

**MODELADO DE LAS CINÉTICAS DE PÉRDIDA DE HUMEDAD Y ABSORCIÓN DE ACEITE
DURANTE LA FRITURA A VACIO DE PAPA RATONA MORADA CULTIVADA EN EL
DEPARTAMENTO DE NARIÑO**

JESSICA PATRICIA RAMOS LÓPEZ

UNIVERSIDAD DE NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

SAN JUAN DE PASTO

2018

**MODELADO DE LAS CINÉTICAS DE PÉRDIDA DE HUMEDAD Y ABSORCIÓN DE ACEITE
DURANTE LA FRITURA A VACIO DE PAPA RATONA MORADA CULTIVADA EN EL
DEPARTAMENTO DE NARIÑO**

JESSICA PATRICIA RAMOS LÓPEZ

**Trabajo de grado en la modalidad de investigación presentado como requisito para optar al título
de Ingeniera Agroindustrial**

Asesor:

PhD. OSWALDO OSORIO MORA

UNIVERSIDAD DE NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

SAN JUAN DE PASTO

2018

NOTA DE RESPONSABILIDAD

Las ideas y conclusiones aportadas en el siguiente trabajo son responsabilidad exclusiva del autor.

Artículo 1ro del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966 emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

NOTA DE ACEPTACIÓN

M.Sc. ANDRÉS FELIPE CERÓN CÁRDENAS

Jurado

PhD. OSCAR ARANGO BEDOYA

Jurado

PhD. OSWALDO OSORIO MORA

Asesor

San Juan de Pasto, 9 de abril de 2018

DEDICATORIA

Hoy quiero agradecer en primer lugar a DIOS por haberme dado el regalo de la vida y haberme permitido culminar una de las etapas más importantes, mi carrera profesional.

A mis padres Henry y Patricia por haberme guiado e impulsado a continuar y en especial a mi madre, porque sin ella y sin su esfuerzo nada de esto sería posible. ¡los amo con todo mi corazón

i

A mi familia por nunca hacerme desfallecer y en especial a mis abuelitas, tíos y primas que son mi ejemplo a seguir, a ellos mi admiración y gratitud.

A mis profesores y asesor por sus enseñanzas y confianza depositada en mí.

Y a las personas que estuvieron ahí para verme cumplir una de las tantas metas en el camino de la vida.

Para ustedes todo mi amor, gratitud y este logro.

Jessica Patricia Ramos López.

AGRADECIMIENTOS

La autora expresa sus sinceros agradecimientos a:

La Universidad de Nariño por brindar los conocimientos y la formación como profesional y persona.

El Sistema General de Regalías por la financiación de este trabajo de grado, a través del Proyecto “*Mejoramiento tecnológico y productivo del sistema papa en el Departamento de Nariño*”.

El Grupo de Investigación GAIDA por proporcionar las instalaciones y delegar el uso y manejo de los equipos del Laboratorio de Investigación en Calidad y Conservación de Alimentos.

La Granja Experimental Botana por proporcionar la materia prima para la realización de este trabajo de grado.

M.Sc. Andrés Felipe Cerón, jurado de esta tesis, por su apoyo, colaboración y aportes en el desarrollo del presente trabajo de grado.

Ph.D. Oscar Arango Bedoya, jurado de esta tesis, por su apoyo, aportes y colaboración en el desarrollo del presente trabajo de grado.

Ph.D. Oswaldo Osorio Mora por sus conocimientos, recomendaciones, sugerencias, correcciones y asesorías brindadas.

Ph.D. Henry Alexander Váquiرو Herrera por sus conocimientos, aportes, recomendaciones y asesorías brindadas.

M.Sc. Mauricio Bucheli Jurado por su amistad, apoyo y aportes en el desarrollo del presente trabajo.

Ing. Esteban Arteaga Cabrera por su amistad, aportes y colaboración en el desarrollo del presente trabajo de grado.

A todas las personas que una u otra forma, influyeron en la realización de este trabajo de grado e hicieron posible esta realidad.

RESUMEN

La papa (*Solanum tuberosum*) es considerada como uno de los principales cultivos agrícolas en el mundo, en Colombia, los cultivares de papa nativa corresponden a las especies *Solanum tuberosum ssp. andigena* y *Solanum phureja*; conocidas como “guatas” y “chauchas o criollas”, respectivamente. La producción de la papa criolla ubica a Colombia en el primer lugar en el mundo, con una importante diversidad en el departamento de Nariño. Sin embargo, estos tubérculos son destinados, en mayor medida, para el consumo en fresco a nivel nacional. Por lo cual se plantean diferentes opciones para su aprovechamiento, la fritura a vacío por ejemplo es una técnica que en la actualidad promete ser una opción para la producción de snacks de frutas y verduras que presentan los parámetros de calidad esperados y que responden a las tendencias de salud deseadas. Por otra parte, el modelado matemático es una herramienta básica para diseñar y optimizar los procesos industriales, puesto que permite predecir el desarrollo de un proceso y, en consecuencia, realizar la optimización, el control de la calidad y la mejora de los procesos productivos. En contexto se realizó la fritura a vacío de rodajas de papa (*Solanum tuberosum* L.) a presiones de 20, 50 y 81 Kpa, temperaturas de 120, 140 y 160°C y tiempos de hasta 300 segundos. La cinética de pérdida de agua fue estudiada con los modelos empíricos de: Newton, Henderson-Pabis y Page; mientras que la cinética de absorción de aceite se estudió con los modelos de: Monod, Moyano-Pedreschi y un modelo de primer orden. El efecto de presión y temperatura se evaluó mediante la difusividad efectiva ($Deff$) y la energía de activación (Ea). Los modelos empíricos utilizados mostraron una buena calidad de ajuste sobre las curvas experimentales, validando su utilización. La $Deff$ tuvo valores entre 2.739×10^{-8} y 1.864×10^{-8} m²/s a presiones de 20, 50 y 81 Kpa y temperaturas entre 120 y 160 °C; mientras que la Ea fue de 24.859 KJ/mol, 25.595 KJ/mol y 27.214 KJ/mol para $deff$ y de -7.2247 KJ/mol, -8.3061 KJ/mol y -16.2206 KJ/mol para Ye (presiones de 20, 50 y 81 Kpa, respectivamente). En conclusión, La presión, temperatura y el tiempo de freído ejercieron un efecto significativo sobre el contenido de agua y aceite ($p < 0.05$). Los valores encontrados de $Deff$ y Ea , se encuentran dentro del intervalo general de 10^{-8} a 10^{-11} m²/s y 12.7 a 110 kJ/mol para alimentos deshidratados, respectivamente; y mostraron dependencia con la temperatura.

Palabras clave: absorción de aceite, difusividad, energía de activación, fritura a vacío, pérdida de agua, modelos empíricos, *Solanum Phureja*.

ABSTRACT

The potato (*Solanum tuberosum*) is considered one of the most important agricultural crops in the world, in Colombia, the native potato cultivars correspond to the types *Solanum tuberosum* ssp. *andigena* and *Solanum phureja*; known as "guatas" and "chauchas o criollas", respectively. The production of the "papa criolla" places Colombia in the first rank in the world, with an important diversity in the department of Nariño. However, these tubers are destined, overall, for a fresh intake all over the country. Therefore, different options are proposed for its use, vacuum frying for example is a technique that currently promises to be an option for the production of fruit and vegetable snacks which accomplish the expected quality parameters and fulfill the health standards. On the other hand, mathematical modeling is a basic tool to design and optimize industrial processes, this because it allows to predict the development of a process and consequently optimize it, providing a quality control and an improvement of production. In context, slices of potatoes were vacuum fried (*Solanum tuberosum* L.) at pressures of 20, 50 and 81 Kpa, temperatures of 120, 140 and 160 ° C up 300 seconds time. The kinetics of water loss was studied with the empirical models of: Newton, Henderson-Pabis and Page; while the kinetics of oil absorption was studied with the models of: Monod, Moyano-Pedreschi and a first-order model. The effect of Pressure and temperature was evaluated by the effective diffusivity (*Deff*) and the activation energy (*Ea*). The empirical models implemented came up with a good quality of adaption over the experimental curves. The *Deff* had values between 2.739×10^{-8} and 1.864×10^{-8} m²/s at pressures of 20, 50 and 81 Kpa and temperatures between 120 and 160 °C; While *Ea* was 24.859 KJ/mol, 25.595 KJ/mol and 27.214 KJ/mol for *deff* and -7.2247 KJ/mol, -8.3061 KJ/mol and -16.2206 KJ/mol for *Ye* (pressures of 20, 50 and 81 Kpa, respectively). In conclusion the pressure, temperature and frying time had a significant effect on the water and oil content ($p < 0.05$). The values found for *Deff* and *Ea* are within the general range of 10⁻⁸ to 10⁻¹¹ m²/s and 12.7 to 110 kJ/mol for dehydrated foods, respectively; and showed dependence on temperature.

Key words: oil absorption, diffusivity, activation energy, vacuum frying, water loss, empirical models, *Solanum phureja*.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1 .PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN Y JUSTIFICACIÓN EN TÉRMINOS DE NECESIDAD Y PERTINENCIA.....	21
2. ESTADO DEL ARTE DE LA INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO E INNOVACIÓN	24
2.1 Generalidades de la papa criolla (<i>Solanum phureja</i>).....	24
2.1.1 morfología de la planta	24
2.1.2 factores ecofisiológicos.....	24
2.1.3 Cosecha.....	24
2.1.4 Postcosecha.....	25
2.1.5 Almacenamiento	25
2.1.6 Composición nutricional.....	25
2.1.7 Situación en Colombia.....	26
2.1.8 Producción en el departamento de Nariño	28
3. OBJETIVOS.....	29
3.1 Objetivo general	29
3.2 Objetivos específicos.....	29
4. FRITURA A VACÍO Y MODELACIÓN MATEMÁTICA DE PAPA (<i>SOLANUM PHUREJA</i>) VARIEDAD RATONA MORADA.....	30
4.1 fundamentos teóricos.....	30
4.1.1 fritura a vacío de alimentos.....	30
4.1.1.1 generalidades.....	30
4.1.1.2 Transferencia de calor y de materia	30
4.1.2 Modelado matemático del proceso de fritura a vacío.....	33
4.1.2.1 generalidades.....	33
4.1.2.2 Construcción del modelo	34
4.1.2.3 Modelado de la pérdida de agua	35
4.1.2.4 Modelado de la absorción de aceite	35

4.2 Antecedentes del tema.....	36
5. METODOLOGÍA	39
5.1 Localización.....	39
5.2 Material experimental.....	39
5.2.1 Operaciones preliminares	40
5.2.1.1 Limpieza.....	40
5.2.1.2 Selección	40
5.3 Construcción y modelado de las cinéticas de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura a vacío de papa (<i>Solanum phureja</i>) variedad Ratona Morada.....	41
5.3.1 Proceso de fritura a vacío.....	41
5.3.2 Construcción y modelado de la cinética de pérdida de agua	43
5.3.2.1 Determinación de contenido de agua	43
5.3.2.2 Construcción de la cinética de pérdida de agua	43
5.3.2.3 Modelado matemático de la cinética de pérdida de agua.....	43
5.3.3 Construcción y modelado de la cinética de absorción de aceite.....	44
5.3.3.1 Determinación del contenido de aceite	44
5.3.3.2 Construcción de la cinética de absorción de aceite.....	45
5.3.3.3 Modelado matemático de la cinética de absorción de aceite	45
5.3.4 Análisis estadístico	46
5.4 Establecimiento de los modelos matemáticos que mejor describen los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura a vacío de papa (<i>Solanum phureja</i>) variedad Ratona Morada.....	46
5.4.1 Evaluación de la calidad de ajuste de los modelos matemáticos aplicados.....	46
5.4.2 Selección del mejor modelo matemático	47
5.5 Determinación de la difusividad del agua (D_{eff}) y la energía de activación (E_a) de los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura a vacío de papa (<i>Solanum phureja</i>) variedad Ratona Morada.....	47
5.5.1 Estudio de la transferencia de agua como modelo difusivo.....	47
5.5.2 Energía de activación para la cinética de pérdida de agua.....	48
5.5.3 Energía de activación para la cinética de absorción de aceite	48
5.5.4 Análisis estadístico	49

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	50
6.1 Construcción y modelado de las cinéticas de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura a vacío de papa (<i>Solanum phureja</i>) variedad Ratona Morada	50
6.1.1 Cinética de pérdida de agua	50
6.1.2 Modelado de la cinética de pérdida de agua	57
6.1.2.1 Modelo de Newton.....	57
6.1.2.2 Modelo de Henderson-Pabis	59
6.1.2.3 Modelo de Page.....	60
6.1.3 Cinética de absorción de aceite.....	62
6.1.4 Modelado matemático de la cinética de absorción de aceite	69
6.1.4.1 Modelo de Monod.....	69
6.1.4.2 Modelo de Moyano-Pedreschi	71
6.1.4.3 Modelo exponencial de primer orden	72
6.2 Selección de los modelos matemáticos que mejor describen los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura a vacío de papa (<i>Solanum phureja</i>) variedad Ratona Morada	74
6.2.1 Evaluación de la calidad de ajuste de los modelos matemáticos aplicados a la cinética de pérdida de agua	74
6.2.2 Selección del mejor modelo matemático aplicado a la cinética de pérdida de agua ...	76
6.2.3 Evaluación de la calidad de ajuste de los modelos matemáticos aplicados a la cinética de absorción de aceite	78
6.2.4 Selección del mejor modelo matemático aplicado a la cinética de pérdida de agua ...	80
6.3 Determinación de la difusividad del agua ($Deff$) y la energía de activación (Ea) requerida en los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura convencional de dos genotipos de papa (<i>Solanum phureja</i>).....	82
6.3.1 Difusividad efectiva del agua	82
6.3.2 Energía de activación para la cinética de pérdida de agua.....	85
6.3.3 Energía de activación para la cinética de absorción de aceite	86
7. CONCLUSIONES	89

8. PROPIEDADES FÍSICAS; COLOR Y TEXTURA COMO PARÁMETRO DE CALIDAD EN LA FRITURA A VACÍO DE PAPA (*SOLANUM PHUREJA*) VARIEDAD RATONA

MORADA	90
8.1 Fundamentos teóricos	90
8.1.2 Color en alimentos	90
8.1.2.1 Generalidades	90
8.1.2.2 Perfil de color	91
8.1.3 Textura en alimentos	92
8.1.3.1 Generalidades	92
8.1.3.2 Perfil de textura	92
9. METODOLOGÍA	94
9.1 Determinación de color	94
9.1.1 Obtención del parámetro ΔE	94
9.2 Determinación de textura	95
9.2.1 Determinación de textura	95
9.2.2 Análisis estadístico	95
10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	96
10.1 Construcción de los perfiles de color y textura durante <i>la fritura</i> a vacío de papa (<i>Solanum phureja</i>) variedad Ratona Morada	96
10.1.1 Perfil de color	96
10.1.2 Perfil de textura	101
11. CONCLUSIONES	106
12. RECOMENDACIONES	107
REFERENCIAS	108
ANEXOS	114

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2. 1	Composición nutricional de la papa criolla (<i>Solanum phureja</i>)..... 26
Tabla 6. 1	Contenido de agua adimensional en función del tiempo durante la fritura a 20 Kpa a diferentes temperaturas..... 50
Tabla 6. 2	Contenido de agua adimensional en función del tiempo durante la fritura a 50 Kpa a diferentes temperaturas..... 51
Tabla 6. 3	Contenido de agua adimensional en función del tiempo durante la fritura a 50 Kpa a diferentes temperaturas..... 51
Tabla 6. 4	Parámetros cinéticos del modelo de Newton para cada temperatura y presión de fritura. 58
Tabla 6. 5	Parámetros cinéticos del modelo de Henderson-Pabis para cada temperatura y presión de fritura. 59
Tabla 6. 6	Parámetros cinéticos del modelo de Page para cada temperatura y presión de fritura. 61
Tabla 6. 7	Contenido de aceite en función del tiempo durante la fritura a 20 Kpa a diferentes temperaturas..... 62
Tabla 6. 8	Contenido de aceite en función del tiempo durante la fritura a 50 Kpa a diferentes temperaturas..... 63
Tabla 6. 9	Contenido de aceite en función del tiempo durante la fritura a 81 Kpa a diferentes temperaturas..... 63
Tabla 6. 10	Parámetros cinéticos del modelo de Monod para cada temperatura y presión de fritura. . 70
Tabla 6. 11	Parámetros cinéticos del modelo de Moyano- pedreschi para cada temperatura y presión de fritura. 71
Tabla 6. 12	Parámetros cinéticos del modelo exponencial de primer orden para cada temperatura y presión de fritura..... 73
Tabla 6. 13	Parámetros estadísticos de ajuste de los modelos matemáticos de la cinética de pérdida de agua para cada presión y temperatura de fritura. 76
Tabla 6. 14	Comparación de los parámetros estadísticos de ajuste de los modelos matemáticos de la cinética de perdida de agua para cada presión de fritura. 77
Tabla 6. 15	Parámetros estadísticos de ajuste de los modelos matemáticos de la cinética de absorción de aceite para cada presión y temperatura de fritura..... 80
Tabla 6. 16	Comparación de los parámetros estadísticos de ajuste de los modelos matemáticos de la cinética de absorción de aceite para cada presión de fritura. 81

