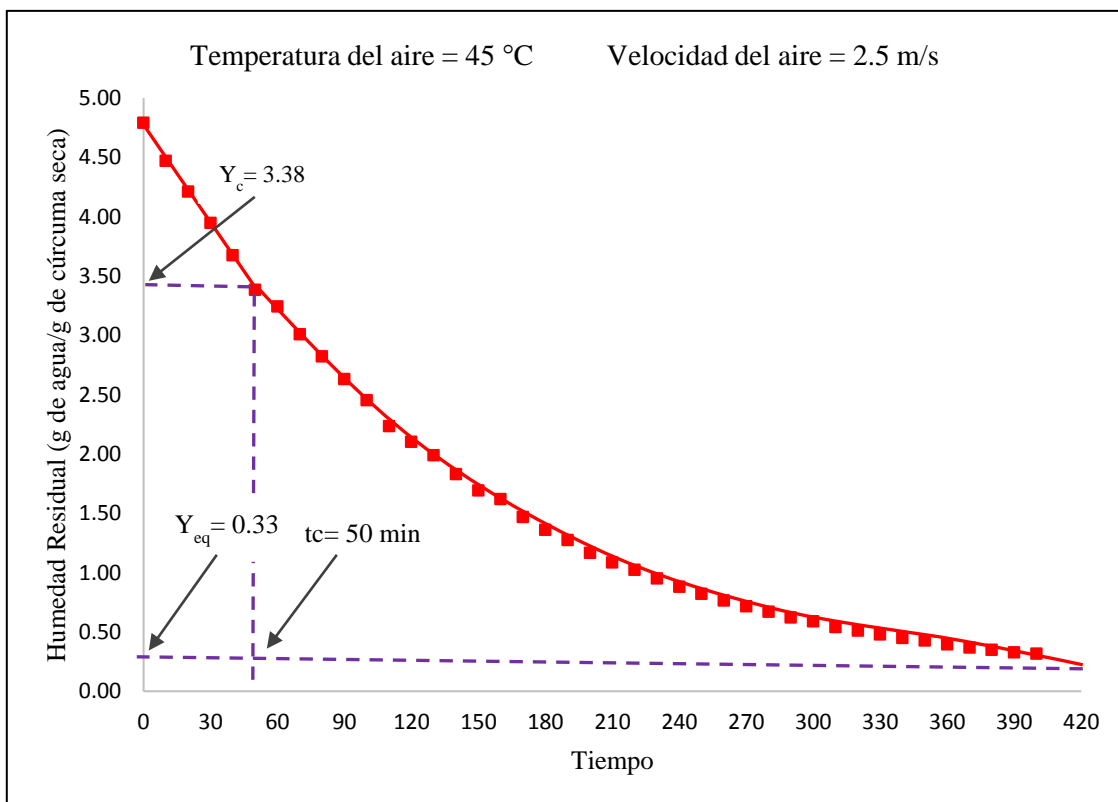


Figura 15. Humedad residual en función del tiempo (T= 45°C, velocidad 2,5 m/s).

**Análisis de regresión lineal con el SPSS (T1= 45 °C; velocidad = 2.5 m/s)**

Tabla 21

*Resumen modelo de regresión lineal (T = 45 °C; velocidad = 2.5m/s).*

| R     | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación |
|-------|------------|---------------------|---------------------------------|
| 0,999 | 0.999      | 0.999               | 0.019                           |

La variable independiente es Tiempo.

Tabla 22

*Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión lineal (T = 45 °C; velocidad = 2.5m/s).*

|           | Suma de cuadrados | GL | Media cuadrática | F      | Sig.  |
|-----------|-------------------|----|------------------|--------|-------|
| Regresión | 1.339             | 1  | 1.339            | 3840.3 | 0,000 |
| Residuo   | 0.001             | 4  | 0.000            |        |       |
| Total     | 1.340             | 5  |                  |        |       |

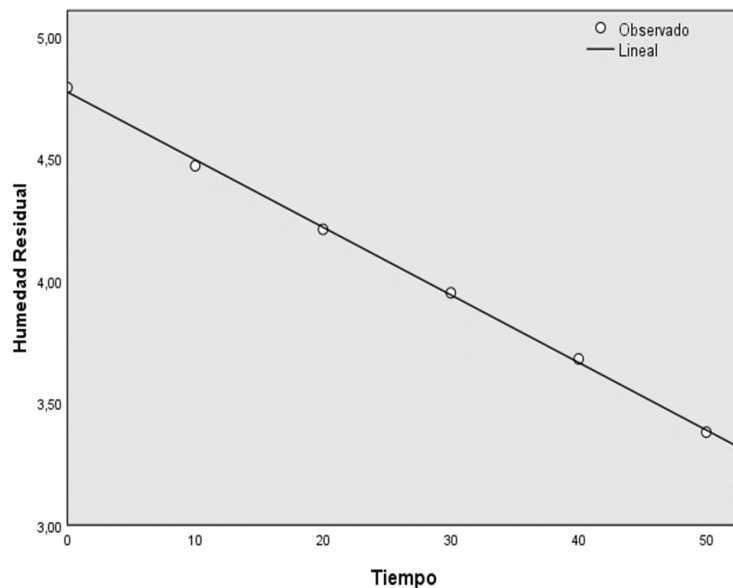
La variable independiente es Tiempo.

Tabla 23

*Coefficientes de la ecuación lineal (T = 45 °C; velocidad = 2.5m/s).*

|             | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados | t       | Sig.  |
|-------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|---------|-------|
|             | B                              | Desv. Error | Beta                        |         |       |
| (Constante) | 4.771                          | 0.014       |                             | 353.115 | 0.000 |
| Tiempo      | -0.028                         | 0.000       | -0.999                      | -61.970 | 0.000 |

La ecuación de la línea recta será de la forma:  $y = 0,028x + 4,771$



**Figura 16.** Representación de los datos experimentales (0) y de la línea recta (-) generada por el SPSS. ( $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 2.5 m/s).

### **Análisis de regresión logarítmica con el SPSS ( $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 2,5 m/s)**

Tabla 24

*Resumen del modelo de regresión logarítmica ( $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 2.5m/s).*

| R     | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación |
|-------|------------|---------------------|---------------------------------|
| 0.996 | 0.992      | 0.992               | 0.076                           |

La variable independiente es el tiempo

Tabla 25

*Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión logarítmica ( $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 2,5 m/s).*

|           | Suma de cuadrados | Gl | Media cuadrática | F        | Sig.  |
|-----------|-------------------|----|------------------|----------|-------|
| Regresión | 24.825            | 1  | 24.825           | 4314.280 | 0.000 |
| Residuo   | 0.190             | 33 | 0.006            |          |       |
| Total     | 25.015            | 34 |                  |          |       |

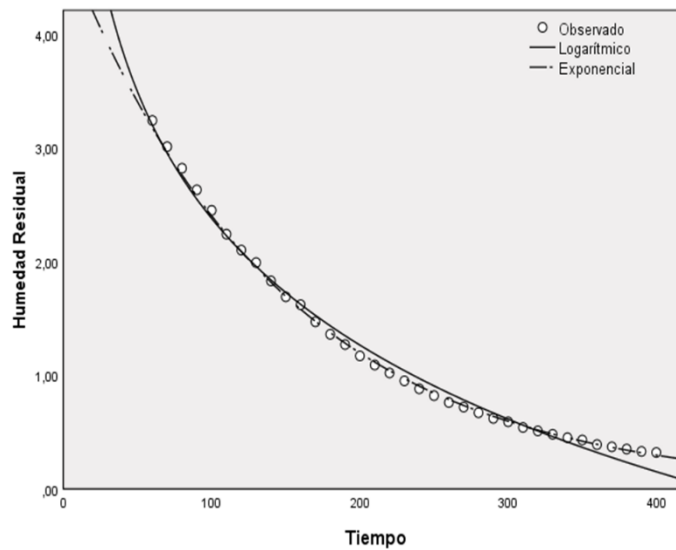
La variable independiente es Tiempo.

Tabla 26

*Coefficientes de la ecuación logarítmica (T = 45 °C; velocidad = 2.5 m/s).*

|             | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados | t       | Sig.  |
|-------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|---------|-------|
|             | B                              | Desv. Error | Beta                        |         |       |
| ln(Tiempo)  | -1.607                         | 0.024       | -0.996                      | -65.683 | 0.000 |
| (Constante) | 9.781                          | 0.131       |                             | 74.802  | 0.000 |

La ecuación de la curva logarítmica será de la forma:  $y = -1,607 \ln(x) + 9,781$



**Figura 17.** Representación de los datos experimentales (0), de la curva logarítmica (-) y de la curva exponencial (-.) generada por el SPSS. La curva exponencial es la más representativa (T = 45 °C; velocidad = 2,5 m/s).

Tabla 27

*Datos experimentales de la operación de secado de rodajas de cúrcuma, en un secador de bandejas con flujo de aire a 45°C y velocidad de 3,0 m/s.*

|    | t            | P <sub>1</sub>                            | P <sub>2</sub> =P <sub>1</sub> -SB | (P <sub>2</sub> -S)/S                      |                                     |                              |
|----|--------------|---|------------------------------------|--|-------------------------------------|------------------------------|
| N° | tiempo (min) | Peso estructura + cúrcuma al tiempo t (g) | Peso rodajas al tiempo t (g)       | Humedad residual (g agua / g cúrcuma seca) | Dy/dt (g agua / g cúrcuma seca.min) | Ym (g agua / g cúrcuma seca) |
| 1  | 0            | 2080.1                                    | 1067.1                             | 4.50                                       | 0.022                               | 4.392                        |
| 3  | 10           | 2037.1                                    | 1024.1                             | 4.28                                       | 0.014                               | 4.211                        |
| 5  | 20           | 2010.0                                    | 997.0                              | 4.14                                       | 0.040                               | 3.942                        |
| 7  | 30           | 1932.7                                    | 919.7                              | 3.74                                       | 0.021                               | 3.637                        |
| 9  | 40           | 1891.7                                    | 878.7                              | 3.53                                       | 0.022                               | 3.422                        |
| 11 | 50           | 1849.4                                    | 836.4                              | 3.31                                       | 0.018                               | 3.225                        |
| 13 | 60           | 1815.3                                    | 802.3                              | 3.14                                       | 0.018                               | 3.046                        |
| 15 | 70           | 1779.9                                    | 766.9                              | 2.95                                       | 0.035                               | 2.781                        |
| 17 | 80           | 1712.6                                    | 699.6                              | 2.61                                       | 0.016                               | 2.530                        |
| 19 | 90           | 1682.3                                    | 669.3                              | 2.45                                       | 0.015                               | 2.377                        |
| 21 | 100          | 1653.3                                    | 640.3                              | 2.30                                       | 0.012                               | 2.242                        |
| 23 | 110          | 1629.9                                    | 616.9                              | 2.18                                       | 0.026                               | 2.053                        |
| 25 | 120          | 1580.0                                    | 567.0                              | 1.92                                       | 0.012                               | 1.866                        |
| 27 | 130          | 1557.4                                    | 544.4                              | 1.81                                       | 0.012                               | 1.749                        |
| 29 | 140          | 1534.9                                    | 521.9                              | 1.69                                       | 0.013                               | 1.628                        |
| 31 | 150          | 1510.4                                    | 497.4                              | 1.57                                       | 0.008                               | 1.526                        |
| 33 | 160          | 1495.2                                    | 482.2                              | 1.49                                       | 0.009                               | 1.440                        |
| 35 | 170          | 1476.9                                    | 463.9                              | 1.39                                       | 0.010                               | 1.344                        |
| 37 | 180          | 1458.2                                    | 445.2                              | 1.30                                       | 0.007                               | 1.260                        |
| 39 | 190          | 1444.2                                    | 431.2                              | 1.22                                       | 0.007                               | 1.189                        |
| 41 | 200          | 1430.9                                    | 417.9                              | 1.16                                       | 0.008                               | 1.117                        |
| 43 | 210          | 1416.3                                    | 403.3                              | 1.08                                       | 0.011                               | 1.024                        |
| 45 | 220          | 1394.5                                    | 381.5                              | 0.97                                       | 0.007                               | 0.931                        |
| 47 | 230          | 1380.3                                    | 367.3                              | 0.89                                       | 0.011                               | 0.840                        |
| 49 | 240          | 1359.3                                    | 346.3                              | 0.79                                       | 0.008                               | 0.744                        |
| 51 | 250          | 1343.1                                    | 330.1                              | 0.70                                       | 0.004                               | 0.681                        |
| 53 | 260          | 1334.9                                    | 321.9                              | 0.66                                       | 0.007                               | 0.623                        |
| 55 | 270          | 1320.6                                    | 307.6                              | 0.59                                       | 0.003                               | 0.573                        |
| 57 | 280          | 1315.5                                    | 302.5                              | 0.56                                       | 0.003                               | 0.545                        |
| 59 | 290          | 1309.5                                    | 296.5                              | 0.53                                       | 0.005                               | 0.503                        |
| 61 | 300          | 1299.3                                    | 286.3                              | 0.48                                       | 0.003                               | 0.462                        |



|    |     |        |       |      |       |       |
|----|-----|--------|-------|------|-------|-------|
| 63 | 310 | 1293.5 | 280.5 | 0.45 | 0.002 | 0.436 |
| 65 | 320 | 1289.3 | 276.3 | 0.42 | 0.005 | 0.401 |
| 67 | 330 | 1280.2 | 267.2 | 0.38 | 0.004 | 0.359 |
| 69 | 340 | 1273.0 | 260.0 | 0.34 | 0.001 | 0.334 |
| 71 | 350 | 1270.2 | 257.2 | 0.33 | 0.033 | 0.163 |