Tabla 6. 17	Difusividad efectiva del modelo de Fick para cada presión y temperatura de fritura.	84
Tabla 6. 18	Energía de activación del modelo de Arrhenius de la difusividad efectiva para cada presión de fritura.....	86
Tabla 6. 19	Energía de activación del modelo de Arrhenius del contenido de aceite en equilibrio para cada presión de fritura.	87
Tabla 10. 1	Parámetros cinéticos y cambio de color en función del tiempo durante la fritura a 20 Kpa y diferentes temperaturas.....	97
Tabla 10. 2	Parámetros cinéticos y cambio de color en función del tiempo durante la fritura a 50 Kpa y diferentes temperaturas.....	98
Tabla 10. 3	Parámetros y cambio de color en función del tiempo durante la fritura a 81 Kpa y diferentes temperaturas.....	99
Tabla 10. 4	Determinación de dureza en función del tiempo durante la fritura a 20 Kpa y diferentes temperaturas.....	102
Tabla 10. 5	Determinación de dureza en función del tiempo durante la fritura a 50 Kpa y diferentes temperaturas.....	102
Tabla 10. 6	Determinación de dureza en función del tiempo durante la fritura a 81 Kpa y diferentes temperaturas.....	103

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2. 1	Área cultivada, producción y rendimiento de papa criolla en el año 2013. 27
Figura 4. 1	Transferencia de calor y de materia durante el proceso de fritura. 31
Figura 4. 2	Perfiles de temperatura y humedad durante el proceso de fritura. 32
Figura 5. 1	Esquema de equipo de fritura a vacío. 42
Figura 6. 1	Cinética de pérdida de agua durante la fritura a presión de 20 Kpa y diferentes temperaturas de proceso. 52
Figura 6. 3	Cinética de pérdida de agua durante la fritura a presión de 81 Kpa y diferentes temperaturas de proceso. 53
Figura 6. 4	Gráfico de medias para presión y humedad en base seca. 55
Figura 6. 5	Cinética de pérdida de agua durante la fritura a una temperatura de 120°C y diferentes presiones de proceso. 56
Figura 6. 7	Cinética de pérdida de agua durante la fritura a una temperatura de 160°C y diferentes presiones de proceso. 57
Figura 6. 8	Cinética de absorción de aceite durante la fritura a 20 Kpa y diferentes temperaturas de proceso. 65
Figura 6. 9	Cinética de absorción de aceite durante la fritura a 50 Kpa y diferentes temperaturas de proceso. 65
Figura 6. 10	Cinética de absorción de aceite durante la fritura a 81 Kpa y diferentes temperaturas de proceso. 66
Figura 6. 11	Cinética de absorción de aceite durante la fritura a 120 °C y diferentes presiones de proceso. 68
Figura 6. 12	Cinética de absorción de aceite durante la fritura a 140 °C y diferentes presiones de proceso. 68
Figura 6. 13	Cinética de absorción de aceite durante la fritura a 140 °C y diferentes presiones de proceso. 69
Figura 6. 15	Cinética de absorción de aceite experimental y calculada para la temperatura de 160 °C y todas las presiones. 79
Figura 6. 16	Relación de Ln MR con el tiempo para una presión de 20 Kpa y cada temperatura de fritura. 82
Figura 6. 17	Relación de Ln MR con el tiempo para una presión de 50 Kpa y cada temperatura de fritura. 83

Figura 6. 18	Relación de Ln MR con el tiempo para una presión de 81 Kpa y cada temperatura de fritura.	83
Figura 6. 19	Gráfica de Arrhenius de la difusividad del agua.....	85
Figura 6. 20	Gráfica de Arrhenius para la variación del contenido de aceite en equilibrio con la temperatura para todas las presiones.	87
Figura 8. 1	Modelo o espacio de color CIELAB.	91
Figura 10. 1	Parámetros L*, a* y b* durante la fritura a diferentes temperaturas y presiones de trabajo. 100	
Figura 10. 2	Parámetro dureza durante la fritura a temperatura de 120 °C y presiones de trabajo.....	103
Figura 10. 3	Parámetro dureza durante la fritura a temperatura de 140 °C y presiones de trabajo.....	104
Figura 10. 4	Parámetro dureza durante la fritura a temperatura de 160 °C y presiones de trabajo.....	104
Figura 10. 5	Gráfico de medias para presión y textura.	105

LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 5. 1	Laboratorio de investigación en calidad y conservación de alimentos 39
Imagen 5. 2	Papa (Solanum phureja) variedad Ratona Morada en estado fresco. 40
Imagen 5. 3	Limpieza de papa (Solanum phureja) variedad Ratona Morada. 40
Imagen 5. 4	Selección de papa (Solanum phureja) variedad Ratona Morada..... 41
Imagen 5. 5	Proceso de fritura a vacío..... 42
Imagen 5. 6	Determinación del contenido de agua. 43
Imagen 5. 7	Determinación del contenido de aceite. 45
Imagen 9. 2	Determinación de textura. 95

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1 DATOS EXPERIMENTALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CINÉTICA DE PÉRDIDA DE AGUA	115
ANEXO 2 DATOS EXPERIMENTALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CINÉTICA DE ABSORCIÓN DE ACEITE	124
ANEXO 3 DATOS EXPERIMENTALES PARA EL ANÁLISIS DE COLOR.....	133
ANEXO 4 DATOS EXPERIMENTALES PARA EL ANÁLISIS DE TEXTURA.....	142
ANEXO 5 DATOS ESTADÍSTICOS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE LA CINÉTICA DE PERDIDA DE AGUA.....	151
ANEXO 6 DATOS ESTADÍSTICOS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE LA CINÉTICA DE ABSORCIÓN DE ACEITE	153
ANEXO 7 DATOS ESTADÍSTICOS DEL CONTENIDO DE AGUA.....	155
ANEXO 8 DATOS ESTADÍSTICOS DEL CONTENIDO DE ACEITE	156
ANEXO 9 DATOS ESTADÍSTICOS DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA	157
ANEXO 10 DATOS ESTADÍSTICOS DE COLOR.....	158
ANEXO 11 DATOS ESTADÍSTICOS DE TEXTURA.....	160

INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum*) es considerada como uno de los principales cultivos agrícolas en el mundo, situándose en el cuarto lugar de los alimentos nutricionales, después del maíz, el trigo y el arroz. En Colombia se siembran las especies *Solanum tuberosum ssp. andigena* y *Solanum phureja* conocidas como “guatas” y “chauchas o criollas”, respectivamente. La producción de este tubérculo ubica a Colombia como el primer productor mundial, con un importante centro de diversidad localizado en el departamento de Nariño, sin embargo, el mayor nivel de consumo de estas papas está concentrado en fresco.

En la actualidad el consumo mundial de la papa está pasando del producto fresco a los productos alimentarios procesados industrialmente, pero también y al mismo tiempo el mercado de consumo ha incrementado la conciencia de la relación entre la alimentación, nutrición y salud lo cual da pie a la utilización de nuevas alternativas de procesamiento.

Garayo & Moreira (2002) concluyen que la fritura a vacío es una nueva tecnología que se orienta a obtener Productos tipo snacks de frutas y verduras, que conserven mejor su color y sabor natural, puesto que su calidad puede verse afectada por las altas temperaturas que se emplean en los métodos tradicionales de procesamiento de alimentos y que además responden a las tendencias de salud deseadas.

Por otra parte, la modelación matemática es una herramienta de gran utilidad para diseñar y pronosticar datos, ya que permite hacer una representación a pequeña escala de lo que ocurre en un proceso, en donde no solo se puede realizar una optimización, si no, también un control integral sobre los fenómenos que aquí se desarrollan. Viéndose reflejados en ahorro de energía, tiempo y costos de operación.

En este contexto, el objetivo general de este trabajo fue modelar las cinéticas de pérdida de humedad y absorción de aceite durante la fritura a vacío de papa ratona morada cultivada en el departamento de Nariño. Para ello se realizó el proceso de fritura a vacío en batch en un equipo a escala. Cada unidad experimental se constituyó por 1.36 ± 0.03 g de papa ratona morada. Las rodajas de 2 mm de espesor y 18.60 mm de diámetro fueron freídas a presiones de (20, 50 y 81 Kpa), temperaturas de (120, 140 y 160 °C), y tiempos de hasta 300 segundos, empleando un prototipo de capacidad de 6 L y aceite vegetal. La cinética de pérdida de agua fue estudiada con los modelos empíricos de Newton, Henderson-Pabis y Page y la ley de Fick como modelo difusivo, mientras que la cinética de absorción de aceite se estudió con los modelos de Monod, Moyano-Pedreschi y un modelo de primer orden. La evaluación de la calidad de ajuste y la selección de los modelos más adecuados se realizó mediante parámetros estadísticos. Igualmente se determinó la difusividad efectiva del agua (D_{eff}) y la energía de activación (E_a) para ambos fenómenos; empleando el modelo de Fick y la ecuación de Arrhenius, respectivamente.

Los resultados esperados en este trabajo fueron; la construcción de las cinéticas de pérdida de agua y absorción de aceite y su relación con las condiciones de operación del proceso de fritura a vacío, los

modelos matemáticos que presenten el mejor ajuste sobre los datos experimentales y la determinación de la difusividad efectiva y la energía de activación y su relación con las condiciones del proceso.

1 .PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN Y JUSTIFICACIÓN EN TÉRMINOS DE NECESIDAD Y PERTINENCIA

La papa (*Solanum tuberosum*) se considera como uno de los principales cultivos agrícolas en el mundo en cuanto a superficie después de los cereales y algunos cultivos destinados a la agroindustria, como la soya y la caña de azúcar. Este alimento ocupa un lugar importante en la agricultura, economía y seguridad alimentaria.(Arévalo Herrera & Rodríguez Molano, 2012; Madroñero, Rosero M., Rodríguez M., Navia E., & Benavides, 2013). Posee gran valor alimenticio, pues es fuente de proteína, carbohidratos, potasio, vitamina C, otras vitaminas y algunos minerales en menor porcentaje (Rozo & Ramírez, 2011).

El Grupo de las papas criollas (*Solanum phureja*) está compuesto por un conjunto de variedades nativas que crecen extensamente en los Andes, desde el occidente de Venezuela hasta el centro de Bolivia (Ghislain, Andrade, Rodríguez, Hijmans, & Spooner, 2006). Colombia se considera el primer productor mundial de papa criolla, de la cual se siembran al año, en promedio, 8.500 hectáreas y se cosechan cerca de 100 mil toneladas, especialmente en los departamentos de Cundinamarca, Nariño y Boyacá (Arévalo Herrera & Rodríguez Molano, 2012). En 2009, el 10% de la producción de papa en Nariño correspondió a la variedad criolla, la cual se cultiva en mayor cantidad en los municipios de Córdoba, Gugalmatán, Ipiales, Puerres, El Encano, Pasto, Potosí, Pupiales y Tuquerres, con un total de 2051 ha cosechadas (Madroñero et al., 2013).

No obstante, el mayor consumo de la papa criolla (*Solanum phureja*) está concentrado en el mercado en fresco a nivel nacional (Arévalo Herrera & Rodríguez Molano, 2012) debido a la escasa participación del valor agregado y el bajo grado de procesamiento para la transformación industrial del tubérculo (Gómez, 2014). De la papa producida, un pequeño porcentaje (5%) recibe un proceso de recolección, lavado, selección y empaque, que se destina a las cadenas de supermercados como mercados especializados. El abastecimiento para la industria se realiza directamente de los productores o mayoristas (Figueroa N., Rosas L., & Torres M., 2012). Según el MADR (2011) el departamento de Nariño es el cuarto productor de papa en Colombia, sin embargo, el 92% del total de la producción departamental de papa es destinado a los mercados (en fresco), el 2% para autoconsumo y el 6% para semilla, mientras que del total de la producción destinada al mercado, el 47.23% es vendido en los centros mayoristas, el 37.90% se vende en finca, el 9.16% en plazas de mercado municipal y el 5.71% para procesamiento industrial (Ministerio del trabajo, 2011). Otra de las razones por las que el tubérculo se comercializa en estado fresco sin almacenamiento previo o reposado se debe a que en Colombia prima el hábito de consumo en ese estado (Gómez, 2008). En este sentido, las actividades industriales aportan poco al dinamismo del sector (Espinal, Martínez., Pinzón, & Barrios, 2005). Gómez (2014) afirma que la

agroindustria se ha responsabilizado de la poca investigación para generar nuevas presentaciones, pero que no se han dedicado recursos específicos para financiar investigación en procesamiento agroindustrial.

Sumado a lo anterior, la alta diversidad genética de la papa criolla (*Solanum phureja*), un periodo de reposo corto y a una brotación rápida responsables de pérdidas poscosecha, el mal manejo agroecológico, problemas fitosanitarios, la susceptibilidad a las heladas y los altos costos de producción en los cultivos, asociados con la demanda irracional de insecticidas, fungicidas y fertilizantes (Ramírez Suárez, Zárate Polanco, & Otálora Santamaría, 2011; Rivera, Herrera, & Rodríguez, 2003; Santamaría Galindo, Montañéz Gómez, & Sánchez Polo, 2010) ha hecho que los estudios acerca de éste tubérculo se enfoquen mayormente en caracterizaciones morfo agronómicas de variedades y especies, manejo agroecológico, evaluación de rendimiento y productividad de cultivos y mejoramiento genético para la resistencia a plagas y enfermedades, mas no en la parte agroindustrial.

Por otra parte, el consumo mundial de la papa está pasando del producto fresco a los productos alimentarios procesados industrialmente tales como papa congelada, papa frita, hojuelas, harinas, entre otras (FAO, 2009; Hernandez & Suarez, 2009), lo cual se debe principalmente a las tendencias de los cambios en los hábitos de consumo que se ven influenciados por varios factores, entre los cuales están, la concentración de la población en las grandes ciudades, menor tiempo disponible a las labores del hogar y el elevado costo de la energía para preparar los alimentos (Ligarreto & Suárez, 2003).

Los productos sometidos a fritura adquieren características únicas de aroma y textura, apreciadas por los consumidores, (R. Villamizar, Quiceno, & Giraldo, 2011) que no se consiguen con otras técnicas de procesamiento de alimentos, además, la fritura permite preservar al alimento mediante la destrucción térmica de los microorganismos y la inactivación de las enzimas (Fellows, 1998; Rimac, Lelas, Rade, & Simundié, 2004; Saguy & Dana, 2003). Y pese a que durante décadas los consumidores han preferido productos fritos y grasos debido a su combinación única entre sabor y textura (Gómez, 2012) hoy en día se ha incrementado la conciencia de la relación entre la alimentación, nutrición y salud, por lo cual se proponen y crean nuevas alternativas de procesamiento. La fritura a vacío es una técnica prometedora que puede ser una opción para la producción de snacks de frutas y verduras que presentan los parámetros de calidad esperados y responden a las tendencias de salud. Este proceso de fritura se realiza en un sistema cerrado con presiones muy por debajo de los niveles atmosféricos, lo que permite reducir sustancialmente el punto de ebullición del agua y por lo tanto la temperatura de fritura (Garayo & Moreira, 2002). De hecho, la mayor parte de los beneficios de esta tecnología son el resultado de la baja temperatura empleada y una exposición mínima al oxígeno. Dichos beneficios incluyen: la reducción de los efectos adversos sobre la calidad del aceite, la conservación del color y sabor naturales, la disminución del contenido de acrilamida, y la preservación de los compuestos nutricionales (Dueik, Robert, & Bouchon, 2010).

Lo anterior, se torna atractivo para la papa criolla (*Solanum phureja*) cultivada en el departamento de Nariño donde la diversidad es abundante (Rodríguez, Ñustez, & Estrada, 2009). La papa criolla nativa (*Solanum phureja*) se destaca por sus cualidades culinarias y características como alto valor nutricional, el doble que la papa común (*Solanum tuberosum*) (Rozo & Ramírez, 2011), fuente de carbohidratos y proteínas de alto valor biológico, vitaminas, minerales y carotenoides, agradable sabor y textura, fácil preparación, buena aceptación en el mercado con diversas formas de procesamiento (Arévalo Herrera & Rodríguez Molano, 2012). Es por ello que el procesamiento industrial en forma de papa frita con la tecnología previamente descrita de la papa nativa (*Solanum phureja*) como producto promisorio sería una de las mejores alternativas para la generación de valor agregado, aprovechándose en gran volumen para la agroindustria departamental, más aún cuando es escaso el procesamiento agroindustrial de variedades nativas autóctonas.