SB = 1013 S = 193.91

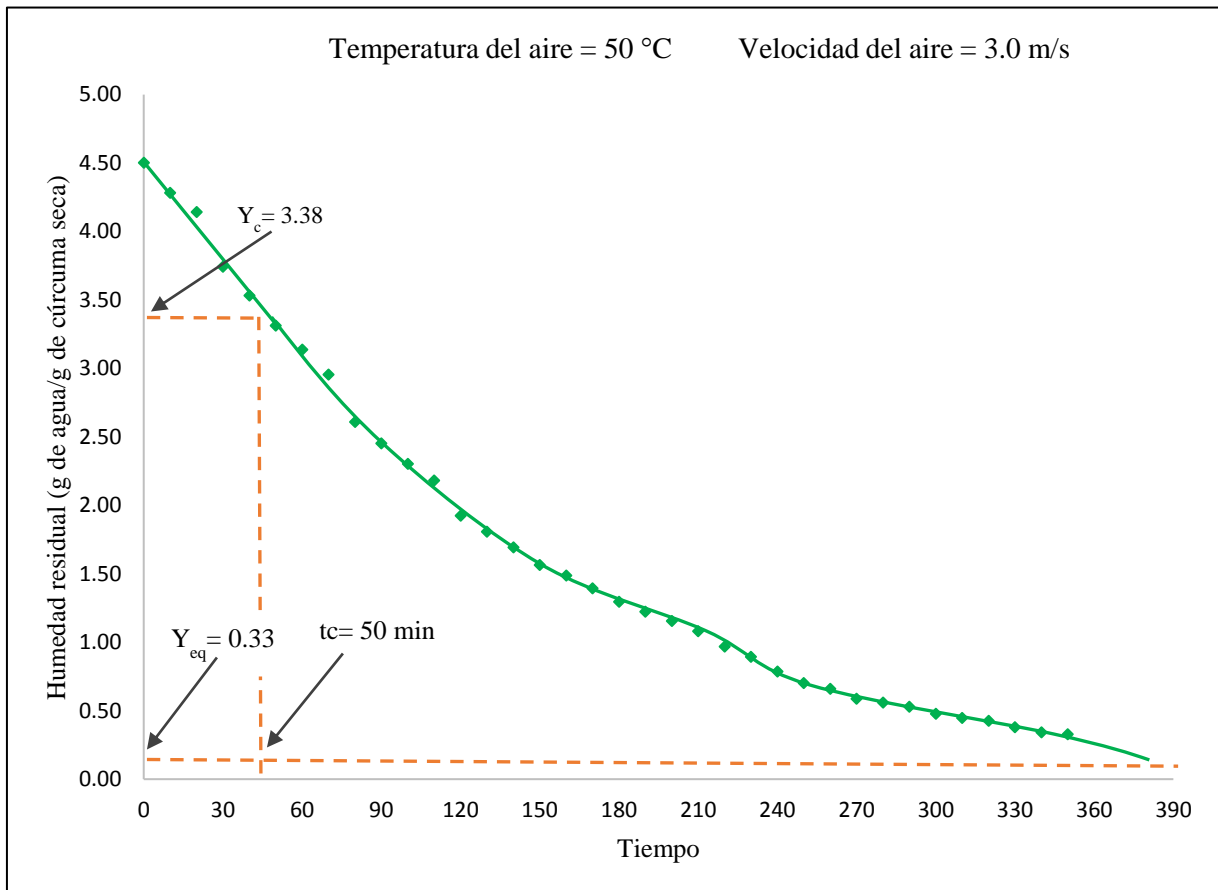


Figura 18. Humedad residual en función del tiempo (T = 45 °C, velocidad 3.0 m/s).

**Análisis de regresión lineal con el SPSS (T = 45 °C; velocidad = 3.0 m/s)**

Tabla 28

*Resumen modelo de regresión lineal (T = 45 °C; velocidad = 3.0 m/s).*

| R     | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación |
|-------|------------|---------------------|---------------------------------|
| 0,993 | 0.987      | 0.983               | 0.05992                         |

La variable independiente es Tiempo

Tabla 29

*Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión lineal (T = 45 °C; velocidad = 3.0 m/s).*

|           | Suma de cuadrados | Gl | Media cuadrática | F       | Sig.  |
|-----------|-------------------|----|------------------|---------|-------|
| Regresión | 1.057             | 1  | 1.057            | 294.271 | 0,000 |
| Residuo   | 0.014             | 4  | 0.004            |         |       |
| Total     | 1.071             | 5  |                  |         |       |

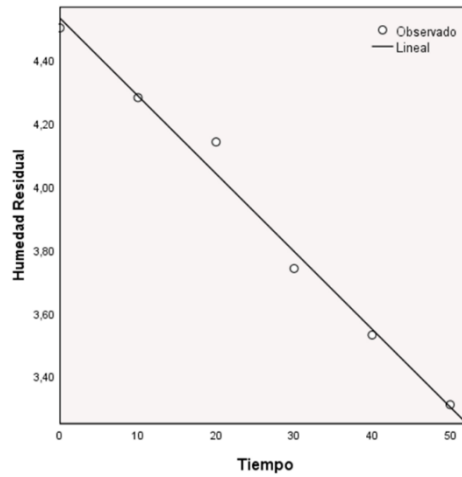
La variable independiente es Tiempo

Tabla 30

*Coefficientes de la ecuación lineal (T = 45 °C; velocidad = 3.0 m/s).*

|             | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados | t       | Sig.  |
|-------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|---------|-------|
|             | B                              | Desv. Error | Beta                        |         |       |
| (Constante) | 4.531                          | 0.043       |                             | 104.478 | 0.000 |
| Tiempo      | -0.025                         | 0.001       | -0.993                      | -17.154 | 0.000 |

La ecuación de la línea recta será de la forma:  $y = -0,025x + 4,531$



**Figura 19.** Representación de los datos experimentales (O) y de la línea recta (-) generada por el SPSS. ( $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.0 m/s).

### **Análisis de regresión exponencial con SPSS ( $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , velocidad = 3,0 m/s)**

Tabla 31

*Resumen del modelo de regresión exponencial ( $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.0 m/s).*

| R     | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación |
|-------|------------|---------------------|---------------------------------|
| 0.999 | 0.997      | 0.997               | 0.037                           |

La variable independiente es Tiempo

Tabla 32

*Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión exponencial ( $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.0 m/s).*

|           | Suma de cuadrados | Gl | Media cuadrática | F        | Sig.  |
|-----------|-------------------|----|------------------|----------|-------|
| Regresión | 13.745            | 1  | 13.745           | 9793.302 | 0.000 |
| Residuo   | 0.039             | 28 | 0.001            |          |       |
| Total     | 13.784            | 29 |                  |          |       |

La variable independiente es Tiempo.

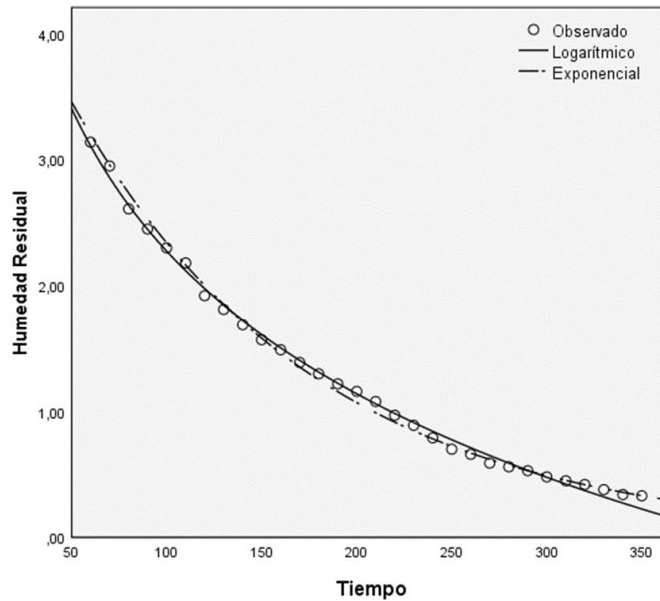
Tabla 33

*Coefficientes de la ecuación exponencial (T = 45 °C; velocidad = 3.0 m/s).*

|             | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados | t       | Sig.  |
|-------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|---------|-------|
|             | B                              | Desv. Error | Beta                        |         |       |
| Tiempo      | -0.008                         | 0.000       | -0.999                      | -98.961 | 0.000 |
| (Constante) | 5.116                          | 0.090       |                             | 56.868  | 0.000 |

La variable dependiente es ln(Humedad residual)

La ecuación de la curva exponencial será de la forma:  $y = 5.116e^{(-0,008x)}$



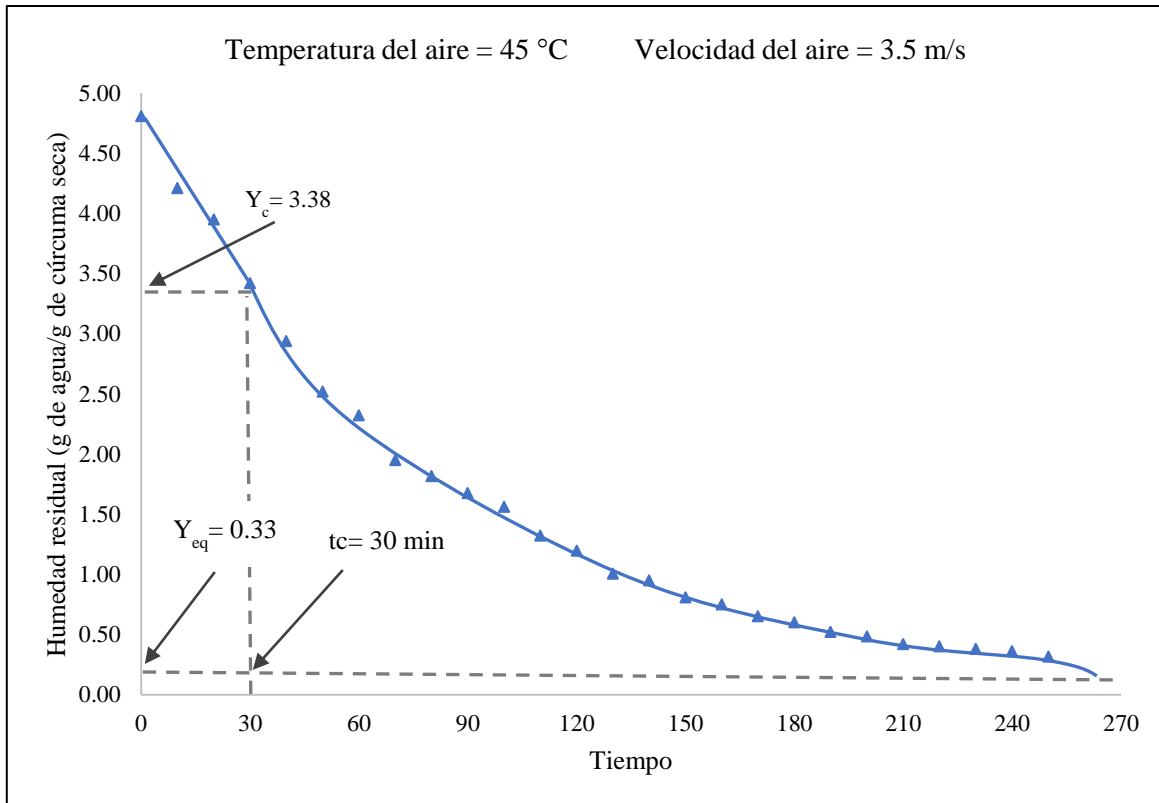
**Figura 20.** Representación de los datos experimentales (0), de la curva logarítmica (-) y de la curva exponencial (-.) generada por el SPSS. La curva exponencial es la más representativa. (T = 55 °C; velocidad = 3.0 m/s).

Tabla 34

*Datos experimentales de la operación de secado de rodajas de cúrcuma, en un secador de bandejas con flujo de aire a 45°C y velocidad de 3,5 m/s.*

| Nº | t<br>tiempo<br>(min) | P <sub>1</sub><br>Peso<br>estructura<br>+ cúrcuma<br>al tiempo t<br>(g) | P <sub>2</sub> =P <sub>1</sub> -SB<br>Peso<br>rodajas al<br>tiempo t<br>(g) | (P <sub>2</sub> -S)/S<br>Humedad<br>residual (g<br>agua / g<br>cúrcuma<br>seca) | Dy/dt (g<br>agua / g<br>cúrcuma<br>seca.min) | Y <sub>m</sub> (g<br>agua / g<br>cúrcuma<br>seca) |
|----|----------------------|---|---|---|--|---|
| 1  | 0                    | 1896.2  | 883.2   | 4.81  | 0.029  | 4.51  |
| 3  | 10                   | 1805.1  | 792.1   | 4.21  | 0.026  | 4.08  |
| 5  | 20                   | 1765.5  | 752.5   | 3.95  | 0.030  | 3.68  |
| 7  | 30                   | 1685.1  | 672.1   | 3.42  | 0.048  | 3.18  |
| 9  | 40                   | 1612.2  | 599.2   | 2.94  | 0.042  | 2.73  |
| 11 | 50                   | 1548.3  | 535.3   | 2.52  | 0.020  | 2.42  |
| 13 | 60                   | 1518.3  | 505.3   | 2.32  | 0.037  | 2.14  |
| 15 | 70                   | 1461.5  | 448.5   | 1.95  | 0.013  | 1.88  |
| 17 | 80                   | 1441.4  | 428.4   | 1.82  | 0.014  | 1.75  |
| 19 | 90                   | 1420.0  | 407.0   | 1.68  | 0.012  | 1.62  |
| 21 | 100                  | 1402.5  | 389.5   | 1.56  | 0.024  | 1.44  |
| 23 | 110                  | 1366.1  | 353.1   | 1.32  | 0.012  | 1.26  |
| 25 | 120                  | 1347.2  | 334.2   | 1.20  | 0.019  | 1.10  |
| 27 | 130                  | 1317.9  | 304.9   | 1.01  | 0.005  | 0.98  |
| 29 | 140                  | 1309.7  | 296.7   | 0.95  | 0.014  | 0.88  |
| 31 | 150                  | 1288.1  | 275.1   | 0.81  | 0.006  | 0.78  |
| 33 | 160                  | 1279.1  | 266.1   | 0.75  | 0.010  | 0.70  |
| 35 | 170                  | 1264.1  | 251.1   | 0.65  | 0.005  | 0.63  |
| 37 | 180                  | 1256.6  | 243.6   | 0.60  | 0.008  | 0.56  |
| 39 | 190                  | 1244.5  | 231.5   | 0.52  | 0.004  | 0.50  |
| 41 | 200                  | 1238.8  | 225.8   | 0.48  | 0.006  | 0.45  |
| 43 | 210                  | 1229.3  | 216.3   | 0.42  | 0.002  | 0.41  |
| 45 | 220                  | 1226.4  | 213.4   | 0.40  | 0.001  | 0.39  |
| 47 | 230                  | 1222.9  | 209.9   | 0.38  | 0.002  | 0.37  |
| 49 | 240                  | 1220.3  | 207.3   | 0.36  | 0.004  | 0.34  |
| 51 | 250                  | 1213.5  | 200.5   | 0.32  | 0.032  | 0.16  |

SB = 1013 S = 152,06



**Figura 21.** Humedad residual en función del tiempo ( $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , velocidad = 3.5 m/s).

**Análisis de regresión lineal con el SPSS ( $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.5 m/s)**

Tabla 35

*Resumen modelo de regresión lineal ( $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.5 m/s).*

| R     | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación |
|-------|------------|---------------------|---------------------------------|
| 0,990 | 0,980      | 0,970               | 0,0996                          |

La variable independiente es Tiempo

Tabla 36

Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión lineal ( $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.5 m/s).

|           | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F      | Sig.  |
|-----------|-------------------|----|------------------|--------|-------|
| Regresión | 0.981             | 1  | 0.981            | 98.966 | 0,010 |
| Residuo   | 0.020             | 2  | 0.010            |        |       |
| Total     | 1.001             | 3  |                  |        |       |

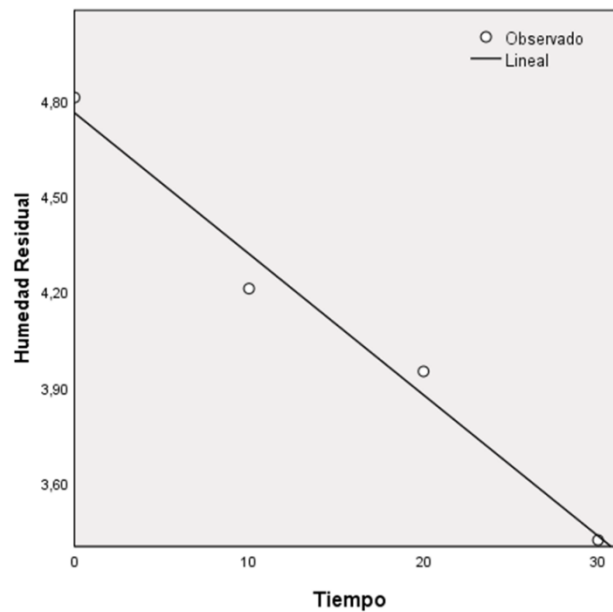
La variable independiente es Tiempo

Tabla 37

Coefficientes de la ecuación lineal ( $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.5 m/s).

|             | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados | t      | Sig.  |
|-------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|--------|-------|
|             | B                              | Desv. Error | Beta                        |        |       |
| (Constante) | 4.762                          | 0.083       |                             | 57.160 | 0.000 |
| Tiempo      | -0.044                         | 0.004       | -0.990                      | -9.948 | 0.010 |

La ecuación de la línea recta será de la forma:  $y = -0,044x + 4,762$



**Figura 22.** Representación de los datos experimentales (0) y de la línea recta (-) generada por el SPSS. ( $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.5 m/s).

**Análisis de regresión logarítmica con el SPSS (T = 45 °C; velocidad = 3.5 m/s)**

Tabla 38

*Resumen del modelo de regresión logarítmica (T = 45 °C; velocidad = 3.5 m/s).*

| R     | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación |
|-------|------------|---------------------|---------------------------------|
| 0.995 | 0.990      | 0.990               | 0.078                           |

La variable independiente es Tiempo.

Tabla 39

*Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión logarítmica (T = 45 °C; velocidad = 3.5 m/s).*

|           | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F        | Sig.  |
|-----------|-------------------|----|------------------|----------|-------|
| Regresión | 12.627            | 1  | 12.627           | 2078.773 | 0.000 |
| Residuo   | 0.121             | 20 | 0.006            |          |       |
| Total     | 12.749            | 21 |                  |          |       |

La variable independiente es el tiempo

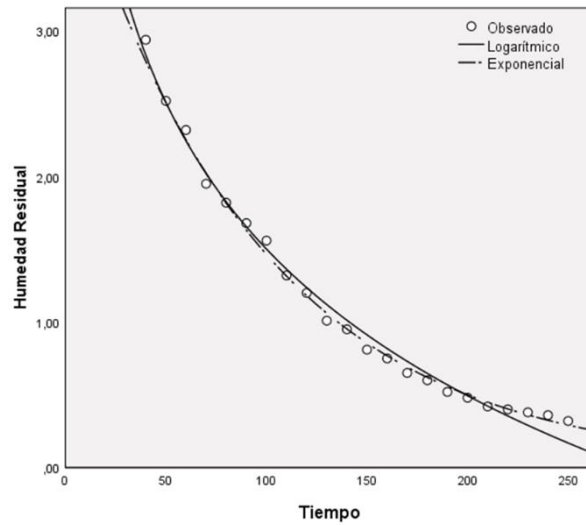
Tabla 40

*Coefficientes de la ecuación logarítmica (T = 45 °C; velocidad = 3.5 m/s).*

|             | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados | t       | Sig.  |
|-------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|---------|-------|
|             | B                              | Desv. Error | Beta                        |         |       |
| ln(Tiempo)  | -1.455                         | 0.032       | -0.995                      | -45.594 | 0.000 |
| (Constante) | 8.201                          | 0.156       |                             | 52.613  | 0.000 |

La ecuación de la curva logarítmica será de la forma  $y = -1,455 \ln(x) + 8,201$





**Figura 23.** Representación de los datos experimentales (0), de la curva logarítmica (-) y de la curva exponencial (-.) generada por el SPSS. La curva logarítmica es la más representativa (T = 45 °C; velocidad = 3.5 m/s).

## ANEXO 09

### Resultados de los datos experimentales de secado de rodajas de cúrcuma realizados con aire a T = 50 °C y velocidades de 2,5, 3,0, 3,5 m/s.

Tabla 41

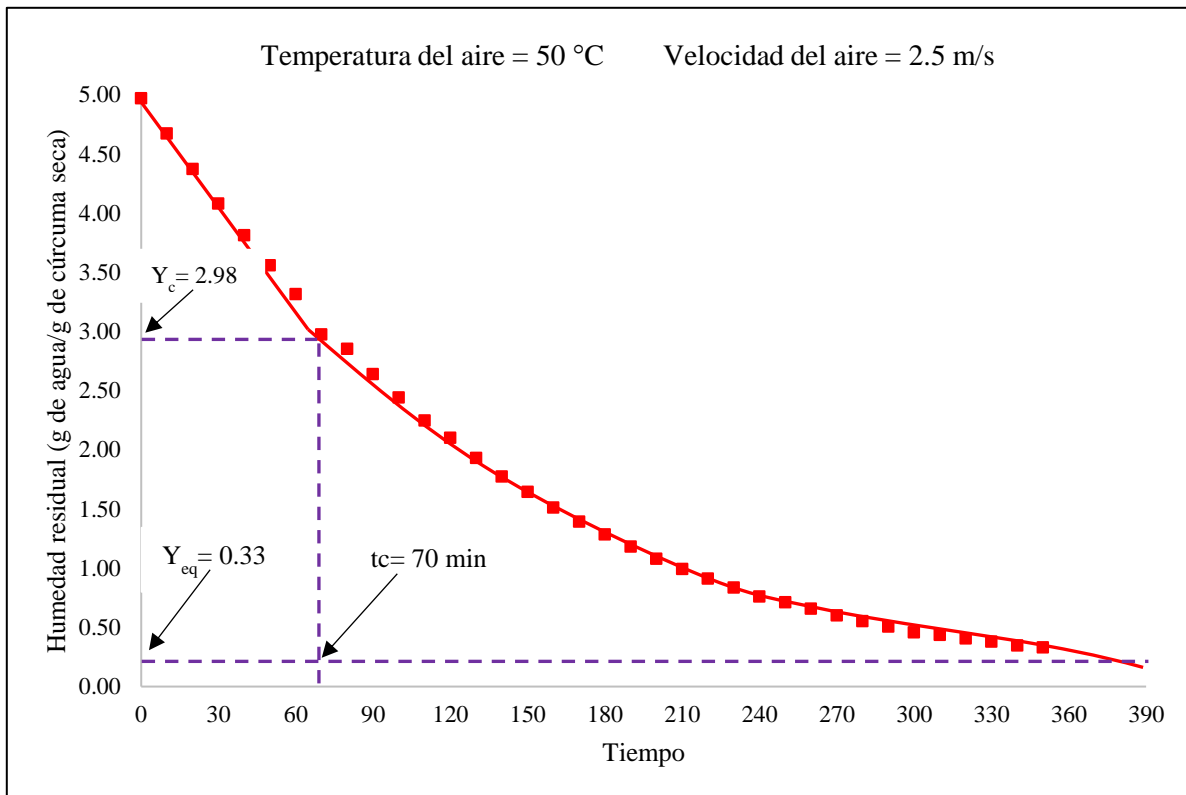
*Datos experimentales de la operación de secado de rodajas de cúrcuma, en un secador de bandejas con flujo de aire a 50 °C y velocidad de 2,5 m/s.*

| Nº | t<br>tiempo<br>(min) | P <sub>1</sub><br>Peso<br>estructura<br>+ cúrcuma<br>al tiempo t<br>(g) | P <sub>2</sub> =P <sub>1</sub> -SB<br>Peso<br>rodajas al<br>tiempo t<br>(g) | (P <sub>2</sub> -S)/S<br>Humedad<br>residual (g<br>agua / g<br>cúrcuma<br>seca) | Dy/dt (g<br>agua / g<br>cúrcuma<br>seca.min) | Y <sub>m</sub> (g<br>agua / g<br>cúrcuma<br>seca) |
|----|----------------------|---|---|---|--|---|
| 1  | 0                    | 2083.4  | 1070.4  | 4.97  | 0.030  | 4.820   |
| 3  | 10                   | 2030  | 1017.0  | 4.67  | 0.030  | 4.522   |
| 5  | 20                   | 1976.4  | 963.4   | 4.37  | 0.029  | 4.227   |
| 7  | 30                   | 1924.2  | 911.2   | 4.08  | 0.027  | 3.947   |
| 9  | 40                   | 1875.9  | 862.9   | 3.81  | 0.025  | 3.685   |
| 11 | 50                   | 1830.4  | 817.4   | 3.56  | 0.024  | 3.436   |
| 13 | 60                   | 1786.7  | 773.7   | 3.31  | 0.034  | 3.145   |
| 15 | 70                   | 1725.8  | 712.8   | 2.98  | 0.012  | 2.914   |
| 17 | 80                   | 1703.8  | 690.8   | 2.85  | 0.021  | 2.746   |