Sin embargo, como consecuencia de la transferencia de calor desde el aceite hasta el alimento y la transferencia de masa entre el aceite y el alimento, se presentan diferentes transformaciones físicas y químicas durante el proceso de fritura, tales como: pérdida de humedad, migraciones de componentes solubles, ganancia de aceite, deformaciones mecánicas, reacciones químicas, degradación de proteína, y finalmente, transformaciones fisicoquímicas de carbohidratos (Ortega & Montes, 2014), provocando en el alimento una serie de cambios deseables como la formación de la costra, el desarrollo del color característico, aroma, sabor y textura (Fellows, 1998).

Hay que tener en cuenta que el principal objetivo de la fritura por inmersión es remover el agua de los alimentos. Por esta razón es muy importante predecir la pérdida de humedad, no sólo para desarrollar un modelo para diseñar procesos de freído por inmersión sino también para controlarlo. La absorción de aceite también es otro aspecto muy importante, la cual está relacionada con la pérdida de agua (Ortega & Montes, 2014).

El modelado matemático de los procesos es una herramienta de gran utilidad para diseñar y predecir datos ya que permite anticipar la estimación del desarrollo de un proceso, disminuir la complejidad de los parámetros, reducir el número de experimentos y, como resultado realizar la optimización y el control integral de los procesos ahorrando energía, tiempo y costos. En el proceso de fritura, muchos modelos con diferentes grados de complejidad se han propuesto para describir el mecanismo de pérdida de humedad y la consecuente absorción de aceite (Jibaja, 2010) y que son muy utilizados en el estudio del proceso de fritura.

Todos los anteriores aspectos condujeron a la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué modelo matemático presenta un mejor ajuste de datos teóricos versus datos experimentales en los fenómenos de pérdida de humedad y absorción de aceite durante la fritura a vacío de papa ratona morada cultivada en el departamento de Nariño?

2. ESTADO DEL ARTE DE LA INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO E INNOVACIÓN

2.1 Generalidades de la papa criolla (*Solanum phureja*)

La especie *Solanum phureja* es una papa diploide perteneciente taxonómicamente a la familia solanácea, que se distribuye geográficamente, desde el norte de Bolivia hasta el suroccidente venezolano, con un centro de diversidad genética al sur de Colombia en el departamento de Nariño y el norte del Ecuador. (Martin, Bonilla, Ligarreto, & Fajardo, 2000). Usualmente cultivado entre los 2.000 y 3.400 metros sobre el nivel del mar (Piñeros, 2009).

2.1.1 morfología de la planta

La planta se caracteriza por tener un juego de tallos verdaderos (aéreos) y tallos modificados (estolones y tubérculos). Los tallos aéreos son herbáceos, de longitud y diámetro variables. Las plantas provenientes del tubérculo-semilla presentan, en promedio, cinco tallos los cuales ramifican de acuerdo a la densidad de siembra. Cada tallo se considera una unidad de producción independiente y puede llegar a producir entre 2.5 y 8.0 tubérculos. La raíz de la papa criolla, como la de la gran mayoría de papas, es escasa, de poco volumen de expansión e ineficiente a la hora de tomar y absorber agua y nutrientes (Piñeros, 2009).

2.1.2 factores ecofisiológicos

FAO (2009) afirma que la papa es una planta que tiene una gran capacidad de adaptación y se da bien sin que el suelo ni las condiciones de cultivo sean ideales, su cultivo se lleva a cabo en altitudes comprendidas entre los 2.600 y 3.500 msnm, con un rango de temperatura promedio de 10 a 20 °C. Adicionalmente, necesita un nivel de precipitaciones promedio de novecientos milímetros por año. Sin embargo, su cultivo puede desarrollarse con un nivel superior (Cevipapa, 2008).

El mejor suelo para el cultivo de la papa criolla debe presentar una textura franca, suelta y profunda que evita la acumulación de humedad en la raíz y un pH entre 5.2 y 5.9, además de un alto contenido de materia orgánica, conjuntamente se señala que la vida útil como producto fresco es de pocos días una vez se ha realizado la recolección del producto, debido a que presenta una rápida brotación o germinación y su ciclo vegetativo fluctúa en un periodo entre cuatro y cinco meses (Gómez 2014).

FAO (2009) reporta que las épocas de siembra dependen de las condiciones climáticas, especialmente lluvias y frecuencia de heladas. En el primer semestre se realiza la siembra de año grande (50% del área sembrada), que comprende los meses de enero a marzo, y en el segundo semestre la siembra de mitaca (30% del área), comprendida entre los meses de junio a agosto. En el resto del año se realizan siembras escalonadas en microclimas favorables.

2.1.3 Cosecha

Este proceso consiste en remover el suelo, extraer y recolectar los tubérculos, cuando están maduros y no se pelan al roce entre los tubérculos por efecto del manipuleo. La cosecha se efectúa cuando el cultivo

alcanza su madurez completa, caracterizado por presentar más del 80% de plantas tumbadas y en proceso de secado. Esta debe ser oportuna y adecuada, cuando el suelo presente una humedad apropiada, para evitar daños mecánicos y cortes en los tubérculos, daños por efecto de heladas desde adentro del suelo y/o daño por plagas (Puno, 2011).

2.1.4 Postcosecha

Comprende el periodo entre la cosecha del tubérculo y el momento en que esté es consumido. El acondicionamiento comienza con la limpieza del material extraño, generalmente tierra, seguidamente de la selección; teniendo como criterio los daños por plagas, enfermedades, daños mecánicos, daños fisiológicos y deformaciones, posterior a esto se realiza el lavado con manguera en estanques, costales, canastillas y posterior secado al ambiente, por último, se efectúa la clasificación tomando como parámetros; el tamaño, peso, color, forma y sanidad del producto destinado a mercados locales (Gómez & Ramírez, 1999).

2.1.5 Almacenamiento

Este debe ser realizado correctamente con el fin de prevenir pérdidas postcosecha de papas destinadas al consumo fresco o para la industria, en ambos casos el objetivo es evitar que cambien a una coloración verdes (que se acumule clorofila bajo la piel, la cual se asocia a la solanina, que es un alcaloide potencialmente tóxico), y que pierdan peso y calidad. Los tubérculos se deben mantener a una temperatura de entre 6 y 8 °C, en un ambiente oscuro y bien ventilado, con una humedad relativamente elevada; del 85 % al 90 % (FAO, 2009).

2.1.6 Composición nutricional

La papa (*solanum tuberosum*) tiene un gran contenido nutricional, recién cosechada puede llegar a contener un 80% de agua y 20% en materia seca, entre el 60% y 80% de esa materia seca corresponde almidón y tiene un contenido nulo de grasa. Respecto a su peso en seco, el contenido de proteína de la papa es análogo al de los cereales y es muy alto en comparación con otras raíces y tubérculos (FAO, 2009).

Este tubérculo además de destacarse por sus cualidades culinarias es fuente de carbohidratos y proteínas (el doble que la papa común) de alto valor biológico, vitaminas, minerales (Tabla 2.7) agradable sabor y textura, fácil preparación y buena aceptación en el mercado con diversas formas de procesamiento (Roza & Ramírez, 2011; Arévalo & Rodríguez, 2012).

Tabla 2. 1 Composición nutricional de la papa criolla (*Solanum phureja*).

Datos: (por 100 mL o g de porción comestible)			
COMPONENTE	Cantd.	COMPONENTE	Cantd.
Agua (g)	75.5	Hierro (mg)	0.60
Proteínas (g)	2.5	Riboflavina (mg)	0.06
Grasas (g)	0.10	Niacina (mg)	2.50
Carbohidratos (g)	20.9	Vitamina A (ug)	6.0
Fosforo (mg)	54.0	Vitamina C (mg)	15.0
Sodio (mg)	1.10	Tiamina (mg)	0.08
Calcio (mg)	7.0	Energía (Kcal)	95

Fuente: Hernandez & Suarez (2009)

2.1.7 Situación en Colombia

Colombia se considera el primer productor mundial de papa criolla, de la cual se siembran al año, en promedio, 8.500 hectáreas y se cosechan cerca de 100 mil toneladas, especialmente en los departamentos de Cundinamarca, Nariño y Boyacá (Arévalo Herrera & Rodríguez Molano, 2012), con un importante centro de diversidad localizado en el departamento de Nariño (Rodríguez et al., 2009).

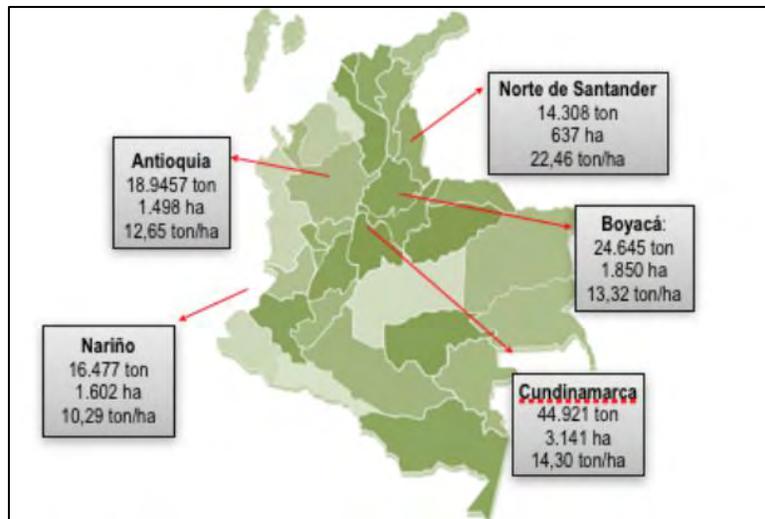


Figura 2. 1 Área cultivada, producción y rendimiento de papa criolla en el año 2013.

Fuente: (Agronet, 2015)

Sin embargo, la Federación nacional de productores de papa (Fedepapa, 2010) afirma que el panorama general del mercado nacional de la papa criolla esta mayormente concentrado en estado fresco (aproximadamente el 95%), el cual se canaliza a través de las grandes centrales de abasto y plazas locales. Lo anterior debido al predominio de los hábitos de consumo en ese estado, al escaso valor agregado y el bajo grado de procesamiento industrial (Gómez, 2014; Gómez, 2008).

De igual manera, Arévalo & Rodríguez (2012) señalan que, en términos generales, la agroindustria de papa criolla en Colombia apenas está en expansión, siendo aproximadamente 10 empresas las que se dedican a transformación industrial. Por su parte, Gómez (2014) afirma que la agroindustria se ha responsabilizado de la poca investigación para generar nuevas presentaciones, pero que no se han dedicado recursos específicos para financiar investigación en procesamiento agroindustrial. Sumado a lo anterior, el abastecimiento de tubérculo se ve afectado por los requerimientos de calidad para procesamiento que demanda la industria que no son fáciles de cumplir por parte de los productores, por lo que un alto volumen del tubérculo es rechazado debido a su corta vida útil, lo cual hace que el almacenamiento sea complicado. Adicionalmente, la comercialización y procesamiento del producto se debe realizar en el menor tiempo posible, ya que la rápida brotación y el manchado afectan considerablemente su calidad y características fisicoquímicas; lo cual ha ocasionado pérdidas postcosecha superiores al 21% (Gómez, 2014; Guerrero & Rivera, 2006).

2.1.8 Producción en el departamento de Nariño

En 2009, el 10% de la producción de papa en Nariño correspondió a la variedad criolla, la cual se cultiva en mayor cantidad en los municipios de Córdoba, Gualmatán, Ipiales, Puerres, El Encano, Pasto, Potosí, Pupiales y Tuquerres, con un total de 2051 ha cosechadas (Madroño et al., 2013).

En cuanto a cantidad fedepapa (2010) afirma que con un área total cultivada de 10.091 ha se obtuvieron 138.752,3 ton. Del total producido, Cundinamarca participó con 32,5%, Boyacá con el 17,8%, Antioquia con el 13,7%, Nariño con el 11,9% y Norte de Santander con el 9,9%.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Modelar las cinéticas de pérdida de humedad y absorción de aceite durante la fritura a vacío de papa ratona morada del departamento de Nariño.

3.2 Objetivos específicos

- ✓ Realizar y evaluar la cinética de pérdida de humedad durante la fritura a vacío de papa ratona morada.
- ✓ Realizar y evaluar la cinética de absorción de aceite durante la fritura a vacío de papa ratona morada.
- ✓ Determinar la energía de activación (E_a) de los fenómenos de absorción de aceite y pérdida de húmeda durante la fritura a vacío de un genotipo de papa nativa (*Solanum phureja*) ratona morada.

4. FRITURA A VACÍO Y MODELACIÓN MATEMÁTICA DE PAPA (*SOLANUM PHUREJA*) VARIEDAD RATONA MORADA

4.1 fundamentos teóricos

4.1.1 fritura a vacío de alimentos

4.1.1.1 Generalidades

Según (Villamizar V, Quiceno G, & Giraldo G, 2012) la fritura a vacío es una técnica de preparación de alimentos que busca en primera instancia reducir el contenido de grasa sin que el producto pierda sus cualidades sensoriales, pero también se ha comprobado que, además de reducir el contenido final de grasa, los productos fritos a vacío presentan otras ventajas, como un contenido muy bajo de acrilamida y una mejor calidad organoléptica y nutritiva.

En este proceso el alimento se sumerge en aceite en condiciones de presión subatmosféricas en un sistema cerrado. La presión de trabajo disminuye la temperatura de ebullición del agua contenida en el alimento, permitiendo la disminución de la temperatura del aceite durante la fritura sin afectar negativamente la textura característica del alimento frito (Coronel, 2014). Debido al descenso de presión, se reducen los puntos de ebullición tanto del aceite como de la humedad en los alimentos, lo que puede reducir el contenido de aceite en el producto frito, puede preservar el color natural y sabores del producto debido a la baja temperatura y contenido de oxígeno durante el proceso, y tiene menos efectos adversos sobre la calidad del aceite (Troncoso & Pedreschi, 2009).

4.1.1.2 Transferencia de calor y de materia

En el proceso de fritura al vacío, por el hecho de estar a presiones menores a la atmosférica, el punto de ebullición del agua es menor que a presión atmosférica (Garayo y Moreira, 2002), en consecuencia, la temperatura del medio para conseguir evaporar el agua es menor, por lo tanto, las temperaturas del aceite serán más bajas (Yamsaengsung y Rungsee, 2006). Por consistir básicamente en el mismo proceso que la fritura a presión atmosférica, el mecanismo de transferencia de calor es similar.

Como consecuencia de la diferencia de temperatura entre el alimento y el aceite se desencadena un proceso sincrónico de transferencia de calor y de materia. El calor se transfiere del aceite al alimento, evaporando el agua del alimento, pasando al aceite como burbujas de vapor; mientras que este penetra el alimento. Al mismo tiempo las propiedades físicas del alimento varían con los cambios de temperatura y de humedad que suceden en el interior del mismo (Jibaja, 2010; Moreira, 2001; Sahin, Sastry, & Bayindirli, 1999; Vitrac, Trystram, & Raoult-Wack, 2000).

Durante este proceso, la transferencia de calor se realiza por los mecanismos de convección y conducción como se muestra en la figura 2.2 (Jibaja, 2010). La transferencia por convección, se da entre el

aceite caliente y la superficie del alimento, mientras que la transferencia por conducción, tiene lugar desde la superficie hacia el interior del alimento (Aguilera, 1997; Moreira, 2001).

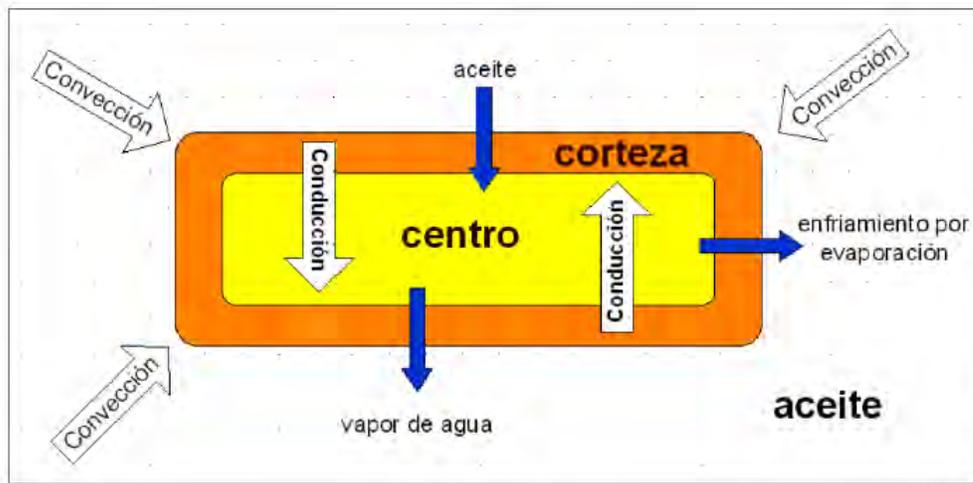


Figura 4. 1 Transferencia de calor y de materia durante el proceso de fritura.

Fuente: (Aguilera, 1997)

La transferencia de materia se caracteriza por la pérdida de humedad y la ganancia de aceite, inducidos por la transferencia de calor del aceite al alimento y cuyos flujos no son sincrónicos (Aguilera, 1997).

Como consecuencia de la transferencia de calor desde el aceite hasta el alimento y la transferencia de masa entre el aceite y el alimento, se presentan diferentes transformaciones físicas y químicas durante el proceso de fritura, tales como: pérdida de humedad, migraciones de componentes solubles, ganancia de aceite, deformaciones mecánicas, reacciones químicas, degradación de proteína, y finalmente, transformaciones fisicoquímicas de carbohidratos (Ortega & Montes, 2014), provocando en el alimento una serie de cambios deseables como la formación de la costra, el desarrollo del color característico, aroma, sabor y textura (Fellows, 1998). Otra consecuencia es la presencia en el producto de dos regiones características: la costra o superficie deshidratada, donde se producen los principales cambios, y el interior del alimento, donde la temperatura no supera la temperatura de ebullición del agua (Dobarganes, Márquez-Ruiz, & Velasco, 2000; Jibaja, 2010).

Cinética de pérdida de agua

Según Farkas, Singh, & Rumsey (1996) y Stier (2004), la cinética de transferencia de agua durante el proceso de fritura es muy similar a la que ocurre en cualquier otro proceso de deshidratación y comprende tres etapas (Jibaja, 2010).

Los medios de fritura como los aceites poseen alta capacidad calorífica, lo cual permite la transferencia de energía para superar el punto de ebullición del agua (Coronel, 2014), así, la etapa de calentamiento del alimento, inicia cuando el alimento se sumerge en el aceite caliente y termina cuando la superficie de este alcanza la temperatura de ebullición del agua superficial. Esta etapa tiene una duración muy corta, se caracteriza por la ausencia de burbujas de vapor y se identifica con la etapa de velocidad de secado creciente (Farkas et al., 1996; Jibaja, 2010).

En la etapa de velocidad de secado constante, la cantidad de calor transferido es tal, que el agua superficial del alimento comienza a bullir haciendo que esta se evapore muy rápidamente. Es una etapa muy breve e incluso imperceptible, y se caracteriza por una explosión de burbujas de vapor decreciente y la formación de la costra en la superficie del alimento (Aguilera, 1997; Jibaja, 2010).

En la etapa de velocidad, que es la de mayor duración, la temperatura del interior del alimento se acerca a la temperatura de ebullición del agua, mientras que la temperatura de la corteza se aproxima a la del aceite caliente y la humedad disminuye a niveles muy bajos (Aguilera, 1997; Farkas et al., 1996; Jibaja, 2010). La transferencia de calor en la interfase costra e interior del alimento disminuye y permite la salida de agua del interior del alimento debido al aumento del espesor de la costra y su baja conductividad térmica. Esta etapa finaliza cuando ya no se aprecia la salida de burbujas de vapor del alimento (Aguilera, 1997; Farkas et al., 1996; Jibaja, 2010).

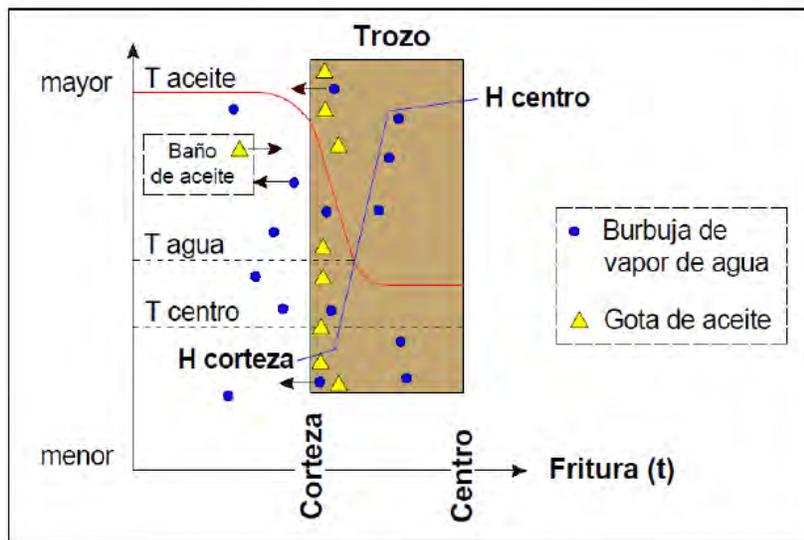


Figura 4. 2 Perfiles de temperatura y humedad durante el proceso de fritura.

Fuente: (Aguilera, 1997).

Cinética de absorción de aceite

La cinética de ganancia de aceite inicia con la formación de la costra y el aumento de la temperatura del producto. El contenido de aceite aumenta con el tiempo de fritura y se concentra principalmente cerca de la superficie del alimento (Costa & Oliveira, 1999; Jibaja, 2010; Moreira, Palau, & Sun, 1995). La mayor retención de aceite se da cuando se retira el alimento del medio de fritura durante el período de enfriamiento debido a que la presión de vapor disminuye produciendo un efecto de succión y ayudando a que el aceite disponible, a nivel superficial, atraviese la costra e ingrese al interior del alimento (Aguilera, 1997; Jibaja, 2010; Moreira et al., 1995; Vitrac et al., 2000).

La calidad del aceite influye mayormente en la absorción de aceite que el tipo de aceite utilizado. una absorción excesiva de aceite y el oscurecimiento del producto son consecuencias de los cambios que sufre el aceite, tales como la degradación térmica e incorporación de compuestos extraídos del producto, así como también la producción de surfactantes (Aguilera, 1997; Dobarganes et al., 2000; Jibaja, 2010). La absorción de aceite está relacionada con la humedad residual del alimento, así, cuanto mayor es la cantidad de agua que ha salido del producto, mayor es la retención de aceite en el mismo (Gamble, Rice, & Selman, 1987; Jibaja, 2010).

Otro factor que afecta el contenido de aceite es la temperatura de enfriamiento del producto. Para lo cual, con el fin de que el producto no absorba excesiva cantidad de aceite es recomendado evitar un cambio brusco de temperatura durante la etapa de enfriamiento (Jibaja, 2010; Yamsaengsung & Moreira, 2002).

Los principales parámetros que influyen en la pérdida de agua y la absorción de aceite son la temperatura y el tiempo de fritura. La forma del alimento y la relación entre el tamaño del producto y la superficie expuesta al medio circundante son otros parámetros a considerar en el proceso de fritura (Dobarganes et al., 2000; Jibaja, 2010; Moreira, 2001).

4.1.2 Modelado matemático del proceso de fritura a vacío

4.1.2.1 Generalidades

Un modelo matemático es la representación de un sistema real, cuya descripción de sus propiedades y características se lleva a cabo en términos de variables matemáticas y operaciones. Un modelo permite disminuir la complejidad de parámetros en un proceso, reducir el número de experimentos, ayudando a ahorrar, en términos de energía, tiempo y costos de operación, así como también extrapolar los resultados hacia regiones inexploradas (Jibaja, 2010; Sablany, Datta, Rahman, & Mujumdar, 2006).

Actualmente, el modelado matemático es una herramienta básica para diseñar y optimizar los procesos industriales, puesto que permite predecir el desarrollo de un proceso y, en consecuencia, realizar la

optimización, el control de la calidad y la mejora de los procesos productivos. Es importante tener en cuenta factores al momento de seleccionar un modelo matemático que permita describir un proceso, tales como: la fidelidad, la exactitud, la reproductibilidad, el costo, el tiempo, la complejidad, la capacidad y la posibilidad de aplicación (Banga, Balsa-Canto, Moles, & Alonso, 2003; Banga & Singh, 1994; Cueto, García, & Cepeda, 2007; Himmelblau & Bischoff, 1992; Jibaja, 2010).

4.1.2.2 Construcción del modelo

Para modelar un proceso tan complejo como la fritura, es importante considerar que los principales fenómenos que se producen en la fritura son la remoción parcial o completa del agua y la absorción de aceite en los poros del producto. Por esta razón, predecir la pérdida de humedad y la absorción de aceite en el producto final son los aspectos más importantes para modelar y controlar el proceso de fritura (Costa & Oliveira, 1999; Jibaja, 2010).

En el modelado de la fritura y de cualquier otro proceso se identifican los siguientes puntos:

- *Identificación de las resistencias controlantes.* En primer lugar, se debe identificar si la transferencia de calor o de materia controlan la velocidad del proceso. Cuando ambas resistencias sean significativas, se debe incluir ecuaciones que consideren la transferencia simultánea (Blasco, García-Pérez, Bon, Carreres, & Mulet, 2006; Mulet, 1994).
- *Selección del mecanismo de transferencia de materia.* Existen diferentes teorías que pretenden explicar la pérdida de agua y la absorción de aceite. Una de las más utilizadas es la teoría difusional, que intenta explicar la pérdida de agua mediante leyes físicas. También se pueden utilizar modelos empíricos sin ningún fundamento físico, en el caso de la absorción de aceite, cuyo único objetivo es la descripción e identificación de las variables más relevantes del proceso y no intentar explicar el mismo (Mulet, 1994).
- *Obtención de las ecuaciones matemáticas.* Una vez se selecciona la teoría, se obtienen las ecuaciones matemáticas que describirán el proceso, para ello, se asumen con frecuencia una serie de hipótesis que pueden estar relacionadas con la homogeneidad e isotropicidad del sólido o con sus variaciones de volumen durante el secado (Blasco et al., 2006; Mulet, 1994).
- *Determinación de las propiedades del material.* Los modelos pueden presentar propiedades inherentes de los materiales que deben ser identificadas de manera experimental, como las físicas y estructurales (Singh, Farkas, & Rumsey, 1996).
- *Resolución de las ecuaciones matemáticas.* En función del objetivo de la modelización, se pueden plantear modelos con diferentes grados de complejidad en la resolución. Según las ecuaciones planteadas, se pueden utilizar métodos de resolución que pueden ser analíticos, numéricos o de

elementos finitos (Crank, 1975; Ngadi, Watts, & Correia, 1997; Simal, Rosselló, Berna, & Mulet, 1998).

- *Validación del modelo.* Luego de resolver el modelo, es necesaria su validación para demostrar su fiabilidad. Para ello, una manera es extrapolar los resultados obtenidos a otras condiciones experimentales y ver la capacidad de ajuste del modelo en esas condiciones (Bon, Simal, Rosselló, & Mulet, 1997).

4.1.2.3 Modelado de la pérdida de agua

El modelado de la pérdida de agua es el más trabajado, pues varios estudios realizados enfocan este proceso (Garayo & Moreira, 2002; Yamsaengsung & Moreira, 2002). Existen varios tipos de modelos que se pueden utilizar y se indican a continuación;

A. modelos empíricos

Estos son modelos basados en la observación y no pretenden describir cómo tiene lugar el proceso y sólo interpretan de forma empírica los datos e identifican las variables más relevantes del proceso. Estos modelos son útiles con fines de diseño, especialmente cuando los problemas a resolver son excesivamente complicados (Jibaja, 2010; Mulet, 1994).

B. Modelos difusionales

Estos son modelos fácilmente formulados y normalmente proporcionan resultados razonables. El principal inconveniente en el que se incurre frecuentemente son las suposiciones que se tienen en cuenta para poder resolverlo. Generalmente, se asume una difusividad efectiva que incluye los efectos relacionados con la cinética, tanto los fenómenos conocidos como los desconocidos (Jibaja, 2010; Mulet, 1994).

C. Modelos de frente de recesión o frontera móvil

En este tipo de modelos se considera la existencia de una interfase móvil agua-vapor de agua. En este tipo de modelos, la fritura debe ser estudiada de manera similar a otros procesos tales como la congelación de agua, fusión del hielo, fusión de metales, debido a la formación de la corteza en el alimento frito, en los que se observa la existencia de una interfase móvil durante el proceso (Jibaja, 2010; Singh, 2000).

4.1.2.4 Modelado de la absorción de aceite

Para la mayoría de los autores el modelado de la cinética de absorción de aceite se realiza juntamente con el modelado de la pérdida de agua, utilizando métodos similares. Generalmente, se realiza con

métodos empíricos, debido a la falta de conocimiento del mecanismo de transferencia que ocurre, principalmente en la etapa de enfriamiento (Garayo & Moreira, 2002).

4.2 Antecedentes del tema

Aguilera, (1997) encontró que la pérdida de humedad y la absorción de aceite que caracterizan la transferencia de masa en el proceso de fritura son dos fenómenos que operan en contracorriente en los que el agua sale del producto en forma de burbujas de vapor y cuyos mecanismos de transporte aún no han sido aclarados.

Así mismo, Aguilera (1997); Demirkol, Ferruh, & Koray (2006) y Kozempel, Tomasula, & Craig (1991) determinaron que cuanto mayor es el contenido de humedad de los productos alimenticios sometidos al freído por inmersión, mayor es la absorción de aceite, y se presume que, cuanto menor contenido de humedad, especialmente en las capas externas del producto, hay una menor evaporación de agua y consecuentemente menor porosidad interna en la que se sitúa el aceite absorbido.

Lamberg (1990) determinó que el contenido de humedad en la superficie podría ser el parámetro crítico en la absorción de aceite en tajadas de papa frita. Se evidenció menor absorción de aceite en la superficie a medida que disminuía la humedad en aquellas sometidas a operaciones de escaldado y secado hasta humedades comprendidas entre 1,1 y 2,86%.

Gamble et al. (1987); Kozempel et al. (1991); Moreira & Bakker-Arkem (1989); al igual que Sosa-Morales, Orzuna-Espiritu, & Vélez-Ruiz (2006) y Vélez & Sosa-Morales (2003) modelaron la pérdida de humedad usando la ley de difusión de Fick y predijeron la absorción de aceite con un modelo cinético de orden cero. Moreira et al. (1995) predijeron la pérdida de humedad de tajadas de tortilla de maíz durante la fritura usando el mismo modelo de difusión, encontrando una alta absorción de aceite.

Krokida, Oreopoulou, & Maroulis (2000), encontraron que la temperatura del aceite y el espesor de trozos de papa frita influyeron significativamente en la absorción de aceite y la pérdida de humedad empleando un modelo cinético de primer orden para predecir la pérdida de humedad y la absorción de aceite en función del tiempo de fritura. Math, Velu, Nagender, & Rao (2004), utilizaron un modelo exponencial de primer orden para estudiar los mecanismos de transferencia de humedad y absorción de aceite durante la fritura de papas. Yildiz, Palazoglu, & Erdogdu (2007), determinaron los parámetros de transferencia de calor y masa durante la fritura por inmersión en aceite de girasol de rebanadas de papa en forma de paralelepípedo de 8,5 x 8,5 x 70 mm, empleando temperaturas de 150, 170 y 190 °C. Los coeficientes de difusión para esas temperaturas, respectivamente, fueron de $9,2 \pm 1,1 \cdot 10^{-9}$, $11,0 \pm 1,0 \cdot 10^{-9}$ y $18,2 \pm 0,7 \cdot 10^{-9}$ m²/s.

Jibaja (2010), modeló matemáticamente la cinética de absorción de aceite durante el proceso de fritura al vacío de hojuelas de tomate de árbol en rodajas de 3 mm de espesor aplicando tres modelos empíricos, de los cuales el modelo de Monod y el modelo propuesto por Moyano & Pedreschi (2006), describieron adecuadamente la cinética de absorción de aceite durante el proceso de fritura en condiciones de vacío. La curva de pérdida de humedad presentó la forma típica de las curvas de secado en el período decreciente. A partir de los 120 s del proceso de fritura, la humedad se mantuvo en equilibrio, alrededor del 2 %. El contenido de aceite se incrementó rápidamente en los primeros 30 s y luego alcanzó el equilibrio a partir de los 90 s del tiempo de fritura. El contenido máximo de aceite en las hojuelas fue de 0,1306 g/g bs.