|    |     |        |       |      |       |       |
|----|-----|--------|-------|------|-------|-------|
| 19 | 90  | 1665.5 | 652.5 | 2.64 | 0.020 | 2.540 |
| 21 | 100 | 1630   | 617.0 | 2.44 | 0.019 | 2.344 |
| 23 | 110 | 1595.4 | 582.4 | 2.25 | 0.015 | 2.175 |
| 25 | 120 | 1569.2 | 556.2 | 2.10 | 0.017 | 2.016 |
| 27 | 130 | 1538.5 | 525.5 | 1.93 | 0.016 | 1.852 |
| 29 | 140 | 1510.4 | 497.4 | 1.77 | 0.013 | 1.709 |
| 31 | 150 | 1487   | 474.0 | 1.64 | 0.013 | 1.578 |
| 33 | 160 | 1463.4 | 450.4 | 1.51 | 0.012 | 1.451 |
| 35 | 170 | 1441.8 | 428.8 | 1.39 | 0.011 | 1.338 |
| 37 | 180 | 1422.8 | 409.8 | 1.29 | 0.010 | 1.233 |
| 39 | 190 | 1404.1 | 391.1 | 1.18 | 0.010 | 1.130 |
| 41 | 200 | 1385.7 | 372.7 | 1.08 | 0.009 | 1.035 |
| 43 | 210 | 1370.2 | 357.2 | 0.99 | 0.008 | 0.951 |
| 45 | 220 | 1355.5 | 342.5 | 0.91 | 0.007 | 0.873 |
| 47 | 230 | 1342.2 | 329.2 | 0.84 | 0.008 | 0.798 |
| 49 | 240 | 1328.5 | 315.5 | 0.76 | 0.005 | 0.736 |
| 51 | 250 | 1320   | 307.0 | 0.71 | 0.006 | 0.684 |
| 53 | 260 | 1310   | 297.0 | 0.66 | 0.006 | 0.628 |
| 55 | 270 | 1300   | 287.0 | 0.60 | 0.005 | 0.575 |
| 57 | 280 | 1291   | 278.0 | 0.55 | 0.004 | 0.528 |
| 59 | 290 | 1283.1 | 270.1 | 0.51 | 0.005 | 0.481 |
| 61 | 300 | 1274.2 | 261.2 | 0.46 | 0.002 | 0.446 |
| 63 | 310 | 1270.4 | 257.4 | 0.44 | 0.003 | 0.421 |
| 65 | 320 | 1265.2 | 252.2 | 0.41 | 0.003 | 0.392 |
| 67 | 330 | 1260   | 247.0 | 0.38 | 0.003 | 0.362 |
| 69 | 340 | 1254.5 | 241.5 | 0.35 | 0.002 | 0.338 |
| 71 | 350 | 1251.3 | 238.3 | 0.33 | 0.002 | 0.320 |

---

SB = 1013 S = 179.32



**Figura 24.** Humedad residual en función del tiempo ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , velocidad 2.5 (m/s)).

**Análisis de regresión lineal con SPSS ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 2.5 m/s)**

Tabla 42

*Resumen de modelo de regresión lineal ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 2.5 m/s).*

| R     | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación |
|-------|------------|---------------------|---------------------------------|
| 0,999 | 0.999      | 0.999               | 0.02530                         |

La variable independiente es Tiempo

Tabla 43

Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión lineal ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 2.5 m/s).

|           | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F        | Sig.  |
|-----------|-------------------|----|------------------|----------|-------|
| Regresión | 3.268             | 1  | 3.268            | 5106.650 | 0,000 |
| Residuo   | 0.004             | 6  | 0.001            |          |       |
| Total     | 3.271             | 7  |                  |          |       |

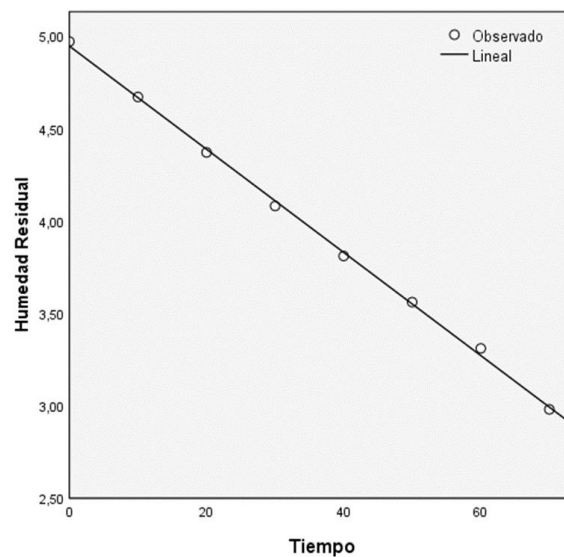
La variable independiente es Tiempo

Tabla 44

Coefficientes de la ecuación lineal ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 2.5 m/s).

|             | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados | t       | Sig.  |
|-------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|---------|-------|
|             | B                              | Desv. Error | Beta                        |         |       |
| (Constante) | 4.945                          | 0.016       |                             | 302.846 | 0.000 |
| Tiempo      | -0.028                         | 0.000       | -0.999                      | -71.461 | 0.000 |

La ecuación de la línea recta será de la forma:  $y = -0,028x + 4,945$



**Figura 25.** Representación de los datos experimentales (0) y de la línea recta (-) generada por el SPSS. ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 2.5 m/s).

**Análisis de regresión logarítmica con SPSS (T = 50 °C; velocidad = 2.5 m/s)**

Tabla 45

*Resumen del modelo de regresión logarítmica (T = 50 °C; velocidad = 2.5 m/s).*

| R     | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación |
|-------|------------|---------------------|---------------------------------|
| 0.996 | 0.992      | 0.991               | 0.070                           |

La variable independiente es Tiempo.

Tabla 46

*Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión logarítmica (T = 50 °C; velocidad = 2.5 m/s).*

|           | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F        | Sig.  |
|-----------|-------------------|----|------------------|----------|-------|
| Regresión | 15.453            | 1  | 15.453           | 3119.079 | 0.000 |
| Residuo   | 0.129             | 26 | 0.005            |          |       |
| Total     | 15.581            | 27 |                  |          |       |

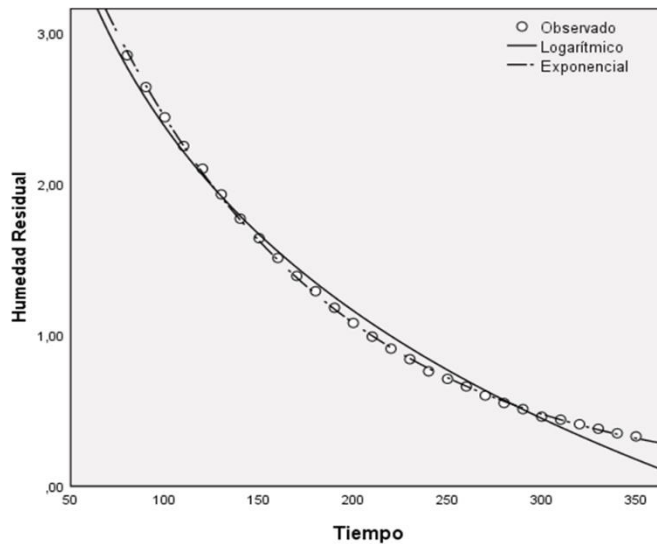
La variable independiente es Tiempo.

Tabla 47

*Coefficientes de la ecuación logarítmica (T = 50 °C; velocidad = 2.5 m/s).*

|             | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados | t       | Sig.  |
|-------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|---------|-------|
|             | B                              | Desv. Error | Beta                        |         |       |
| ln(Tiempo)  | -1.757                         | 0.031       | -0.996                      | -55.849 | 0.000 |
| (Constante) | 10.469                         | 0.167       |                             | 62.726  | 0.000 |

La ecuación de la curva logarítmica será de la forma:  $y = -1.757 \ln(x) + 10.469$



**Figura 26.** Representación de los datos experimentales (0), de la curva logarítmica (-) y de la curva exponencial (-.) generada por el SPSS. La curva logarítmica es la más representativa (T = 50°C; velocidad = 2.5 m/s).

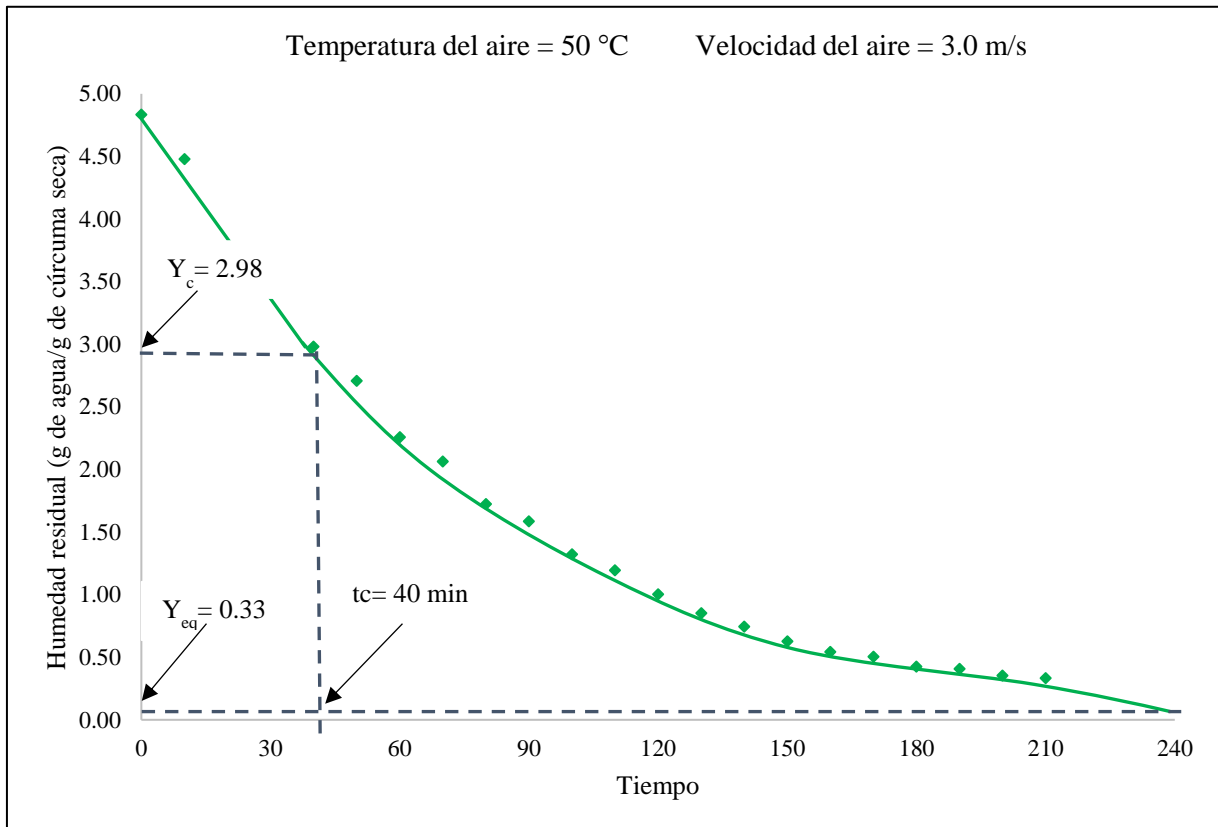
Tabla 48

*Datos experimentales de la operación de secado de rodajas de cúrcuma, en un secador de bandejas con flujo de aire a 50 °C y velocidad de 3,0 m/s.*

| N° | t<br>tiempo<br>(min) | P <sub>1</sub>  | P <sub>2</sub> =P <sub>1</sub> -SB    | (P <sub>2</sub> -S)/S                                  | Dy/dt (g<br>agua / g<br>cúrcuma<br>seca.min) | Y <sub>m</sub> (g<br>agua / g<br>cúrcuma<br>seca) |
|----|----------------------|---|---------------------------------------|--|--|---|
|    |                      | Peso<br>estructura<br>+ cúrcuma<br>al tiempo t<br>(g) | Peso<br>rodajas al<br>tiempo t<br>(g) | Humedad<br>residual (g<br>agua / g<br>cúrcuma<br>seca) |  |   |
| 1  | 0                    | 1947.1  | 934.1                                 | 4.8  | 0.04   | 4.656   |
| 2  | 10                   | 1890  | 877                                   | 4.5  | 0.07   | 4.129   |
| 3  | 20                   | 1778.3  | 765.3                                 | 3.8  | 0.03   | 3.629   |
| 4  | 30                   | 1730.1  | 717.1                                 | 3.5  | 0.05   | 3.230   |
| 5  | 40                   | 1650.3  | 637.3                                 | 3.0  | 0.03   | 2.844   |
| 6  | 50                   | 1606.5  | 593.5                                 | 2.7  | 0.05   | 2.482   |
| 7  | 60                   | 1534.4  | 521.4                                 | 2.3  | 0.02   | 2.160   |
| 8  | 70                   | 1503.5  | 490.5                                 | 2.1  | 0.03   | 1.894   |
| 9  | 80                   | 1449.1  | 436.1                                 | 1.7  | 0.01   | 1.654   |
| 10 | 90                   | 1426.9  | 413.9                                 | 1.6  | 0.03   | 1.454   |
| 11 | 100                  | 1384.9  | 371.9                                 | 1.3  | 0.01   | 1.258   |
| 12 | 110                  | 1364.1  | 351.1                                 | 1.2  | 0.02   | 1.098   |

|    |     |        |       |     |      |       |
|----|-----|--------|-------|-----|------|-------|
| 13 | 120 | 1333.8 | 320.8 | 1.0 | 0.02 | 0.928 |
| 14 | 130 | 1309.5 | 296.5 | 0.9 | 0.01 | 0.798 |
| 15 | 140 | 1292.1 | 279.1 | 0.7 | 0.01 | 0.685 |
| 16 | 150 | 1273.5 | 260.5 | 0.6 | 0.01 | 0.584 |
| 17 | 160 | 1259.8 | 246.8 | 0.5 | 0.00 | 0.523 |
| 18 | 170 | 1253.9 | 240.9 | 0.5 | 0.00 | 0.465 |
| 19 | 180 | 1241.1 | 228.1 | 0.4 | 0.00 | 0.416 |
| 20 | 190 | 1238.2 | 225.2 | 0.4 | 0.00 | 0.379 |
| 21 | 200 | 1229.5 | 216.5 | 0.4 | 0.00 | 0.343 |
| 22 | 210 | 1226.4 | 213.4 | 0.3 | 0.03 | 0.166 |

SB = 1013 S = 160.11



**Figura 27.** Humedad residual en función del tiempo (T = 50 °C, velocidad 3.0 m/s).

**Análisis de regresión lineal con SPSS (T = 50 °C; velocidad = 3.0m/s)**

Tabla 49

*Resumen de modelo de regresión lineal (T = 50 °C; velocidad = 3.0 m/s).*

| R     | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación |
|-------|------------|---------------------|---------------------------------|
| 0,993 | 0.987      | 0.983               | 0.09832                         |

La variable independiente es Tiempo.

Tabla 50

*Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión lineal (T = 50 °C; velocidad = 3.0 m/s).*

|           | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F       | Sig.  |
|-----------|-------------------|----|------------------|---------|-------|
| Regresión | 2.209             | 1  | 2.209            | 228.517 | 0,001 |
| Residuo   | 0.029             | 3  | 0.010            |         |       |
| Total     | 2.238             | 4  |                  |         |       |

La variable independiente es Tiempo

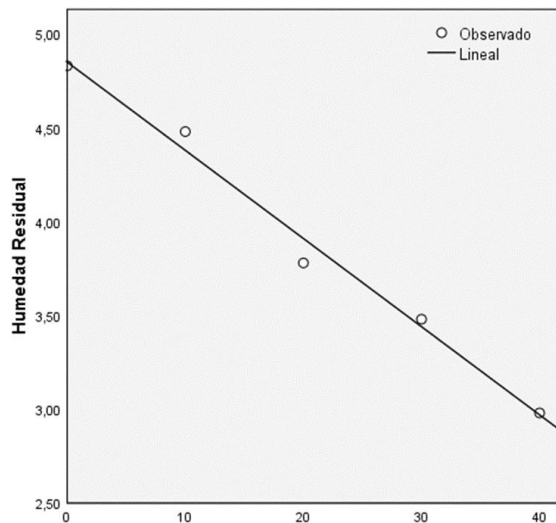
Tabla 51

*Coefficientes de la ecuación lineal (T = 50 °C; velocidad = 3.0 m/s).*

|             | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados | t       | Sig.  |
|-------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|---------|-------|
|             | B                              | Desv. Error | Beta                        |         |       |
| (Constante) | 4.850                          | 0.076       |                             | 63.684  | 0.000 |
| Tiempo      | -0.047                         | 0.003       | -0.993                      | -15.117 | 0.001 |

La ecuación de la línea recta será de la forma:  $y = -0,047x + 4,850$





**Figura 28.** Representación de los datos experimentales (0) y de la línea recta (-) generada por el SPSS. ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.0 m/s).

### **Análisis de regresión exponencial con SPSS ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.0 m/s)**

Tabla 52

*Resumen del modelo de regresión exponencial ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.0 m/s).*

| R     | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación |
|-------|------------|---------------------|---------------------------------|
| 0.997 | 0.995      | 0.995               | 0.050                           |

La variable independiente es Tiempo.

Tabla 53

*Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión exponencial ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.0 m/s).*

|           | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F        | Sig.  |
|-----------|-------------------|----|------------------|----------|-------|
| Regresión | 7.555             | 1  | 7.555            | 2983.814 | 0.000 |
| Residuo   | 0.038             | 15 | 0.003            |          |       |
| Total     | 7.593             | 16 |                  |          |       |

La variable independiente es Tiempo.

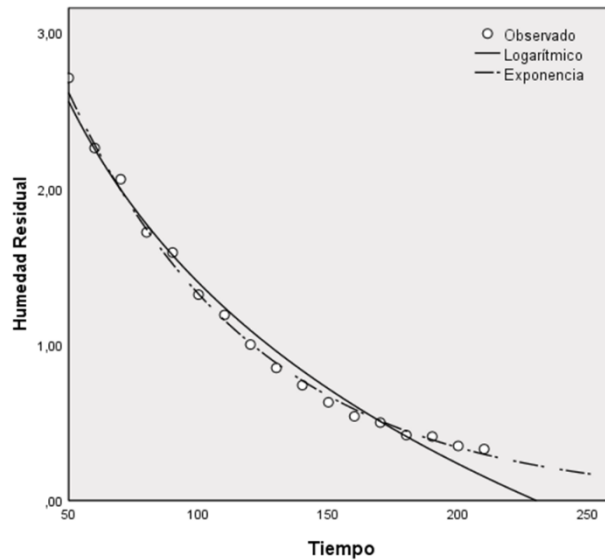
Tabla 54

*Coefficientes de la ecuación exponencial (T = 50 °C; velocidad = 3.0 m/s).*

|             | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados |         |       |
|-------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|---------|-------|
|             | B                              | Desv. Error | Beta                        | t       | Sig.  |
| Tiempo      | -0.014                         | 0.000       | -0.997                      | -54.624 | 0.000 |
| (Constante) | 5.165                          | 0.179       |                             | 28.896  | 0.000 |

La variable dependiente es ln(Humedad residual).

La ecuación de la curva exponencial será de la forma:  $y = 5,165e^{(-0.014x)}$



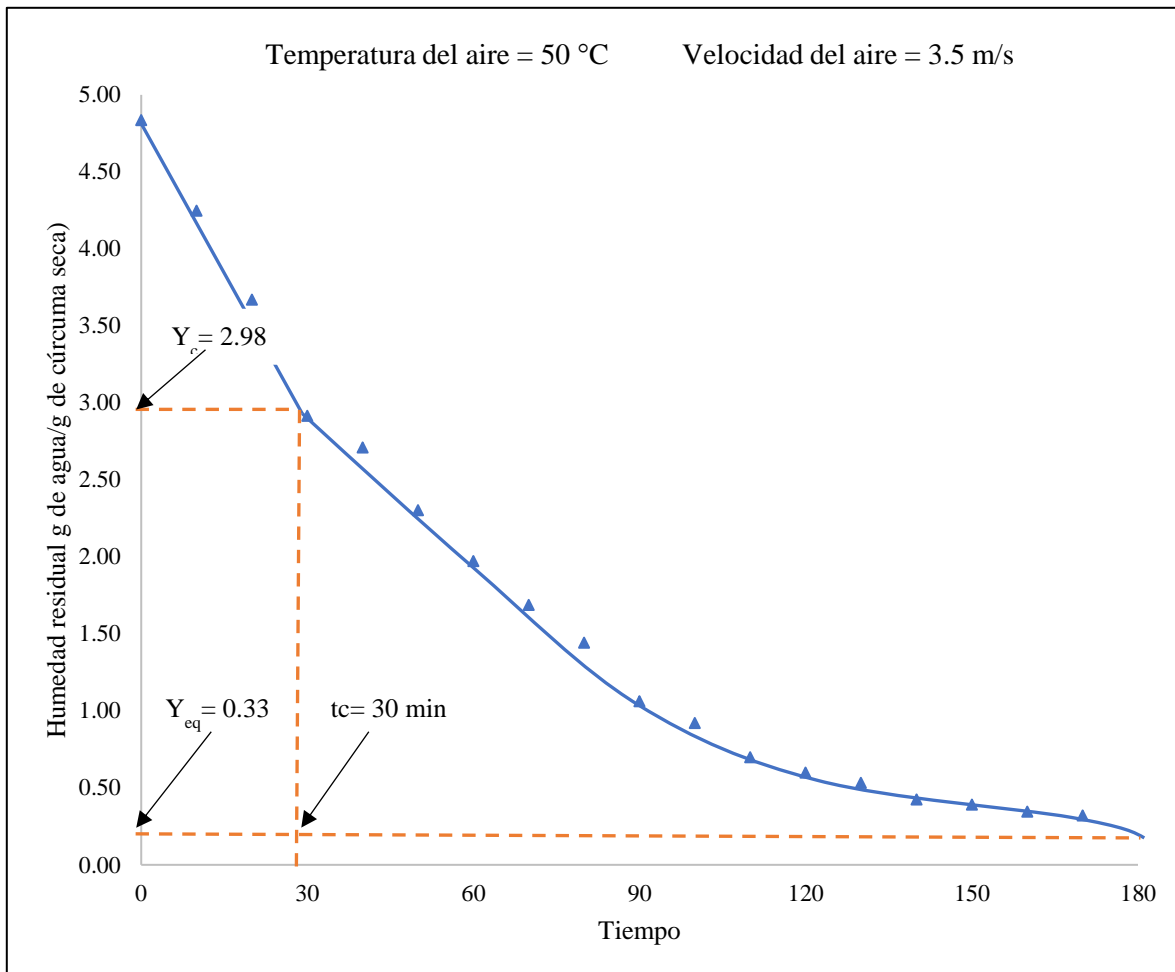
**Figura 29.** Representación de los datos experimentales (0), de la curva logarítmica (-) y de la curva exponencial (-.) generada por el SPSS. La curva exponencial es la más representativa. (T = 55°C; velocidad = 3.0 m/s).

Tabla 55

*Datos experimentales de la operación de secado de rodajas de cúrcuma, en un secador de bandejas con flujo de aire a 50 °C y velocidad de 3,5 m/s.*

| N° | t<br>tiempo<br>(min) | P <sub>1</sub><br>Peso<br>estructura<br>+ cúrcuma<br>al tiempo t<br>(g) | P <sub>2</sub> =P <sub>1</sub> -SB<br>Peso<br>rodajas al<br>tiempo t<br>(g) | (P <sub>2</sub> -S)/S<br>Humedad<br>residual (g<br>agua / g<br>cúrcuma<br>seca) | Dy/dt (g<br>agua / g<br>cúrcuma<br>seca.min) | Y <sub>m</sub> (g<br>agua / g<br>cúrcuma<br>seca) |
|----|----------------------|---|---|---|--|---|
| 1  | 0                    | 1915.6  | 902.6   | 4.8   | 0.02   | 4.541   |
| 2  | 10                   | 1824.5  | 811.5   | 4.2   | 0.03   | 3.958   |
| 3  | 20                   | 1735.1  | 722.1   | 3.7   | 0.03   | 3.292   |
| 4  | 30                   | 1618.5  | 605.5   | 2.9   | 0.02   | 2.813   |
| 5  | 40                   | 1586.9  | 573.9   | 2.7   | 0.04   | 2.507   |
| 6  | 50                   | 1523.9  | 510.9   | 2.3   | 0.03   | 2.137   |
| 7  | 60                   | 1472.6  | 459.6   | 2.0   | 0.03   | 1.830   |
| 8  | 70                   | 1428.8  | 415.8   | 1.7   | 0.02   | 1.565   |
| 9  | 80                   | 1390.6  | 377.6   | 1.4   | 0.04   | 1.252   |
| 10 | 90                   | 1331.9  | 318.9   | 1.1   | 0.01   | 0.991   |
| 11 | 100                  | 1309.9  | 296.9   | 0.9   | 0.02   | 0.809   |
| 12 | 110                  | 1275.6  | 262.6   | 0.7   | 0.01   | 0.648   |
| 13 | 120                  | 1260.1  | 247.1   | 0.6   | 0.01   | 0.565   |
| 14 | 130                  | 1250.1  | 237.1   | 0.5   | 0.01   | 0.478   |
| 15 | 140                  | 1233.2  | 220.2   | 0.4   | 0.00   | 0.408   |
| 16 | 150                  | 1228.2  | 215.2   | 0.4   | 0.00   | 0.368   |
| 17 | 160                  | 1221  | 208   | 0.3   | 0.00   | 0.332   |
| 18 | 170                  | 1217.1  | 204.1   | 0.3   | 0.03   | 0.160   |

SB = 1013 S = 154.67



**Figura 30.** Humedad residual en función del tiempo ( $T = 50\text{ °C}$ , velocidad = 3.5 m/s).

**Análisis de regresión lineal con SPSS ( $T = 50\text{ °C}$ ; velocidad = 3.5 m/s)**

Tabla 56

*Resumen de modelo de regresión lineal ( $T = 50\text{ °C}$ ; velocidad = 3.5 m/s).*

| R     | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación |
|-------|------------|---------------------|---------------------------------|
| 0,998 | 0.996      | 0.993               | 0.06719                         |

La variable independiente es Tiempo.