Bermúdez, Vélez, & Arrázola (2010), encontraron modelos de mecanismos de transferencia de masa durante el freído por inmersión de trozos de dos variedades de ñame, calculando la pérdida de humedad a varias temperaturas y tiempos de freído, y estudiaron el efecto de la temperatura de freído en la absorción de aceite y evaporación de agua en función del tiempo de freído. En los resultados obtenidos, observaron que a 180 s y temperatura de 140 °C hay mayor absorción de aceite, teniendo en cuenta simultáneamente la pérdida de humedad a 180 °C durante 540 s. Los datos experimentales se ajustaron a un modelo exponencial de primer orden para la transferencia de humedad ($r > 0,9$) en ambos cultivares. El coeficiente de difusión de la humedad de las dos variedades de ñame, freídos a temperaturas de 140, 160 y 180 °C en tiempos de 1 a 9 minutos fueron de $8,11 \pm 0,76$, $8,21 \pm 0,81$ y $8,62 \pm 0,71 \cdot 10^{-9}$ m²/s, para la variedad Diamante 22, y $8,32 \pm 0,82$, $8,38 \pm 0,78$, $8,54 \pm 0,84 \cdot 10^{-9}$ m²/s para la variedad Pico de Botella, y la energía de activación fue de 24,43 kJ/mol para la variedad Diamante 22 y 21,27 kJ/mol para la variedad Pico de Botella.

Osorio, Cerón, Rodríguez, Castellanos, & Chávez (2010) y Osorio, Rodríguez, Castellanos, & Chávez (2010) realizaron la cinética de absorción de aceite y pérdida de humedad en chips de arveja (*Pisum sativum* L.) en diferentes condiciones de fritura a presión atmosférica y de vacío. Se determinó dependencia de la difusividad con la temperatura y la presión; al evaluarla con la ecuación de Arrhenius se obtuvieron E_a de 5.5868, 4.7169 y 3.82427 kJ/mol y E_a de 18.672, 13.829 y 13.753 kJ/mol a presiones de 78, 43 y 9 kPa para absorción de aceite y pérdida de humedad, respectivamente. El modelo de Monod utilizado para simular el proceso de absorción de aceite durante la fritura de arveja, mostró una buena calidad de ajuste sobre las curvas experimentales, validando su utilización.

Barrios, Osorio, & Cerón (2015) realizaron la cinética de pérdida de humedad y absorción de aceite durante la fritura por inmersión de arveja (*Pisum sativum* L.) variedad Sureña, empleando un modelo exponencial para la cinética de absorción de aceite mientras que la pérdida de humedad se estudió con el modelo de Newton. Los modelos estudiados describieron adecuadamente los dos fenómenos de transferencia de masa. Las constantes cinéticas calculadas a temperaturas de 160, 180 y 200 °C fueron:

absorción de aceite (0.0084, 0.0088 y 0.0094s⁻¹) y pérdida de humedad (0.0125, 0.0144 y 0,0194 s⁻¹) mientras que los valores de difusividad obtenidos fueron (0.1551 x 10⁻⁹, 0.1787 x 10⁻⁹ y 0.2371x 10⁻⁹ m²/s). Tanto la difusividad como los parámetros cinéticos presentaron dependencia con la temperatura al evaluarlos, con la ecuación de Arrhenius se obtuvo la energía de activación 18.13 kJ/mol.

Pinedo, (2011) Realizo la comparación entre fritura convencional y a vacío en kiwi (*Actidinia chinensis*) viéndose reflejado que la fritura a vacío muestra una serie de ventajas como la preservación del color natural y el flavor del producto o el mantenimiento de la calidad del aceite durante más tiempo.

Díaz, Romero, Castellanos, Rodríguez, Gutiérrez & Restrepo (2016) encontraron diferencias significativas en la fritura a vacío pues se concluyo que la fritura a vacío influyó en el proceso térmico de la hamburguesa, al disminuir el punto de ebullición del agua contenida en esta, lo cual combinado con una alta temperatura de aceite (180°C), significó una disminución en el tiempo de cocción del centro del producto, pudiendo ser beneficioso para la preservación y estabilidad del aceite, así como la conservación del valor nutricional del producto. La absorción de aceite se vio influida por la presión aplicada al medio de fritura, siendo mayor en la fritura aplicada a vacío (40 Kpa), donde la velocidad de transferencia de agua al medio y formación de poros se ve mayor beneficiada.

Villamizar V et al., (2012) evaluó el comportamiento de los parámetros de calidad de un pasa bocas frito hecho con mango (*Mangifera indica* L.), utilizando vacío sobre una pasta elaborada con ese fruto. El proceso de fritura se realizó aplicando diferentes presiones de vacío (0.4, 0.5, 0.6 bar), temperaturas (100, 110 y 120 °C) y tiempos (30, 45, 60, 75 y 90 s). Obteniendo como resultado que la fritura a vacío mejora las características de calidad del producto, el mejor tratamiento fue 0.5 bar de presión, 110 °C de temperatura y 90 seg de inmersión.

Coronel (2014) encontró que los chips de papa elaborados por fritura en vacío presentaron en promedio un 50% menos en contenido de materia grasa y un 90% menos de acrilamida que los chips elaborados por fritura tradicional.

5. METODOLOGÍA

5.1 Localización

La investigación se realizó en el laboratorio de investigación en conservación y calidad de alimentos (Imagen 5.1.) de la Facultad de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad de Nariño sede Torobajo, Pasto, Nariño, localizada a 2527 msnm., con una temperatura promedio de 14 °C y una humedad relativa de 70% (Cerón et al., 2015).



Imagen 5. 1 Laboratorio de investigación en calidad y conservación de alimentos

Fuente: este estudio

5.2 Material experimental

Se utilizó papa (*Solanum phureja*) de la variedad Ratona Morada en estado fresco, proporcionada por el proyecto “Mejoramiento tecnológico y productivo del sistema de papa en el departamento de Nariño”, la recolección del tubérculo se realizó en terrenos de cultivo de la granja experimental Botana, localizada en el Altiplano de Pasto (Nariño) a 2820 msnm, en las coordenadas 01° 09' 12" Latitud Norte y 77° 18' 31" Longitud Oeste, con temperatura promedio de 13 °C y 970 horas sol/año, precipitación pluvial promedio de 803 mm/año y humedad relativa del 82% (Morillo, Villota, Lagos, & Ordóñez, 2011), condiciones favorables para el cultivo. En la imagen 5.2 se muestra la variedad utilizada en esta investigación.

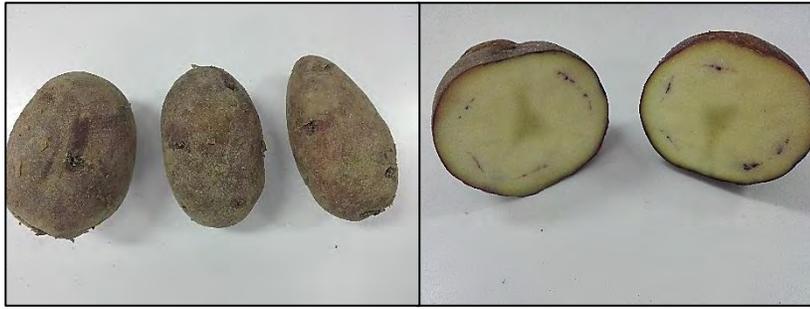


Imagen 5. 2 Papa (*Solanum phureja*) variedad Ratona Morada en estado fresco.

Fuente: este estudio

5.2.1 Operaciones preliminares

5.2.1.1 Limpieza

Se realizo con ayuda de un recipiente en donde se sumergió el material vegetal con abundante agua y uso de esponjillas (Imagen 5.3), con el fin de retirar posible material extraño.



Imagen 5. 3 Limpieza de papa (*Solanum phureja*) variedad Ratona Morada.

Fuente: este estudio

5.2.1.2 Selección

Se realizo de manera visual, eligiendo aquellos tubérculos que no estuvieran viejos, ni con brotes, magulladuras o daños por pudrición (Imagen 5.4).



Imagen 5. 4 Selección de papa (*Solanum phureja*) variedad Ratona Morada.

Fuente: este estudio

5.3 Construcción y modelado de las cinéticas de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura a vacío de papa (*Solanum phureja*) variedad Ratona Morada.

5.3.1 Proceso de fritura a vacío

Cada unidad experimental se constituyó por 1.36 ± 0.03 g de papa Ratona Morada, a manera de finas rodajas. El corte de las rodajas se realizó a mano con un rayador con regulación de corte de 2 mm de espesor, empleando tubérculos enteros con cáscara, para el diámetro de dichas rodajas se utilizó una figura cilíndrica de 18,60 mm de diámetro.

El proceso de fritura se llevó a cabo en batch, utilizando un prototipo a escala diseñado por la empresa CENTRICOL LTDA de capacidad 6 Litros (Figura 5.1), provisto de una cámara de vacío (1) de acero inoxidable con capacidad 6 L, en el interior de este se encuentra una resistencia eléctrica (2) regulada por un control automático, un porta muestras (3) desmontable de acero inoxidable, una termocupla de termómetro digital (4), una válvula para vaciado del equipo (5) y la tapa del sistema de fritura (6). En la parte externa del equipo se encuentra el tablero de control (7), compuesto por el controlador y medidor digital de temperatura, presión y tiempo; el interruptor de encendido y apagado de la placa calefactora o resistencia, y de la bomba de vacío, junto con el interruptor general de funcionamiento (8). Por otra parte, también se encuentra la bomba (9), la trampa de grasas (10), el vaso recolector de residuos (11), el vacuómetro (12), la válvula para romper el vacío (12) y el sistema de poleas (14) para levantar y cerrar la tapa de la cámara de vacío y por último un condensador (15). Se utilizó aceite 100% vegetal (Girasol), con punto de humo de 230 °C de acuerdo a los requisitos de la Norma Técnica NTC 3272 (ICONTEC, 1997). Se evaluaron tres presiones y tres temperaturas de fritura: 20 Kpa, 50 Kpa y 81 Kpa; 140 °C, 160 °C y 180

°C con una variación de ± 5 Kpa y ± 2 °C respectivamente, por tiempos de hasta 300 segundos. La relación producto/aceite se mantuvo constante 1:300 (p/v). El exceso de aceite superficial se eliminó con toallas de papel absorbente según la metodología descrita por Bravo-Vásquez (2008).

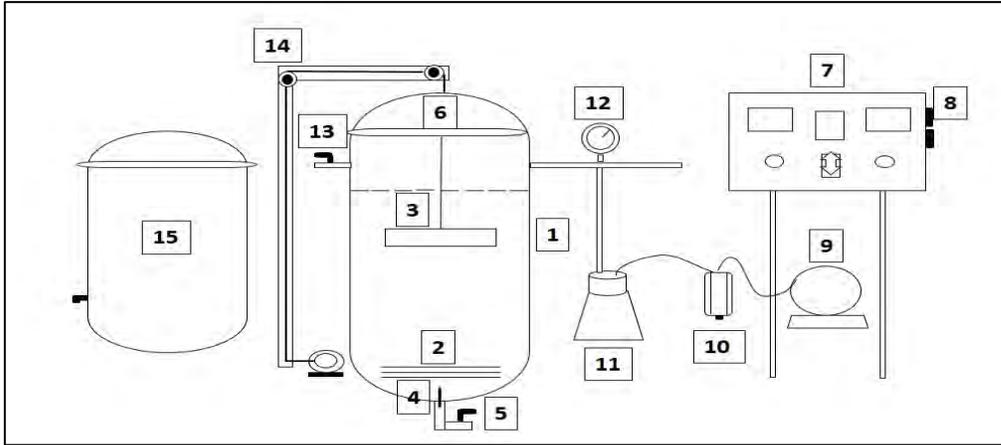


Figura 5. 1 Esquema de equipo de fritura a vacío.

Fuente: este estudio



Imagen 5. 5 Proceso de fritura a vacío.

Fuente: este estudio

5.3.2 Construcción y modelado de la cinética de pérdida de agua

5.3.2.1 Determinación de contenido de agua

Se midió el contenido humedad empleando un Determinador Electrónico de Humedad (Versión 1.1, Kern DBS, KERN & Sohn GmbH, Alemania); se tomaron muestras de 1.36 ± 0.03 g de cada tratamiento los resultados se expresaron en base seca (g de agua / g sólido seco). El análisis se llevó a cabo por triplicado.



Imagen 5. 6 Determinación del contenido de agua.

Fuente: este estudio.

5.3.2.2 Construcción de la cinética de pérdida de agua

Con los resultados experimentales de contenido de agua obtenidos, se construyó la cinética de pérdida de agua, representando los valores medidos de contenido de agua de las rodajas como valores adimensionales; dividiendo el contenido de agua a tiempo real (M_t) entre el contenido de agua inicial (M_0) de cada muestra en función del tiempo de fritura para cada temperatura evaluada. La gráfica resultante fue obtenida mediante el programa Matlab (R2015b).

5.3.2.3 Modelado matemático de la cinética de pérdida de agua

Para modelar matemáticamente la cinética de pérdida de agua, se aplicaron tres modelos empíricos expuestos por Vega, Ireland, & Lemus (2007); Soto, Ortega, Flores, & Orozco (2010) y Da Rocha et al. (2012); ecuaciones 1, 2 y 3, respectivamente.

I. Modelo de Newton

$$MR = e^{(-k_1t)} \tag{1}$$

II. Modelo de Henderson – Pabis

$$MR = a e^{(-k_2t)} \tag{2}$$

III. Modelo de Page

$$MR = e^{(-k_3tn)} \tag{3}$$

Dónde: *MR*: relación de humedad adimensional, descrita en la ecuación (4); *k1*, *k2*, *k3*: constantes de velocidad de pérdida de agua (s-1); *t*: tiempo de pérdida de agua en la fritura (s); *a* y *n*: constantes de los modelos.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \tag{4}$$

Dónde: *Mt*: contenido de agua al tiempo *t* (g de agua/g de sólido seco); *Me*: contenido de agua en el equilibrio (g de agua/g de sólido seco) y *M0*: contenido de agua inicial (g de agua/g de sólido seco). Para el contenido de agua en el equilibrio, se consideraron los valores más pequeños de contenido de agua residual obtenidos a las condiciones máximas de temperatura (160 °C) al terminar el proceso de fritura.

El ajuste de los datos experimentales de *MR* a los modelos matemáticos se realizó aplicando regresiones no lineales con una variable independiente (tiempo de fritura) mediante la aplicación *Curve Fitting Toolbox*TM del programa Matlab versión R2015b.

5.3.3 Construcción y modelado de la cinética de absorción de aceite

5.3.3.1 Determinación del contenido de aceite

Se procesaron 2.00 ± 0.05 g de cada tratamiento. Se empleó un equipo de extracción Soxhlet, utilizando como solvente éter etílico al 99.8%, según la metodología descrita por Bernal (1998) y con un reflujo de 6 h. El contenido de aceite se pesó en una balanza analítica (OHAUS, modelo PA214). La recuperación del solvente se hizo empleando un evaporador rotatorio (Eyela oil bath OSB-2000). Posteriormente, se enfrió y peso. Los resultados se expresaron en base seca (g de aceite / g sólido seco).

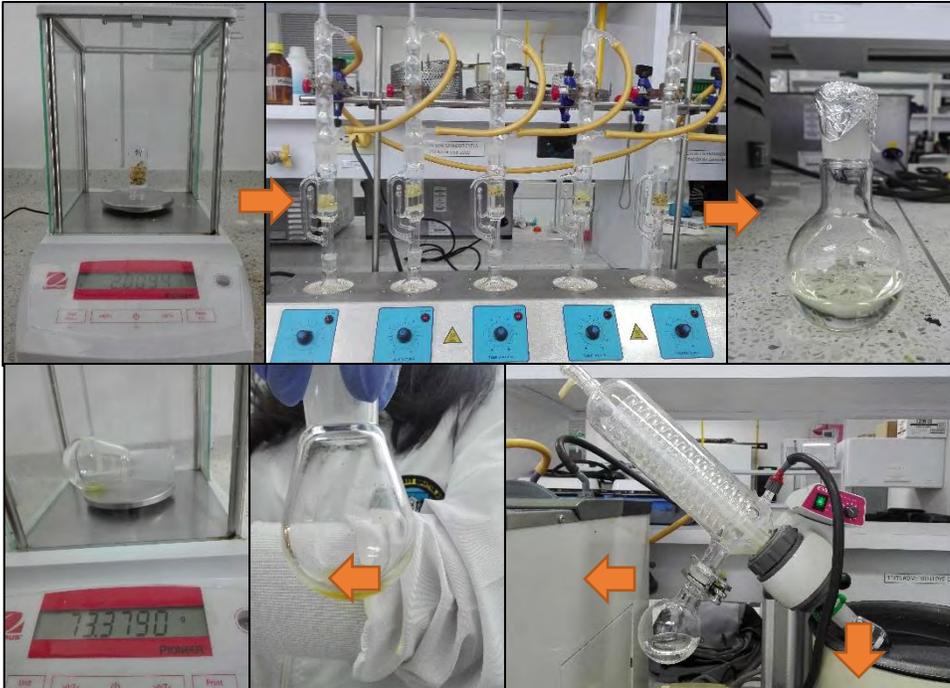


Imagen 5. 7 Determinación del contenido de aceite.