Tabla 57

Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión lineal ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.5 m/s).

|           | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F       | Sig. |
|-----------|-------------------|----|------------------|---------|------|
| Regresión | 2.029             | 1  | 2.029            | 449.357 | ,002 |
| Residuo   | 0.009             | 2  | 0.005            |         |      |
| Total     | 2.038             | 3  |                  |         |      |

La variable independiente es Tiempo.

Tabla 58

Coefficientes de la ecuación lineal ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.5 m/s).

|             | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados | t       | Sig.  |
|-------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|---------|-------|
|             | B                              | Desv. Error | Beta                        |         |       |
| (Constante) | 4.873                          | 0.056       |                             | 86.680  | 0.000 |
| Tiempo      | -0.064                         | 0.003       | -0.998                      | -21.198 | 0.002 |

La ecuación de la línea recta será de la forma:  $y = -0,064x + 4,873$

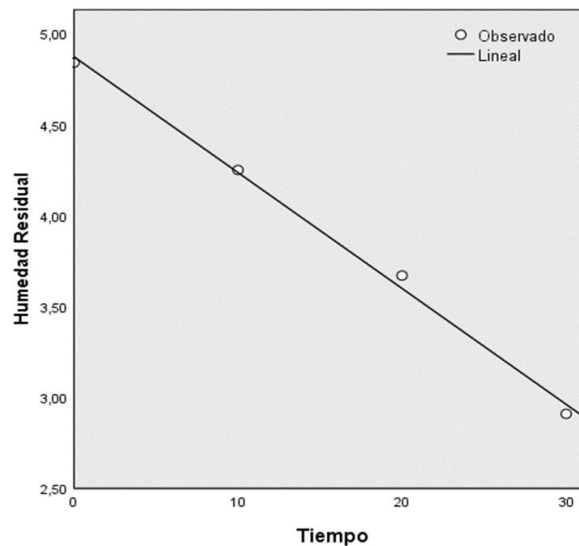


Figura 31. Representación de los datos experimentales (0) y de la línea recta (-) generada por el SPSS. ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.5 m/s).

**Análisis de regresión exponencial con SPSS (T = 50 °C; velocidad = 3.5 m/s)**

Tabla 59

*Resumen del modelo de regresión exponencial (T = 50 °C; velocidad = 3.5 m/s).*

| R     | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación |
|-------|------------|---------------------|---------------------------------|
| 0.995 | 0.989      | 0.989               | 0.079                           |

La variable independiente es Tiempo.

Tabla 60

*Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión exponencial (T = 50 °C; velocidad = 3.5 m/s).*

| Suma de cuadrados | Gl | Media cuadrática | F        | Sig.  |
|-------------------|----|------------------|----------|-------|
| 7.051             | 1  | 7.051            | 1126.991 | 0.000 |
| 0.075             | 12 | 0.006            |          |       |
| 7.126             | 13 |                  |          |       |

La variable independiente es Tiempo

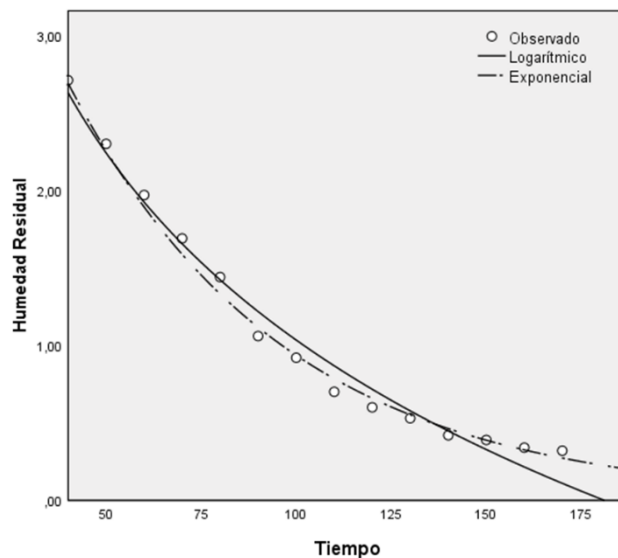
Tabla 61

*Coefficientes de la ecuación exponencial (T = 50 °C; velocidad = 3.5 m/s).*

|             | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados | t       | Sig.  |
|-------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|---------|-------|
|             | B                              | Desv. Error | Beta                        |         |       |
| Tiempo      | -0.018                         | 0.001       | -0.995                      | -33.571 | 0.000 |
| (Constante) | 5.443                          | 0.321       |                             | 16.954  | 0.000 |

La variable dependiente es ln(Humedad residual).

La ecuación de la curva exponencial será de la forma:  $y = 5,443e^{(-0.018x)}$



**Figura 32.** Representación de los datos experimentales (0), de la curva logarítmica (-) y de la curva exponencial (-.) generada por el SPSS. La curva exponencial es la más representativa. (T = 50°C; velocidad = 3.5m/s).

### ANEXO 10

#### Resultados de los datos experimentales de secado de rodajas de cúrcuma realizados con aire a T = 55 °C y velocidades de 2,5, 3,0, 3,5 m/s.

Tabla 62

*Datos experimentales de la operación de secado de rodajas de cúrcuma en un secador de bandejas con flujo de aire a 55 °C y velocidad de 2,5 m/s.*

| N° | t<br>tiempo<br>(min) | P <sub>1</sub>  | P <sub>2</sub> =P <sub>1</sub> -SB    | (P <sub>2</sub> -S)/S                                  | Dy/dt (g<br>agua / g<br>cúrcuma<br>seca.min) | Y <sub>m</sub> (g<br>agua / g<br>cúrcuma<br>seca) |
|----|----------------------|---|---------------------------------------|--|--|---|
|    |                      | Peso<br>estructura<br>+ cúrcuma<br>al tiempo t<br>(g) | Peso<br>rodajas al<br>tiempo t<br>(g) | Humedad<br>residual (g<br>agua / g<br>cúrcuma<br>seca) |  |   |
| 1  | 0                    | 1950.2  | 937.2                                 | 4.76   | 0.058  | 4.474   |
| 3  | 10                   | 1856.5  | 843.5                                 | 4.19   | 0.054  | 3.914   |
| 5  | 20                   | 1768.1  | 755.1                                 | 3.64   | 0.026  | 3.515   |
| 7  | 30                   | 1726.5  | 713.5                                 | 3.39   | 0.046  | 3.158   |
| 9  | 40                   | 1652.2  | 639.2                                 | 2.93   | 0.042  | 2.722   |
| 11 | 50                   | 1584.5  | 571.5                                 | 2.51   | 0.028  | 2.374   |
| 13 | 60                   | 1538.9  | 525.9                                 | 2.23   | 0.030  | 2.085   |
| 15 | 70                   | 1490.8  | 477.8                                 | 1.94   | 0.025  | 1.814   |
| 17 | 80                   | 1450.6  | 437.6                                 | 1.69   | 0.021  | 1.588   |

|    |     |        |       |      |       |       |
|----|-----|--------|-------|------|-------|-------|
| 19 | 90  | 1417.2 | 404.2 | 1.49 | 0.018 | 1.393 |
| 21 | 100 | 1387.3 | 374.3 | 1.30 | 0.013 | 1.234 |
| 23 | 110 | 1365.4 | 352.4 | 1.17 | 0.014 | 1.095 |
| 25 | 120 | 1342.1 | 329.1 | 1.02 | 0.011 | 0.969 |
| 27 | 130 | 1324.4 | 311.4 | 0.91 | 0.009 | 0.868 |
| 29 | 140 | 1309.1 | 296.1 | 0.82 | 0.009 | 0.776 |
| 31 | 150 | 1294.6 | 281.6 | 0.73 | 0.013 | 0.664 |
| 33 | 160 | 1272.7 | 259.7 | 0.60 | 0.005 | 0.571 |
| 35 | 170 | 1264.3 | 251.3 | 0.55 | 0.004 | 0.523 |
| 37 | 180 | 1257.1 | 244.1 | 0.50 | 0.004 | 0.479 |
| 39 | 190 | 1250.1 | 237.1 | 0.46 | 0.002 | 0.447 |
| 41 | 200 | 1246.5 | 233.5 | 0.44 | 0.044 | 0.218 |

SB = 1013 S = 162.65

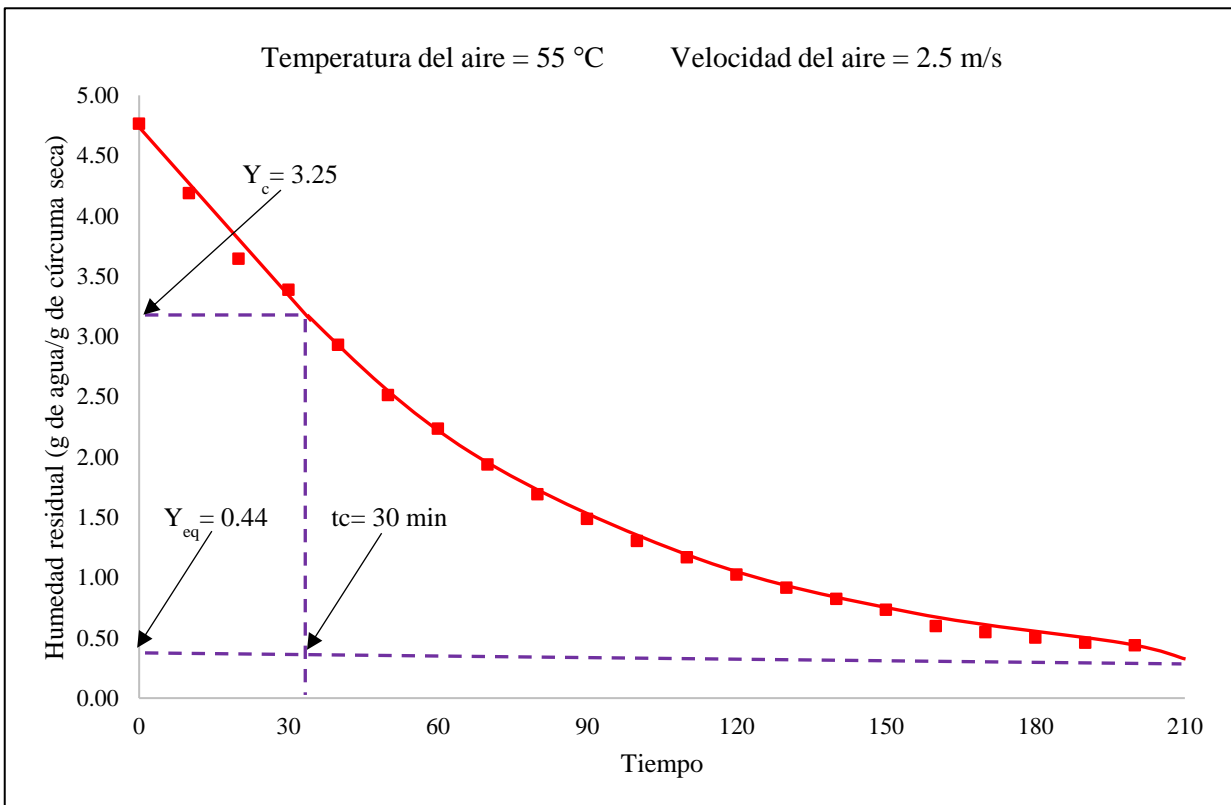


Figura 33. Humedad residual en función del tiempo (T = 55 °C, velocidad 2.5 m/s).



**Análisis de regresión lineal con SPSS (T = 55 °C; velocidad = 2.5 m/s)**

Tabla 63

*Resumen de modelo de regresión lineal (T = 55 °C; velocidad = 2.5 m/s).*

| R     | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación |
|-------|------------|---------------------|---------------------------------|
| 0,987 | 0.974      | 0.960               | 0.12149                         |

La variable independiente es Tiempo.