Fuente: este estudio.

5.3.3.2 Construcción de la cinética de absorción de aceite

Se realizó de acuerdo a la metodología descrita en el apartado 5.3.2.2., con los resultados experimentales de contenido de aceite en base seca obtenidos en función del tiempo de fritura para cada temperatura.

5.3.3.3 Modelado matemático de la cinética de absorción de aceite

Se determinó mediante la aplicación de tres modelos empíricos expuestos por Bravo-Vásquez (2008); Moyano & Pedreschi (2006), Krokida et al. (2000), ecuaciones 5, 6 y 7, respectivamente.

I. Modelo de Monod

$$Y = \frac{(Y_{e1} * b)}{(b + t)} \quad (5)$$

II. Modelo de Moyano – Pedreschi

$$Y = \frac{(Y_{e2} * K_1 * t)}{(1 + K_1 * t)} \quad (6)$$

III. Modelo de primer orden

$$Y = Y_{e3} * (1 - e^{-k_2 * t}) \tag{7}$$

Dónde: Y : contenido de aceite al tiempo t (g de aceite/g de sólido seco); $Ye1$, $Ye2$, $Ye3$: contenido de aceite en el equilibrio o máximo contenido de aceite, a tiempo infinito (g de aceite/g de solido seco); $k1$, $k2$: constantes de velocidad de absorción de aceite (s-1); t : tiempo de absorción de aceite en la fritura (s); b : tiempo de fritura durante el cual se ha adquirido la mitad del contenido máximo de aceite (s).

El ajuste de los datos experimentales de Y a los modelos matemáticos, la estimación inicial y la determinación de los parámetros empíricos de los modelos se realizó de acuerdo a la metodología descrita en el apartado 5.3.2.3.

5.3.4 Análisis estadístico

El análisis estadístico del contenido de agua, del contenido de aceite y de los parámetros cinéticos de los modelos se expresaron como la media más o menos la desviación estándar y fueron analizados estadísticamente con el programa Statgraphics Centurión XVI.I. Para identificar si existen diferencias significativas entre las medias de los valores, se efectuó el análisis de varianza con el procedimiento ANOVA y, en caso de existir diferencias, la prueba de múltiples rangos a través del método LSD de Fisher a un 95 % de nivel de significancia se utilizó para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras.

5.4 Establecimiento de los modelos matemáticos que mejor describen los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura a vacío de papa (*Solanum phureja*) variedad Ratona Morada.

5.4.1 Evaluación de la calidad de ajuste de los modelos matemáticos aplicados

La calidad de ajuste de los modelos se evaluó por medio de parámetros estadísticos mediante el programa Matlab (R2015b), el coeficiente de determinación (R^2), la suma de los errores cuadrados (SSE , por sus siglas en inglés *Sum of Squared Error*) y la raíz media de los errores cuadrados ($RMSE$, por sus siglas en inglés *Root Mean Squared Error*) representadas en las ecuaciones 8, 9 y 10, respectivamente.

$$R_2 = \frac{\sum_{i=1}^N (V_{exp,i} * V_{cal,i})^2}{\sum_{i=1}^N V_{exp,i}^2 \sum_{i=1}^N V_{cal,i}^2} \tag{8}$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N (V_{exp,i} * V_{cal,i})^2 \tag{9}$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{exp,i} - V_{cal,i})^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

Dónde: $V_{exp,i}$: valor experimental o medido; $V_{cal,i}$: valor calculado por el modelo; N : número de determinaciones.

5.4.2 Selección del mejor modelo matemático

Entre los modelos aplicados, se seleccionaron aquellos que cumplen con lo que señalan Gutiérrez & de la Vara (2008) y Brousse, Vergara, Zubreski, & Martos (2014). Según estos autores, un buen ajuste es indicado por valores pequeños de $RMSE$ y SSE (tendiendo a cero) y un coeficiente de determinación (R^2) > 0.85 (lo más cercano a 1). Además, se consideró que la validez del ajuste del modelo sea satisfactoria y que describa adecuadamente el comportamiento de las cinéticas de pérdida de agua y absorción de aceite.

5.5 Determinación de la difusividad del agua (D_{eff}) y la energía de activación (E_a) de los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura a vacío de papa (*Solanum phureja*) variedad Ratona Morada.

5.5.1 Estudio de la transferencia de agua como modelo difusivo

Se utilizó la metodología descrita por Melquíades, López, & Rosas (2009) a partir de la segunda Ley de Fick, ecuación de difusión, la cual se expresa en la ecuación (11).

$$\frac{\partial y}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 x}{\partial x^2} \quad (11)$$

Para resolver esta ecuación se consideró que: (i) el contenido de humedad inicial es uniforme; (ii) la geometría se mantiene continua durante el proceso y se asume, para las rodajas de papa, como placas infinitas truncadas; (iii) la superficie consigue la humedad de saturación en un instante determinado. La condición inicial es el contenido de humedad de la muestra al principio del proceso. Asumiendo estas hipótesis, la solución de la ecuación (11) se obtiene analíticamente por el método de separación de variables que empleando sólo el primer término de la serie solución, resulta:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{D_{eff} \pi^2 t}{4L^2}\right) \quad (12)$$

Dónde: MR se describe en la ecuación (4); D_{eff} : coeficiente de difusión del agua en la rodaja (m²/s); t : tiempo (s) y L : mitad del espesor de la rodaja (m). La ecuación (12) se puede simplificar en forma logarítmica mediante linealización como se muestra en la ecuación (13).

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{D_{eff}\pi^2 t}{4L^2} \quad (13)$$

De esta forma, se obtuvieron valores de D_{eff} para cada tratamiento, graficando $\ln MR$ experimental vs t a partir de la pendiente de la línea recta.

5.5.2 Energía de activación para la cinética de pérdida de agua

Se determinó a partir del coeficiente de difusión D_{eff} , que se ajusta a la ecuación de Arrhenius (14), debido a su dependencia con la temperatura (Melquíades et al., 2009).

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \quad (14)$$

Dónde: D_0 : factor pre-exponencial (m²/s); Ea : energía de activación (kJ/mol); T : temperatura absoluta (K) y R : constante de los gases (8.314 J/mol K).

Al linealizar la ecuación (14) aplicando logaritmos en ambos lados, se obtuvo la ecuación (15), de la cual se despejó Ea a partir de la pendiente de la gráfica de $\ln D_{eff}$ vs $1/T$.

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{Ea}{RT} \quad (15)$$

5.5.3 Energía de activación para la cinética de absorción de aceite

Se utilizó la metodología descrita por Ortega & Montes (2014) para describir la variación del contenido de aceite en el equilibrio o máximo contenido de aceite absorbido con la temperatura de fritura, mediante el parámetro Y_e experimental ajustado a la ecuación de Arrhenius (ecuación 16).

$$Y_e = D_0 \exp\left(\frac{Ea}{RT}\right) \quad (16)$$

Dónde: D_0 : factor pre-exponencial (m²/s); Ea : energía de activación (kJ/mol); T : temperatura absoluta (K) y R : constante de los gases (8.314 J/mol K).

Al linealizar la ecuación (16) aplicando logaritmos en ambos lados, se obtuvo la ecuación (17), de la cual se despejó Ea a partir de la pendiente de la gráfica de $\ln Y_e$ vs $1/T$.

$$\ln Y_e = \ln D_0 - \frac{Ea}{RT} \quad (17)$$

5.5.4 Análisis estadístico

El análisis estadístico de los resultados de $Deff$ y Ea se realizó de acuerdo con la metodología descrita en el apartado 5.3.4.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Construcción y modelado de las cinéticas de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura a vacío de papa (*Solanum phureja*) variedad Ratona Morada

6.1.1 Cinética de pérdida de agua

La variación del contenido de agua para rodajas de papa (*Solanum phureja*) variedad Ratona Morada durante la fritura a vacío, a presiones de 20, 50 y 81 Kpa y temperaturas de 120, 140 y 160 °C en función del tiempo se muestran en las tablas 6.1, 6.2 y 6.3. Para una mejor visualización, entendimiento y normalización, los datos y las curvas de la cinética de pérdida de agua para comienzan desde la unidad (1.00) hasta el contenido final de agua. Lo anterior se consiguió dividiendo el contenido de agua en base seca a tiempo t (Mt) (g de agua/g sólido seco) entre la humedad inicial en base seca (M0), de esta manera, los datos de contenido de agua se presentan como valores adimensionales. Los resultados del contenido de agua expresados en base seca (bs) a las presiones, temperaturas y tiempos dados se muestran en el anexo 1. Los tiempos (0) segundos en las tablas 6.1, 6.2 y 6.3 indican las condiciones iniciales de las muestras antes del proceso de fritura, donde la pérdida de agua es nula y representan el contenido de agua inicial de las rodajas.

Tabla 6. 1 Contenido de agua adimensional en función del tiempo durante la fritura a 20 Kpa a diferentes temperaturas.

Contenido de agua Mt/Mo (Adimensional) a presión de 20 Kpa			
Tiempo (s)	120 °C	140 °C	160 °C
0	1.000 ± 0.000 ^a	1.000 ± 0.000 ^a	1.000 ± 0.000 ^a
30	0.408 ± 0.022 ^b	0.256 ± 0.015 ^b	0.211 ± 0.011 ^b
60	0.231 ± 0.017 ^c	0.109 ± 0.032 ^c	0.054 ± 0.022 ^c
90	0.169 ± 0.017 ^{cd}	0.084 ± 0.029 ^{cd}	0.027 ± 0.009 ^{cd}
120	0.117 ± 0.006 ^{de}	0.057 ± 0.018 ^{de}	0.019 ± 0.004 ^{de}
150	0.078 ± 0.037 ^{ef}	0.035 ± 0.012 ^{ef}	0.019 ± 0.005 ^{ef}
180	0.059 ± 0.014 ^{ef}	0.020 ± 0.008 ^{ef}	0.017 ± 0.007 ^{ef}
210	0.037 ± 0.018 ^g	0.018 ± 0.006 ^g	0.017 ± 0.006 ^g
240	0.035 ± 0.009 ^g	0.018 ± 0.007 ^g	0.016 ± 0.004 ^g
270	0.025 ± 0.007 ^g	0.016 ± 0.007 ^g	0.016 ± 0.004 ^g
300	0.023 ± 0.011 ^g	0.016 ± 0.011 ^g	0.010 ± 0.003 ^g

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 7).

Fuente: Este estudio

Tabla 6. 2 Contenido de agua adimensional en función del tiempo durante la fritura a 50 Kpa a diferentes temperaturas.

Contenido de agua Mt/Mo (Adimensional) a presión de 50 Kpa			
Tiempo (s)	120 °C	140 °C	160 °C
0	1.000 ± 0.000 ^a	1.000 ± 0.000 ^a	1.000 ± 0.000 ^a
30	0.435 ± 0.029 ^b	0.239 ± 0.033 ^b	0.127 ± 0.020 ^b
60	0.217 ± 0.020 ^c	0.079 ± 0.013 ^c	0.036 ± 0.005 ^c
90	0.137 ± 0.013 ^{cd}	0.061 ± 0.016 ^{cd}	0.028 ± 0.003 ^{cd}
120	0.068 ± 0.025 ^{de}	0.060 ± 0.016 ^{de}	0.018 ± 0.007 ^{de}
150	0.049 ± 0.012 ^{de}	0.051 ± 0.005 ^{de}	0.016 ± 0.007 ^{de}
180	0.034 ± 0.005 ^{de}	0.045 ± 0.008 ^{de}	0.014 ± 0.004 ^{de}
210	0.020 ± 0.006 ^e	0.032 ± 0.008 ^e	0.014 ± 0.002 ^e
240	0.020 ± 0.011 ^e	0.026 ± 0.010 ^e	0.013 ± 0.001 ^e
270	0.020 ± 0.005 ^e	0.022 ± 0.009 ^e	0.012 ± 0.003 ^e
300	0.015 ± 0.005 ^e	0.007 ± 0.002 ^e	0.008 ± 0.000 ^e

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 7).

Fuente: Este estudio

Tabla 6. 3 Contenido de agua adimensional en función del tiempo durante la fritura a 50 Kpa a diferentes temperaturas.

Contenido de agua Mt/Mo (Adimensional) a presión de 81 Kpa			
Tiempo (s)	120 °C	140 °C	160 °C
0	1.000 ± 0.000 ^a	1.000 ± 0.000 ^a	1.000 ± 0.000 ^a
30	0.646 ± 0.117 ^b	0.465 ± 0.022 ^b	0.337 ± 0.012 ^b
60	0.402 ± 0.057 ^c	0.257 ± 0.012 ^c	0.135 ± 0.020 ^c
90	0.314 ± 0.043 ^d	0.178 ± 0.006 ^d	0.060 ± 0.009 ^d
120	0.246 ± 0.047 ^e	0.129 ± 0.019 ^e	0.049 ± 0.006 ^e
150	0.202 ± 0.022 ^{ef}	0.092 ± 0.016 ^{ef}	0.035 ± 0.008 ^{ef}
180	0.148 ± 0.018 ^{fg}	0.041 ± 0.011 ^{fg}	0.021 ± 0.005 ^{fg}
210	0.135 ± 0.026 ^g	0.016 ± 0.001 ^g	0.012 ± 0.003 ^g
240	0.127 ± 0.020 ^g	0.011 ± 0.003 ^g	0.009 ± 0.000 ^g
270	0.126 ± 0.040 ^g	0.011 ± 0.003 ^g	0.010 ± 0.000 ^g
300	0.118 ± 0.007 ^g	0.010 ± 0.002 ^g	0.007 ± 0.003 ^g

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 7).

Fuente: Este estudio

En las tablas 6.1, 6.2 y 6.3 se puede observar que el mínimo contenido residual de agua de las rodajas de papa, durante el tiempo de fritura fue de 0.010, 0.08 y 0.007 para las presiones de 20, 50 y 81 Kpa respectivamente (0.0317 g/g bs, 0.0257 g/g y 0.0241 g/g en bs; ver anexo 1, todas las tablas). Lo anterior representa una pérdida de un 95.9%, 96.6% y un 96.8% de agua en el producto frito respecto al contenido inicial, respectivamente.

Los resultados de contenido final de agua obtenidos son menores a los reportados en investigaciones de fritura convencional para diferentes muestras vegetales. Así, Moya (2011) obtuvo rodajas fritas de papa con contenidos finales de agua en los rangos de 0.680 a 0.697 g/g bs para tiempos de fritura de 720 s; Bermúdez et al. (2010) informaron rangos de contenido de agua finales de 0.377 a 0.4107 g/g bs en dos variedades de ñame en tiempos de 540 s; y Alvis-Bermúdez, Romero-Barragan, & Arrázola-Paternina (2016) reportaron un contenido de agua final de 0.346 g/g en base húmeda en rodajas de plátano para tiempos de 105 s. Las diferencias en los resultados obtenidos en este estudio con los reportados en la literatura se pueden atribuir al tipo de producto, la humedad inicial, el espesor y tamaño de este, la presión, temperatura y los tiempos de operación, el uso de pretratamientos, los mecanismos de deshidratación, entre otros (Gokhale & Lele, 2011; Gómez, 2012; Moya, 2011; Schmalcko & Alzamora, 2005).

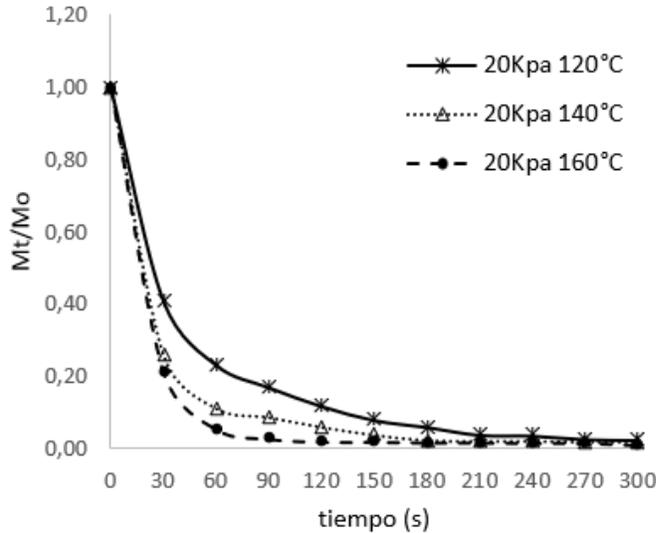


Figura 6. 1 Cinética de pérdida de agua durante la fritura a presión de 20 Kpa y diferentes temperaturas de proceso.