Tabla 64

*Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión lineal (T = 55 °C; velocidad = 2.5 m/s).*

|           | Suma de cuadrados | Gl | Media cuadrática | F      | Sig.  |
|-----------|-------------------|----|------------------|--------|-------|
| Regresión | 1.086             | 1  | 1.086            | 73.562 | 0,013 |
| Residuo   | 0.030             | 2  | 0.015            |        |       |
| Total     | 1.115             | 3  |                  |        |       |

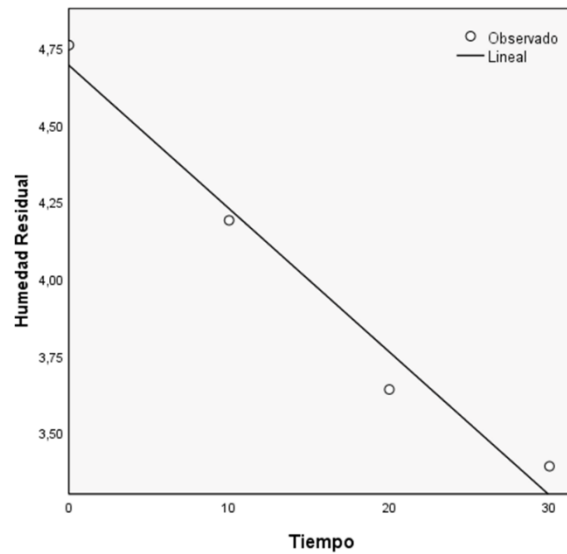
La variable independiente es Tiempo.

Tabla 65

*Coefficientes de la ecuación lineal (T = 55 °C; velocidad = 2.5 m/s).*

|             | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados | t      | Sig.  |
|-------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|--------|-------|
|             | B                              | Desv. Error | Beta                        |        |       |
| (Constante) | 4.694                          | 0.102       |                             | 46.180 | 0.000 |
| Tiempo      | -0.047                         | 0.005       | -0.987                      | -8.577 | 0.013 |

La ecuación de la línea recta será de la forma:  $y = -0.047x + 4.694$



**Figura 34.** Representación de los datos experimentales (0) y de la línea recta (-) generada por el SPSS. ( $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 2.5 m/s).

### **Análisis de regresión exponencial con SPSS ( $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 2.5 m/s)**

Tabla 66

*Resumen del modelo de regresión exponencial ( $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 2.5 m/s).*

| R     | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación |
|-------|------------|---------------------|---------------------------------|
| 0.998 | 0.996      | 0.996               | 0.041                           |

La variable independiente es Tiempo.

Tabla 67

*Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión exponencial ( $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 2.5 m/s).*

|           | Suma de cuadrados | Gl | Media cuadrática | F        | Sig.  |
|-----------|-------------------|----|------------------|----------|-------|
| Regresión | 6.072             | 1  | 6.072            | 3676.065 | 0.000 |
| Residuo   | 0.025             | 15 | 0.002            |          |       |
| Total     | 6.097             | 16 |                  |          |       |

La variable independiente es Tiempo.

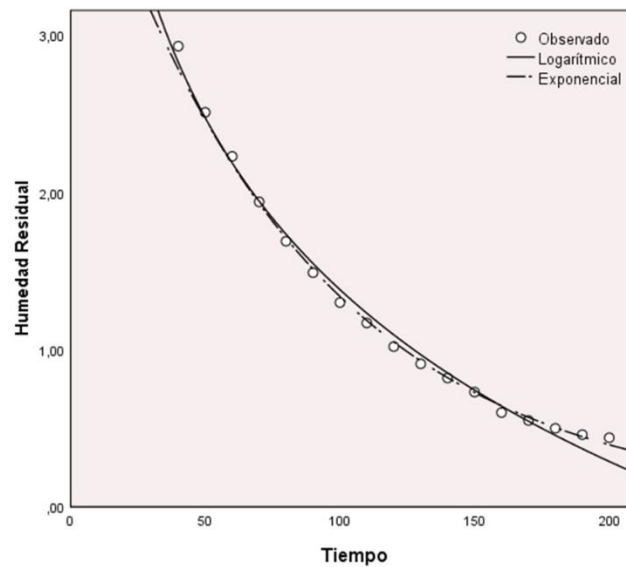
Tabla 68

*Coefficientes de la ecuación exponencial (T = 55 °C; velocidad = 2.5 m/s).*

|             | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados | t       | Sig.  |
|-------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|---------|-------|
|             | B                              | Desv. Error | Beta                        |         |       |
| Tiempo      | -0.012                         | 0.000       | -0.998                      | -60.631 | 0.000 |
| (Constante) | 4.536                          | 0.118       |                             | 38.343  | 0.000 |

La variable dependiente es ln (Humedad residual).

La ecuación de la curva exponencial será de la forma:  $y = 4,536e^{(-0.012x)}$



**Figura 35.** Representación de los datos experimentales (○), de la curva logarítmica (—) y de la curva exponencial (-.-) generada por el SPSS. La curva exponencial es la más representativa. (T = 55°C; velocidad = 2.5 m/s).

Tabla 69

*Datos experimentales de la operación de secado de rodajas de cúrcuma, en un secador de bandejas con flujo de aire a 55 °C y velocidad de 3,0 m/s.*

| N° | t<br>tiempo<br>(min) | P <sub>1</sub><br>Peso<br>estructura<br>+ cúrcuma<br>al tiempo t<br>(g) | P <sub>2</sub> =P <sub>1</sub> -SB<br>Peso<br>rodajas al<br>tiempo t<br>(g) | (P <sub>2</sub> -S)/S<br>Humedad<br>residual (g<br>agua / g<br>cúrcuma<br>seca) | Dy/dt (g<br>agua / g<br>cúrcuma<br>seca.min) | Y <sub>m</sub> (g<br>agua / g<br>cúrcuma<br>seca) |
|----|----------------------|---|---|---|--|---|
| 1  | 0                    | 1944.2  | 931.2   | 4.47  | 0.032  | 4.312   |
| 3  | 10                   | 1890.2  | 877.2   | 4.15  | 0.091  | 3.697   |
| 5  | 20                   | 1735.1  | 722.1   | 3.24  | 0.049  | 2.998   |
| 7  | 30                   | 1652.1  | 639.1   | 2.75  | 0.046  | 2.523   |
| 9  | 40                   | 1573.4  | 560.4   | 2.29  | 0.039  | 2.099   |
| 11 | 50                   | 1507.8  | 494.8   | 1.91  | 0.032  | 1.746   |
| 13 | 60                   | 1453.1  | 440.1   | 1.59  | 0.026  | 1.453   |
| 15 | 70                   | 1408.2  | 395.2   | 1.32  | 0.022  | 1.213   |
| 17 | 80                   | 1371.2  | 358.2   | 1.10  | 0.017  | 1.018   |
| 19 | 90                   | 1341.7  | 328.7   | 0.93  | 0.026  | 0.798   |
| 21 | 100                  | 1296.6  | 283.6   | 0.67  | 0.009  | 0.623   |
| 23 | 110                  | 1282.1  | 269.1   | 0.58  | 0.008  | 0.543   |
| 25 | 120                  | 1269.3  | 256.3   | 0.51  | 0.007  | 0.473   |
| 27 | 130                  | 1258.2  | 245.2   | 0.44  | 0.044  | 0.220   |

SB = 1013 S = 170.23

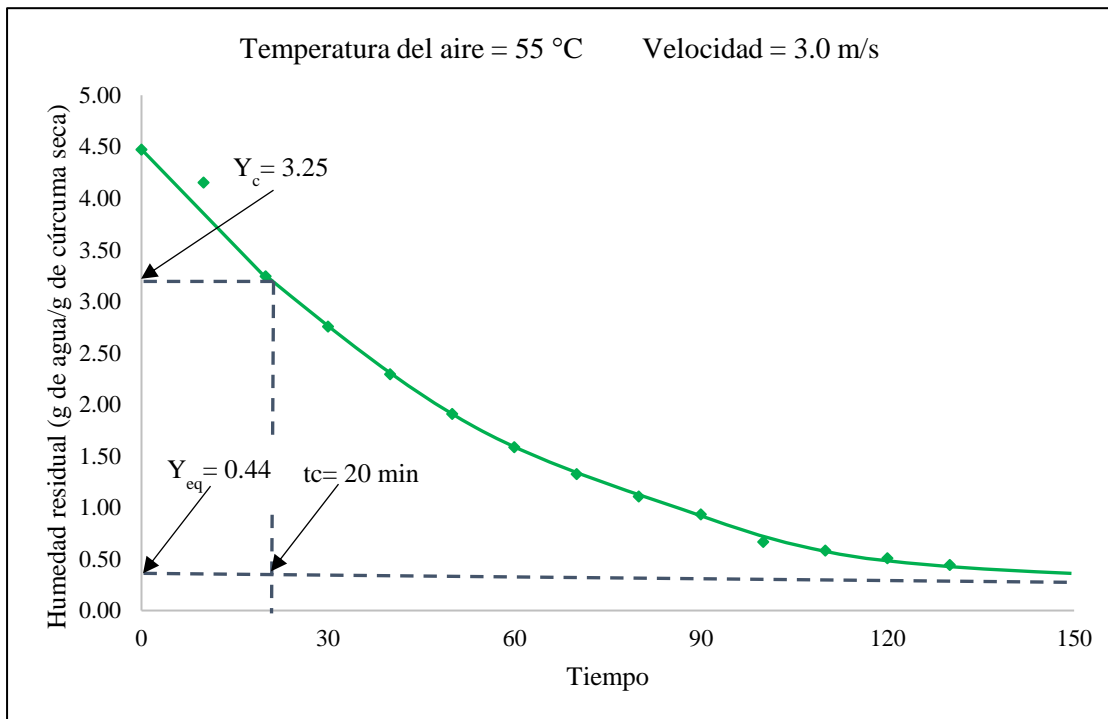


Figura 36. Humedad residual en función del tiempo (T = 55 °C, velocidad = 3.0 m/s).

**Análisis de regresión lineal con SPSS (T = 55 °C; velocidad = 3.0 m/s)**

Tabla 70

*Resumen de modelo de regresión lineal (T = 55 °C; velocidad = 3.0 m/s).*

| R     | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación |
|-------|------------|---------------------|---------------------------------|
| 0,964 | 0.929      | 0.858               | 0.24087                         |

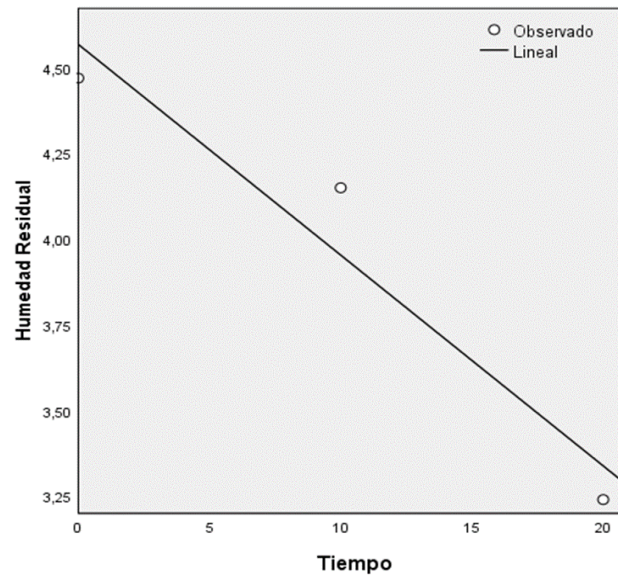
La variable independiente es Tiempo.

Tabla 71

*Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión lineal (T = 55 °C; velocidad = 3.0 m/s).*

|           | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F      | Sig.  |
|-----------|-------------------|----|------------------|--------|-------|
| Regresión | 0.756             | 1  | 0.756            | 13.038 | 0,172 |
| Residuo   | 0.058             | 1  | 0.058            |        |       |
| Total     | 0.814             | 2  |                  |        |       |

La variable independiente es Tiempo.



**Figura 37.** Representación de los datos experimentales (0) y de la línea recta (-) generada por el SPSS. (T = 55 °C; velocidad = 3.0 m/s).

Tabla 72

*Coefficientes de la ecuación lineal (T = 55 °C; velocidad = 3.0 m/s).*

|             | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados |        |       |
|-------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|--------|-------|
|             | B                              | Desv. Error | Beta                        | t      | Sig.  |
| (Constante) | 4.568                          | 0.220       |                             | 20.776 | 0.031 |
| Tiempo      | -0.062                         | 0.017       | -0.964                      | -3.611 | 0.172 |

La ecuación de la línea de la recta será de la forma:  $y = -0.062x + 4.568$

**Análisis de regresión exponencial con SPSS (T = 55 °C; velocidad = 3.0 m/s)**

Tabla 73

*Resumen del modelo de regresión exponencial (T = 55 °C; velocidad = 3.0 m/s).*

| R     | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación |
|-------|------------|---------------------|---------------------------------|
| 0.998 | 0.996      | 0.995               | 0.044                           |

La variable independiente es Tiempo.