Fuente: Este estudio

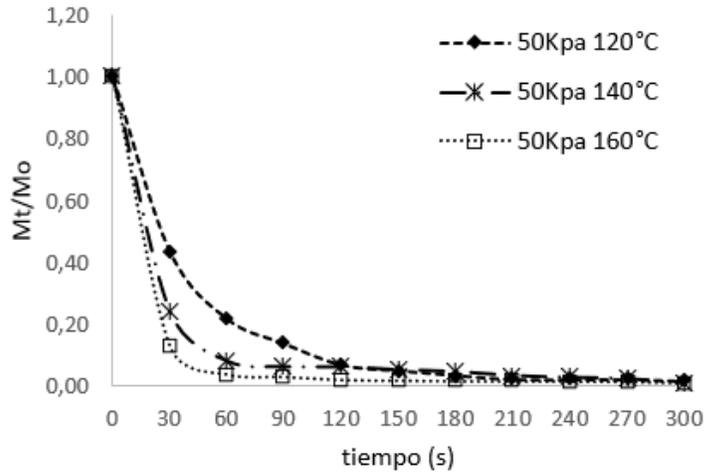


Figura 6. 2 Cinética de pérdida de agua durante la fritura a presión de 50 Kpa y diferentes temperaturas de proceso.

Fuente: Este estudio

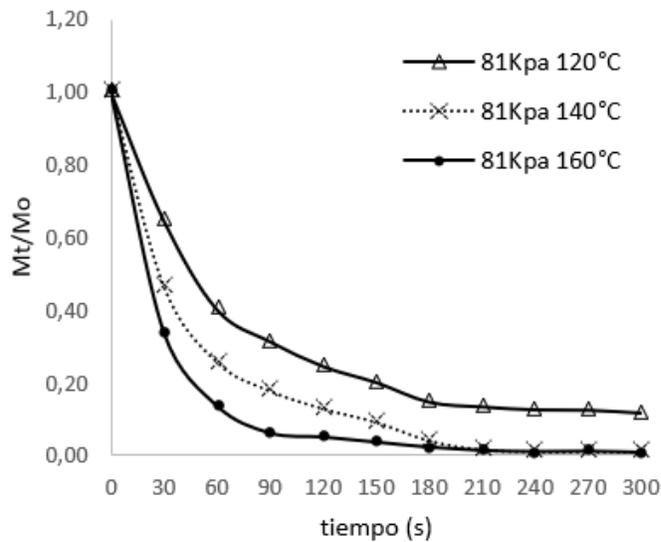


Figura 6. 3 Cinética de pérdida de agua durante la fritura a presión de 81 Kpa y diferentes temperaturas de proceso.

Fuente: Este estudio

Se puede observar que las curvas mencionadas presentan una tendencia exponencial decreciente con el tiempo; y muestran las formas típicas de las curvas de secado en la etapa de velocidad decreciente; dada la rápida pérdida de agua, y a las reportadas por Vega & Lemus (2006); Montes et al. (2008); y Salcedo, Mercado, Vanegas, Fernández, & Vertel (2014). Las curvas también son similares a las obtenidas en fritura convencional de otros productos fritos (Krokida, Oreopoulou, Maroulis, & Marinos-Kouris, 2001; Pedreschi et al., 2005; Vitrac, Dufour, Trystram, & Raoult-Wack, 2002).

En las Figuras 6.1, 6.2 y 6.3 también se puede apreciar una etapa inicial para cada condición de presión y temperatura; la cual está representada por la pendiente del primer tramo de las curvas durante los primeros 30 segundos del proceso. En esta etapa se evidencia que el contenido de agua disminuye rápidamente para las presiones de 20 Kpa y 50 Kpa, mientras que para la presión atmosférica (81 Kpa) este proceso se realiza más lentamente, debido a esto la velocidad de pérdida de agua es alta; principalmente por la eliminación rápida del agua superficial del alimento, donde el vapor de agua se libera uniformemente como pequeñas burbujas a través de toda la superficie (Moya, 2011). Pasado ese tiempo, la velocidad de pérdida de agua decrece en un periodo más o menos largo. Esta disminución puede ser explicada por la combinación de dos aspectos ocurridos a medida que transcurre el tiempo de fritura: primero; el encogimiento progresivo que se presenta en las dimensiones del producto que hace que los poros disminuyan su tamaño (Kassama & Ngadi, 2005), dificultando que el agua abandone el alimento desde el interior y, segundo; la formación de la costra en la superficie del producto, la cual aumenta de espesor; y por su baja conductividad térmica, disminuye la transferencia de calor en la interfase costra e interior del alimento y, como consecuencia, la salida de agua del interior del alimento (Aguilera, 1997; Farkas et al., 1996). Esta tendencia concuerda con los resultados obtenidos por otros autores; utilizando diferentes materias primas (Alvis-Bermúdez et al., 2016; Jibaja, 2010; Moya, 2011), donde la tasa de evaporación aumenta inicialmente y decrece hasta que finalmente la evaporación es relativamente constante para los tiempos finales de fritura.

Con respecto al efecto de la temperatura, las curvas corroboran que el contenido final de agua en las muestras freídas a 120 °C es mayor que en aquellas freídas a 140 °C, y éste a su vez, mayor que en las de 160°C, con lo cual se evidencia una disminución significativa en el contenido residual de agua conforme se incrementa la temperatura (ver anexo 7). Así, los mayores valores de contenido de agua residual (tabla 6.1, 6.2 y 6.3) corresponden a la temperatura de 120 °C, con una reducción en el contenido de agua del 90,7%, 93.5% y del 62.9%, respecto al valor inicial (presiones de 20 Kpa, 50 Kpa y 81 Kpa, respectivamente); mientras que a 140 °C la reducción fue del 93.3%, 97.2% y del 95.7% (presiones de 20 Kpa, 50 Kpa y 81 Kpa, respectivamente) y del 95.9%, 96.6% y un 96.8% 160 °C (presiones de 20 Kpa, 50

Kpa y 81 Kpa, respectivamente). Todo lo anterior permite concluir, en este estudio, que, a mayor temperatura en un tiempo determinado, mayor es la pérdida de agua en el producto. Conclusiones similares fueron reportadas en fritura convencional y al vacío (Bermúdez et al., 2010; Bravo-Vásquez, 2008; Gómez, 2012; Ortega & Montes, 2014).

Pedreschi, Moyano, Santis, & Pedreschi (2006) exponen que, al aumentar la temperatura de fritura, la velocidad de pérdida de agua se incrementa; ya que se incrementa, al igual, la tasa de evaporación; con la consecuente disminución del tiempo de fritura. Otros autores coinciden con la conclusión anterior (Budzaki & Segura, 2005; Garayo & Moreira, 2002).

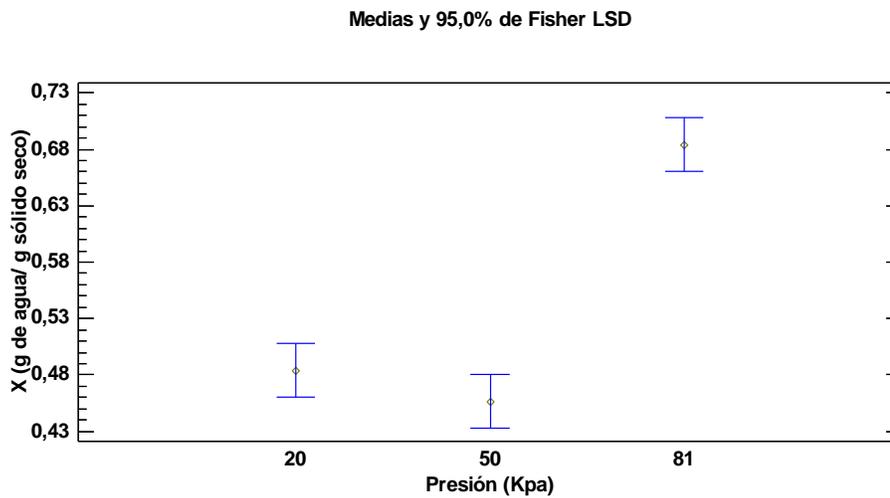


Figura 6. 4 Gráfico de medias para presión y humedad en base seca.

Fuente: Este estudio

Por otra parte, la humedad al igual que la temperatura, también se ve considerablemente afectada por la presión, en este estudio la interacción entre las presiones de 20 Kpa y 50 Kpa no muestra diferencias significativas, sin embargo, al realizar la comparación de estas presiones con la presión atmosférica trabajada de 81 Kpa, se puede notar una diferencia significativa (Figura 6.4). concluyendo así que a menores presiones hay una mayor reducción en el contenido de agua del producto. Resultados similares fueron reportados en pasabocas de plátano (Rafael Villamizar, Quiceno, & Germán, 2016).

El análisis de varianza ANOVA indicó que la presión, la temperatura y el tiempo de fritura ejercieron un efecto significativo (p -Valor < 0.05 ; ver anexo 7) sobre el contenido de agua de las rodajas de papa de las dos variedades sometidas al proceso de fritura.

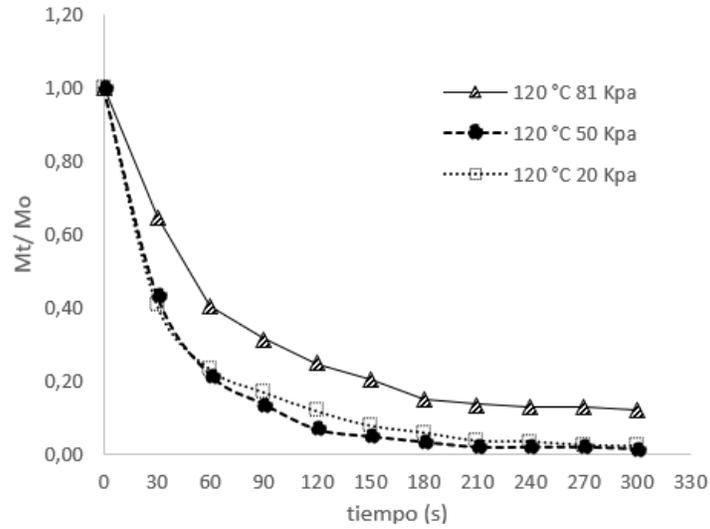


Figura 6. 5 Cinética de pérdida de agua durante la fritura a una temperatura de 120°C y diferentes presiones de proceso.

Fuente: Este estudio

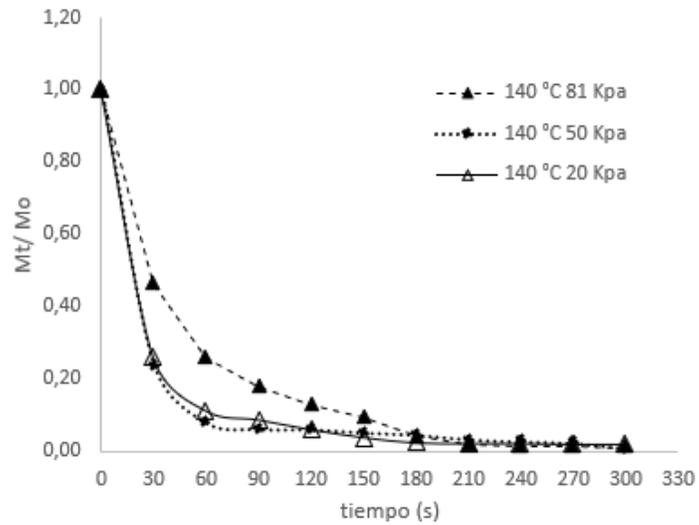


Figura 6. 6 Cinética de pérdida de agua durante la fritura a una temperatura de 140°C y diferentes presiones de proceso.

Fuente: Este estudio

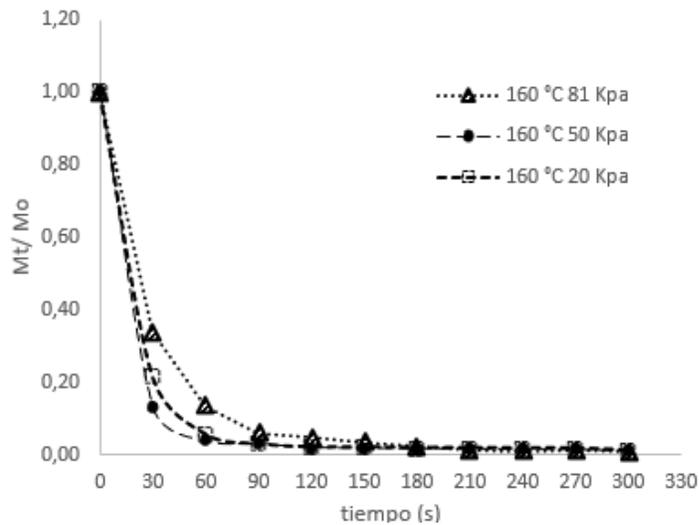


Figura 6. 7 Cinética de pérdida de agua durante la fritura a una temperatura de 160°C y diferentes presiones de proceso.

Fuente: Este estudio

En el gráfico 6.5 se puede observar que el contenido de humedad disminuye de forma lenta en las 3 presiones trabajadas (20, 50 y 81 Kpa), sin embargo, se aprecia que al trabajar con presiones sub-atmosféricas (20 Kpa y 50 Kpa) este descenso se da en una manera más rápida aunque se encuentre a una temperatura baja, esto debido a que a presiones de vacío el agua fácilmente se evapora a no tan altas temperaturas (Rafael Villamizar et al., 2016). Por otra parte, en los gráficos 6.6 y 6.7 se ilustra que la disminución en contenido de agua se desarrolla rápidamente en los primeros 30 segundos, siendo más notoria cuando se trabaja a presiones de 20 Kpa y 50 Kpa esto ya que el producto se encuentra expuesto a una menor cantidad de oxígeno, logrando así preservar el alimento de daños químicos y enzimáticos. Conclusiones similares fueron reportadas en alimentos como papa y plátano (Crosa et al., 2014; Rafael Villamizar et al., 2016).

6.1.2 Modelado de la cinética de pérdida de agua

6.1.2.1 Modelo de Newton

Los resultados obtenidos de los parámetros cinéticos mediante regresión no lineal para la resolución del modelo de Newton, con ayuda del programa Matlab, se muestran en la tabla 6.4 para cada temperatura y presión de fritura.

Tabla 6. 4 Parámetros cinéticos del modelo de Newton para cada temperatura y presión de fritura.

Presión (Kpa)	Temperatura (°C)		
	120	140	160
	*k1 x 10-2 (s-1)	*k1 x 10-2 (s-1)	*k1 x 10-2 (s-1)
20	2.373 ± 0.001 ^b	4.103 ± 0.001 ^b	5.097 ± 0.002 ^b
50	2.505 ± 0.001 ^b	4.513 ± 0.004 ^b	6.728 ± 0.005 ^b
81	1.159 ± 0.002 ^a	2.138 ± 0.001 ^a	3.438 ± 0.002 ^a

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar; k1 = constante de velocidad de pérdida de agua. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 5.i).

Fuente: Este estudio

Con los parámetros cinéticos calculados mediante la regresión no lineal, se puede establecer la ecuación de Newton que describe el comportamiento de la cinética de pérdida de agua del proceso (ecuaciones 18, 19 y 20, respectivamente). Tomando los resultados de la temperatura de 160 °C y todas las presiones, las ecuaciones quedan:

$$MR = e^{(-K1*t)} = e^{(-0.05097*t)} \tag{18}$$

$$MR = e^{(-K1*t)} = e^{(-0.06728*t)} \tag{19}$$

$$MR = e^{(-K1*t)} = e^{(-0.03438*t)} \tag{20}$$

El parámetro empírico de la ecuación de Newton, indica que la constante de velocidad de pérdida de agua (k) en el tiempo de fritura es de 0.05097 s-1, 0.06728 s-1 y 0.03438 s-1 (valores para presiones de 20 Kpa, 50 Kpa y 81 Kpa, respectivamente). El análisis de varianza ANOVA arrojó un valor de p < 0.05 (ver anexo 5.i) para las medias de los valores del parámetro k1 del modelo de Newton, al realizar la comparación entre las presiones y temperaturas evaluadas en cada tiempo de fritura. Esto es un indicativo de que existe dependencia significativa de las constantes k1 con la presión y temperatura; mostrando valores significativamente más altos a presiones subatmosféricas y mayor temperatura, tal como se muestra en la tabla 5.4. Resultados semejantes frente a esta dependencia reportaron Moyano & Pedreschi (2006); Troncoso & Pedreschi (2009); y Barrios et al. (2015) aplicando este modelo en fritura de rodajas de papa, papa pre-tratada y arveja; respectivamente.