Tabla 74

*Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión exponencial (T = 55 °C; velocidad = 3.0 m/s).*

|           | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F        | Sig.  |
|-----------|-------------------|----|------------------|----------|-------|
| Regresión | 3.942             | 1  | 3.942            | 2056.977 | 0.000 |
| Residuo   | 0.017             | 9  | 0.002            |          |       |
| Total     | 3.960             | 10 |                  |          |       |

La variable independiente es Tiempo.

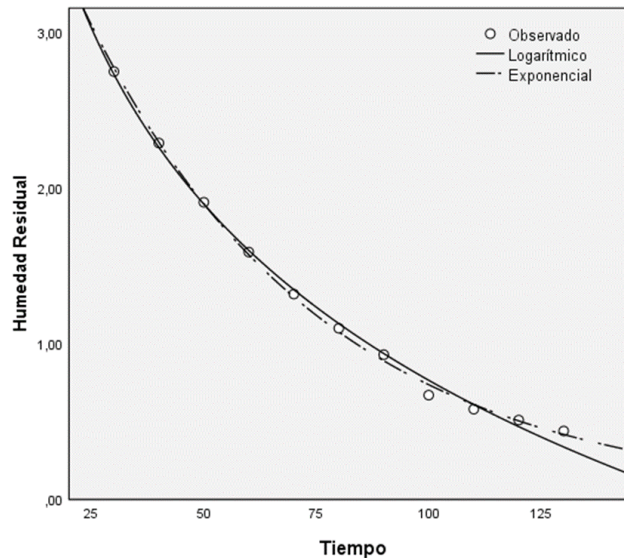
Tabla 75

Coefficientes de la ecuación exponencial ( $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.0 m/s).

|             | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados | t       | Sig.  |
|-------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|---------|-------|
|             | B                              | Desv. Error | Beta                        |         |       |
| Tiempo      | -0.019                         | 0.000       | -0.998                      | -45.354 | 0.000 |
| (Constante) | 4.896                          | 0.176       |                             | 27.849  | 0.000 |

La variable dependiente es  $\ln(\text{Humedad residual})$ .

La ecuación de la curva exponencial será de la forma:  $y = 4,896e^{(-0.019x)}$



**Figura 38.** Representación de los datos experimentales (0), de la curva logarítmica (-) y de la curva exponencial (-.) generada por el SPSS. La curva exponencial es la más representativa. ( $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.0 m/s).

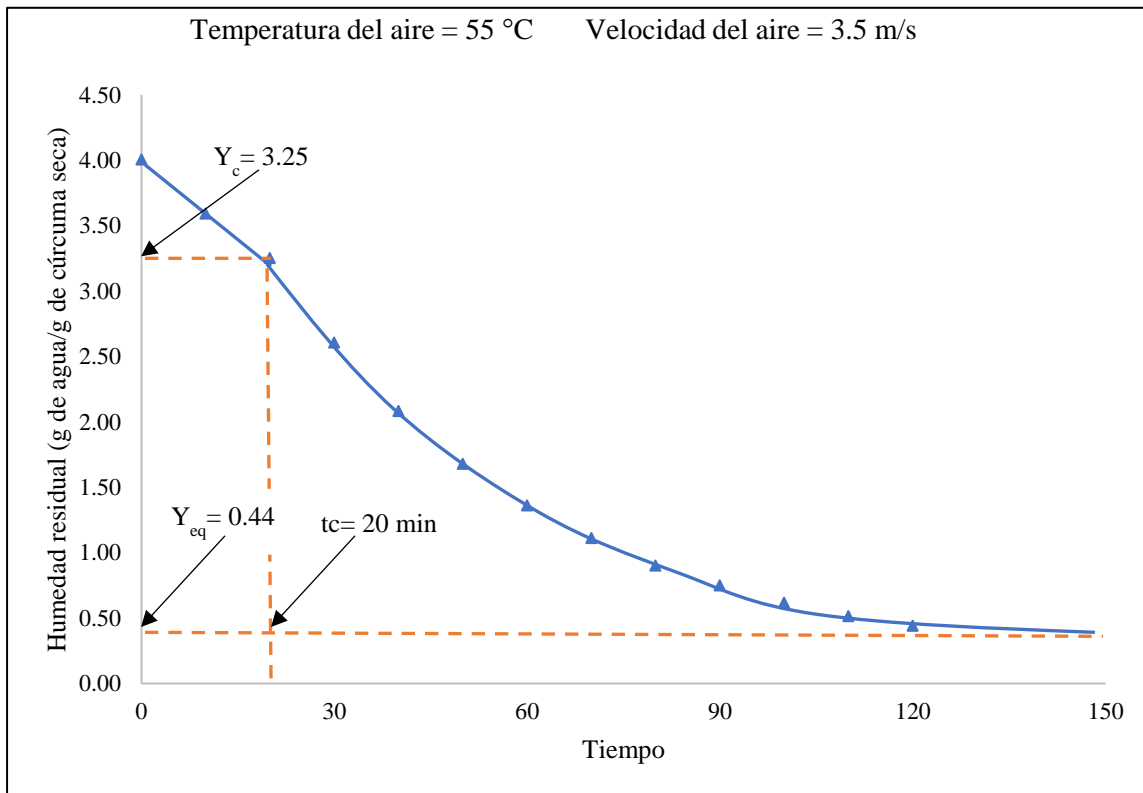
Tabla 76

Datos experimentales de la operación de secado de rodajas de cúrcuma, en un secador de bandejas con flujo de aire a  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  y velocidad de 3,5 m/s.

|    | t            | $P_1$                                    | $P_2 = P_1 - SB$             | $(P_2 - S)/S$                              |                                     |                              |
|----|--------------|--|------------------------------|--|-------------------------------------|------------------------------|
| Nº | tiempo (min) | Peso estructura + lúcura al tiempo t (g) | Peso rodajas al tiempo t (g) | Humedad residual (g agua / g cúrcuma seca) | Dy/dt (g agua / g cúrcuma seca.min) | Ym (g agua / g cúrcuma seca) |

|    |     |        |       |      |       |       |
|----|-----|--------|-------|------|-------|-------|
| 1  | 0   | 1833.8 | 820.8 | 4.01 | 0.041 | 3.800 |
| 3  | 10  | 1765.8 | 752.8 | 3.59 | 0.034 | 3.422 |
| 5  | 20  | 1710.1 | 697.1 | 3.25 | 0.065 | 2.930 |
| 7  | 30  | 1604.3 | 591.3 | 2.61 | 0.052 | 2.346 |
| 9  | 40  | 1518.6 | 505.6 | 2.08 | 0.041 | 1.882 |
| 11 | 50  | 1452.2 | 439.2 | 1.68 | 0.032 | 1.520 |
| 13 | 60  | 1400.1 | 387.1 | 1.36 | 0.025 | 1.236 |
| 15 | 70  | 1359.1 | 346.1 | 1.11 | 0.021 | 1.007 |
| 17 | 80  | 1324.8 | 311.8 | 0.90 | 0.015 | 0.826 |
| 19 | 90  | 1299.9 | 286.9 | 0.75 | 0.013 | 0.684 |
| 21 | 100 | 1278.1 | 265.1 | 0.62 | 0.010 | 0.566 |
| 23 | 110 | 1261.4 | 248.4 | 0.52 | 0.007 | 0.478 |
| 25 | 120 | 1249.3 | 236.3 | 0.44 | 0.044 | 0.221 |

II SB = 1013 S = 163.93



**Figura 39.** Humedad residual en función del tiempo (T = 55 °C, velocidad = 3.5 m/s).



**Análisis de regresión lineal con SPSS (T = 55 °C; velocidad = 3.5 m/s)**

Tabla 77

*Resumen de modelo de regresión lineal (T = 55 °C; velocidad = 3.5 m/s).*

| R     | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación |
|-------|------------|---------------------|---------------------------------|
| 0,998 | 0.996      | 0.993               | 0.03266                         |

La variable independiente es Tiempo.

Tabla 78

*Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión lineal (T = 55 °C; velocidad = 3.5 m/s).*

|           | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F       | Sig.              |
|-----------|-------------------|----|------------------|---------|-------------------|
| Regresión | 0.289             | 1  | 0.289            | 270.750 | ,039 <sup>b</sup> |
| Residuo   | 0.001             | 1  | 0.001            |         |                   |
| Total     | 0.290             | 2  |                  |         |                   |

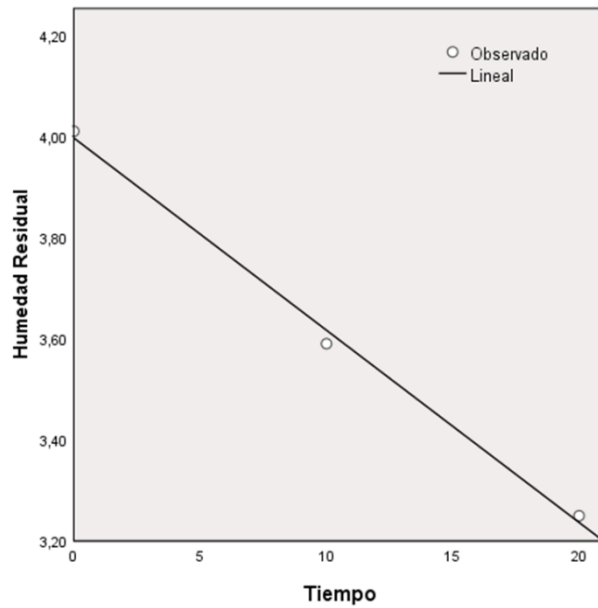
La variable independiente es Tiempo.

Tabla 79

*Coefficientes de la ecuación lineal (T = 55 °C; velocidad = 3.0 m/s).*

|             | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados | t       | Sig.  |
|-------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|---------|-------|
|             | B                              | Desv. Error | Beta                        |         |       |
| (Constante) | 3.997                          | 0.030       |                             | 134.052 | 0.005 |
| Tiempo      | -0.038                         | 0.002       | -0.998                      | -16.454 | 0.039 |

La ecuación de la línea recta será de la forma:  $y = -0.038x + 3.997$



**Figura 40.** Representación de los datos experimentales (O) y de la línea recta (-) generada por el SPSS. ( $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.5 m/s).

### **Análisis de regresión exponencial con SPSS ( $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.5 m/s)**

Tabla 80

*Resumen del modelo de regresión exponencial ( $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.5 m/s).*

| R     | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación |
|-------|------------|---------------------|---------------------------------|
| 0.999 | 0.998      | 0.998               | 0.028                           |

La variable independiente es Tiempo.

Tabla 81

*Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión exponencial ( $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; velocidad = 3.5 m/s).*

|           | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F        | Sig.  |
|-----------|-------------------|----|------------------|----------|-------|
| Regresión | 3.242             | 1  | 3.242            | 4231.231 | 0.000 |
| Residuo   | 0.006             | 8  | 0.001            |          |       |
| Total     | 3.248             | 9  |                  |          |       |

La variable independiente es Tiempo.

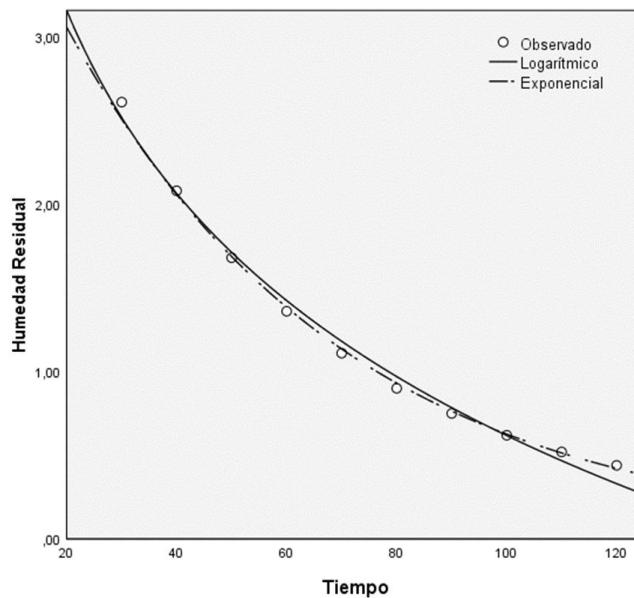
Tabla 82

*Coefficientes de la ecuación exponencial (T = 55 °C; velocidad = 3.5 m/s).*

|             | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados | t       | Sig.  |
|-------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|---------|-------|
|             | B                              | Desv. Error | Beta                        |         |       |
| Tiempo      | -0.020                         | 0.000       | -0.999                      | -65.048 | 0.000 |
| (Constante) | 4.546                          | 0.111       |                             | 40.861  | 0.000 |

La variable dependiente es ln(Humedad residual).

La ecuación de la curva exponencial será de la forma:  $y = 4.546e^{(-0.020x)}$



**Figura 41.** Representación de los datos experimentales (0), de la curva logarítmica (-) y de la curva exponencial (-.) generada por el SPSS. La curva exponencial es la más representativa. (T = 55°C; velocidad = 3.5 m/s).