6.1.2.2 Modelo de Henderson-Pabis

Los resultados obtenidos de los parámetros cinéticos mediante regresión no lineal para la resolución del modelo de Henderson-Pabis, con ayuda del programa Matlab, se muestran en la tabla 6.5 para cada temperatura y presión de fritura.

Tabla 6. 5 Parámetros cinéticos del modelo de Henderson-Pabis para cada temperatura y presión de fritura.

Presión (Kpa)	Temperatura (°C)					
	120		140		160	
	*k2 x 10-2 (s-1)	*a	*k2 x 10-2 (s-1)	*a	*k2 x 10-2 (s-1)	*a
20	2.291 ±	0.968 ±	4.083 ±	0.994 ±	5.095 ±	0.999 ±
	0.001 ^b	0.005	0.001 ^b	0.002	0.002 ^b	0.001
50	4.475 ±	0.987 ±	4.501 ±	0.997 ±	6.726 ±	0.995 ±
	0.001 ^b	0.006	0.004 ^b	0.000	0.004 ^b	0.000
81	1.064 ±	0.930 ±	2.081 ±	0.974 ±	3.424 ±	0.995 ±
	0.001 ^a	0.049	0.001 ^a	0.002	0.002 ^a	0.001

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar; k2 = constante de velocidad de pérdida de agua; a = constante del modelo. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 5.ii).

Fuente: Este estudio

Con los parámetros cinéticos calculados mediante la regresión no lineal, se puede establecer la ecuación de Henderson-Pabis que describe el comportamiento de la cinética de pérdida de agua del proceso (ecuaciones 21, 22 y 23, respectivamente). Tomando los resultados de la temperatura de 160 °C y todas las presiones, las ecuaciones quedan:

$$MR = a * e^{(-K2*t)} = 0.999 * e^{(-0.05095*t)} \tag{21}$$

$$MR = a * e^{(-K2*t)} = 0.995 * e^{(-0.06726*t)} \tag{22}$$

$$MR = a * e^{(-K2*t)} = 0.995 * e^{(-0.03424*t)} \tag{23}$$

Los parámetros empíricos de la ecuación de Henderson-Pabis, indican que la constante de velocidad de pérdida de agua (k) en el tiempo de fritura es de 0.05095 s⁻¹, 0.06726 s⁻¹ y 0.03424 s⁻¹ y la constante propia del modelo es de 0.999, 0.995 y 0.995 (valores para presiones de 20, 50 y 81 Kpa, respectivamente).

Al efectuar la comparación en las medias de los valores de la constante cinética k_2 del modelo de Henderson-Pabis entre las presiones y temperaturas, según el análisis de varianza ANOVA, se obtuvo un valor de $p < 0.05$ (ver anexo 5.ii); lo cual demuestra que este parámetro cinético depende significativamente tanto de la presión como de la temperatura. Así, en la tabla 6.5, se observa que la constante k_2 aumenta significativamente a medida que se disminuye la presión y se incrementa la temperatura. Estos resultados, en relación con este comportamiento, concuerdan con los obtenidos por Bermúdez et al. (2010) y Osorio et al. (2015), en fritura de trozos de ñame y *chips* de arveja, respectivamente.

Respecto al parámetro a , se obtuvo un valor de $p > 0.05$ (ver anexo 5.ii), no existiendo dependencia estadísticamente significativa con la presión ni con la temperatura, considerándose como constante. Este resultado coincide con lo reportado por Vega & Lemus (2006) en cinéticas de secado de papaya, quienes señalan que este parámetro podría estar más ligado a la estructura propia del tejido del alimento que de la temperatura del proceso.

6.1.2.3 Modelo de Page

Los resultados obtenidos de los parámetros cinéticos mediante regresión no lineal para la resolución del modelo de Page, con ayuda del programa Matlab, se muestran en la tabla 6.6 para cada temperatura y presión de fritura.

Tabla 6. 6 Parámetros cinéticos del modelo de Page para cada temperatura y presión de fritura.

Presión (Kpa)	Temperatura (°C)					
	120		140		160	
	*k3 (s-1)	*n	*k3 (s-1)	*n	*k3 (s-1)	*n
20	0.108 ±	0.628 ±	0.221 ±	0.542 ±	0.123 ±	0.751 ±
	0.007 ^b	0.008	0.046 ^b	0.052	0.069 ^b	0.202
50	0.058 ±	0.789 ±	0.325 ±	0.457 ±	0.467 ±	0.447 ±
	0.013 ^b	0.060	0.117 ^b	0.076	0.116 ^b	0.058
81	0.057 ±	0.658 ±	0.059 ±	0.753 ±	0.079 ±	0.775 ±
	0.049 ^a	0.155	0.004 ^a	0.016	0.009 ^a	0.027

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar; k3 = constante de velocidad de pérdida de agua; n = constante del modelo. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 5.iii).

Fuente: Este estudio

Con los parámetros cinéticos calculados mediante la regresión no lineal, se puede establecer la ecuación de Page que describe el comportamiento de la cinética de pérdida de agua del proceso (ecuaciones 24, 25 y 26, respectivamente). Tomando los resultados de la temperatura de 160 °C y todas las presiones, las ecuaciones quedan:

$$MR = e^{(-K3*t^n)} = e^{(-0.123*t^{0.751})} \tag{24}$$

$$MR = e^{(-K3*t^n)} = e^{(-0.467*t^{0.447})} \tag{25}$$

$$MR = e^{(-K3*t^n)} = e^{(-0.079*t^{0.775})} \tag{26}$$

Los parámetros empíricos de la ecuación de Page indican que la constante de velocidad de pérdida de agua (k) en el tiempo de fritura es de 0.123 s-1, 0.467 s-1 y 0.01311 s-1 y la constante propia del modelo es de 0.751, 0.447 y 0.775 (valores para presiones de 20, 50 y 81 Kpa, respectivamente).

En la tabla 6.6 se observa que, conforme disminuye la presión y aumenta la temperatura, la constante k3 del modelo de Page se incrementa; evidenciando que este parámetro cinético presenta dependencia

significativa con ambos. Lo anterior se corrobora mediante el análisis de varianza ANOVA, donde se obtuvo un valor de $p < 0.05$ (anexo 5.iii) en las medias de los valores de la constante cinética k_3 , al hacer la comparación entre las presiones y temperaturas trabajadas. Este comportamiento es similar al reportado en fritura al vacío de arveja (Osorio et al., 2015).

Respecto al parámetro n , se obtuvo un valor de $p > 0.05$ (anexo 5.iii), no existiendo dependencia estadísticamente significativa con la temperatura, considerándose como constante. Este resultado concuerda con lo informado por Vega et al (2007), quienes señalan que este parámetro; al igual que la constante a del modelo de Henderson-Pabis, depende del tipo de producto que va a ser sometido a deshidratación, y de las condiciones de secado, más que de la temperatura del proceso.

6.1.3 Cinética de absorción de aceite

La variación del contenido de aceite absorbido en base seca (g de aceite/g sólido seco) para rodajas de papa (*Solanum phureja*) variedad Ratona Morada durante la fritura a vacío, a presiones de 20, 50 y 81 Kpa y temperaturas de 120, 140 y 160 °C en función del tiempo se muestran en las tablas 6.7, 6.8 y 6.9. Los tiempos (0) segundos indican las condiciones iniciales de la muestra antes del proceso de fritura, donde el contenido de aceite absorbido es nulo.

Tabla 6. 7 Contenido de aceite en función del tiempo durante la fritura a 20 Kpa a diferentes temperaturas

*Contenido de Aceite Y (g de aceite / g bs) a presión de 20 Kpa			
tiempo (s)	120°C	140°C	160°C
0	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000
30	1,108 ± 0,035 ^a	0,825 ± 0,049 ^a	0,648 ± 0,053 ^a
60	1,471 ± 0,030 ^b	1,216 ± 0,044 ^b	1,116 ± 0,044 ^b
90	1,550 ± 0,071 ^c	1,311 ± 0,012 ^c	1,311 ± 0,012 ^c
120	1,556 ± 0,097 ^c	1,344 ± 0,034 ^c	1,320 ± 0,021 ^c
150	1,541 ± 0,087 ^{cd}	1,381 ± 0,051 ^{cd}	1,385 ± 0,046 ^{cd}
180	1,663 ± 0,042 ^{cde}	1,385 ± 0,025 ^{cde}	1,356 ± 0,016 ^{cde}
210	1,689 ± 0,076 ^{de}	1,426 ± 0,012 ^{de}	1,435 ± 0,025 ^{de}
240	1,675 ± 0,035 ^e	1,464 ± 0,041 ^e	1,451 ± 0,023 ^e
270	1,676 ± 0,041 ^e	1,503 ± 0,025 ^e	1,428 ± 0,007 ^e
300	1,695 ± 0,071 ^e	1,459 ± 0,034 ^e	1,384 ± 0,034 ^e

*Valores promedio (n = 2) ± desviación estándar; bs = base seca. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 8).

Fuente: Este estudio

Tabla 6. 8 Contenido de aceite en función del tiempo durante la fritura a 50 Kpa a diferentes temperaturas

*Contenido de Aceite Y (g de aceite / g bs) a presión de 50 Kpa			
tiempo (s)	120°C	140°C	160°C
0	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000
30	1,593 ± 0,049 ^a	1,356 ± 0,055 ^a	1,148 ± 0,042 ^a
60	1,828 ± 0,035 ^b	1,730 ± 0,032 ^b	1,498 ± 0,025 ^b
90	1,888 ± 0,035 ^c	1,794 ± 0,019 ^c	1,609 ± 0,044 ^c
120	1,962 ± 0,021 ^{cd}	1,805 ± 0,014 ^{cd}	1,633 ± 0,028 ^{cd}
150	1,995 ± 0,031 ^{de}	1,840 ± 0,018 ^{de}	1,656 ± 0,041 ^{de}
180	2,056 ± 0,012 ^{ef}	1,919 ± 0,051 ^{ef}	1,665 ± 0,046 ^{ef}
210	2,141 ± 0,044 ^{fg}	1,929 ± 0,027 ^{fg}	1,669 ± 0,037 ^{fg}
240	2,165 ± 0,039 ^{fg}	1,980 ± 0,014 ^{fg}	1,711 ± 0,030 ^{fg}
270	2,190 ± 0,032 ^g	1,985 ± 0,042 ^g	1,724 ± 0,027 ^g
300	2,136 ± 0,023 ^g	1,931 ± 0,041 ^g	1,688 ± 0,046 ^g

*Valores promedio (n = 2) ± desviación estándar; bs = base seca. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 8).

Fuente: Este estudio

Tabla 6. 9 Contenido de aceite en función del tiempo durante la fritura a 81 Kpa a diferentes temperaturas

*Contenido de Aceite Y (g de aceite / g bs) a presión de 81 Kpa			
tiempo (s)	120°C	140°C	160°C
0	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000
30	1,723 ± 0,011 ^a	1,695 ± 0,057 ^a	1,455 ± 0,046 ^a
60	2,326 ± 0,023 ^b	2,144 ± 0,030 ^b	1,755 ± 0,011 ^b
90	2,676 ± 0,083 ^{bd}	2,345 ± 0,032 ^{bd}	1,966 ± 0,030 ^{bd}
120	3,043 ± 0,057 ^{de}	2,491 ± 0,030 ^{de}	2,068 ± 0,042 ^{de}
150	2,980 ± 0,039 ^{de}	2,501 ± 0,023 ^{de}	2,068 ± 0,014 ^{de}
180	3,109 ± 0,069 ^{de}	2,579 ± 0,027 ^{de}	2,090 ± 0,032 ^{de}
210	3,149 ± 0,023 ^e	2,629 ± 0,044 ^e	2,184 ± 0,037 ^e
240	3,144 ± 0,072 ^e	2,588 ± 0,028 ^e	2,119 ± 0,030 ^e
270	3,328 ± 0,028 ^e	2,520 ± 0,018 ^e	2,129 ± 0,012 ^e
300	3,103 ± 0,007 ^e	2,489 ± 0,044 ^e	1,961 ± 0,030 ^e

*Valores promedio (n = 2) ± desviación estándar; bs = base seca. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 8).

Fuente: Este estudio

En las tablas 6.7, 6.8 y 6.9 se observa que el máximo contenido de aceite absorbido por las rodajas de papa en el tiempo de fritura fue de 1.695 g/g bs, 2.190 g/g bs y 3.328 g/g bs para las presiones de 20 Kpa, 50 Kpa y 81 Kpa; lo cual representa una ganancia de un 33.9 %, 43.8% y un 46.5 % de aceite en base seca en el producto frito, respectivamente. Así se puede observar que el contenido de grasa de las rodajas de papa sometidas a vacío es menor que las sometidas a presión atmosférica, resultados similares fueron reportados por Garayo y Moreira, 2002

, quienes obtuvieron un contenido de grasa de 26.7% g/g bs en fritura a vacío de patata.

Por otra parte, se observa una tendencia de disminución del contenido graso cuando el sistema comporta mayor vacío y no tan altas temperaturas y tiempos de proceso. Righteous *et al.*, (2014) reportaron un fenómeno similar con chips de plátano sometidos a fritura al vacío, algunos autores también reportan que la cantidad final de aceite en el alimento es altamente dependiente principalmente del tiempo de fritura. (Righteous *et al.*, 2014) (Garayo y Moreira, 2002).

De manera global, los factores más importantes en la absorción de aceite son: las propiedades del producto como el tamaño, la forma, la relación superficie/volumen, la porosidad y la composición; las propiedades del aceite de fritura como la viscosidad, la tensión superficial y la calidad; los factores del proceso como los pretratamientos, la presión, el tiempo y la temperatura de fritura; y las condiciones de post-fritura (Freitas *et al.*, 2009; Rimac *et al.*, 2004; Ziaifar, Achir, Courtois, Trezzani, & Trystram, 2008); puesto que la absorción de aceite es considerada como un balance entre las fuerzas de adhesión como la capilaridad y el drenaje o escurrido (Ziaifar *et al.*, 2008).

El análisis de varianza ANOVA indicó que la presión, temperatura y el tiempo de fritura ejercieron un efecto significativo ($p < 0.05$; ver anexo 8) sobre el contenido de aceite absorbido en las rodajas de papa de las dos variedades sometidas al proceso de fritura. Este comportamiento se corrobora en las figuras 6.8, 6.9 y 6.10, en la cinética de absorción de aceite en función del tiempo de fritura para presiones de 20 Kpa, 50 Kpa y 81 Kpa, respectivamente; para cada temperatura evaluada. Cada punto en las curvas es el promedio de 2 repeticiones.

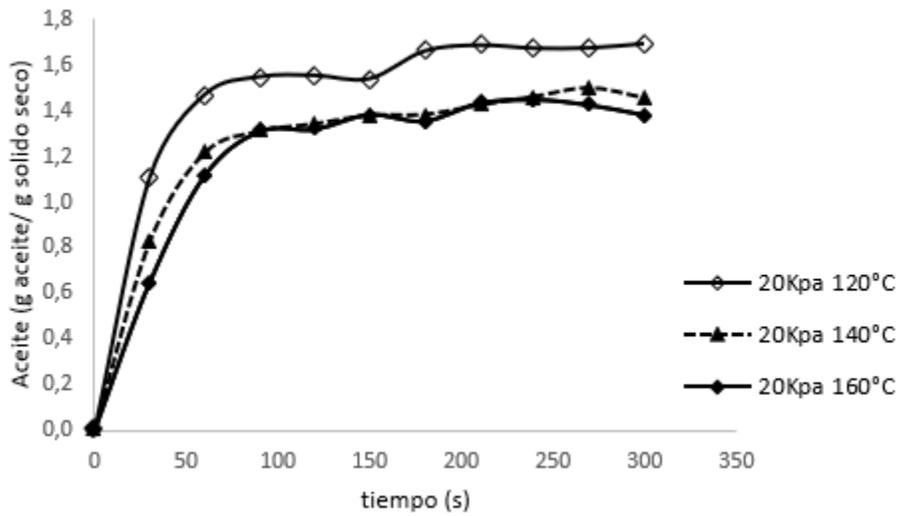


Figura 6. 8 Cinética de absorción de aceite durante la fritura a 20 Kpa y diferentes temperaturas de proceso.

Fuente: Este estudio

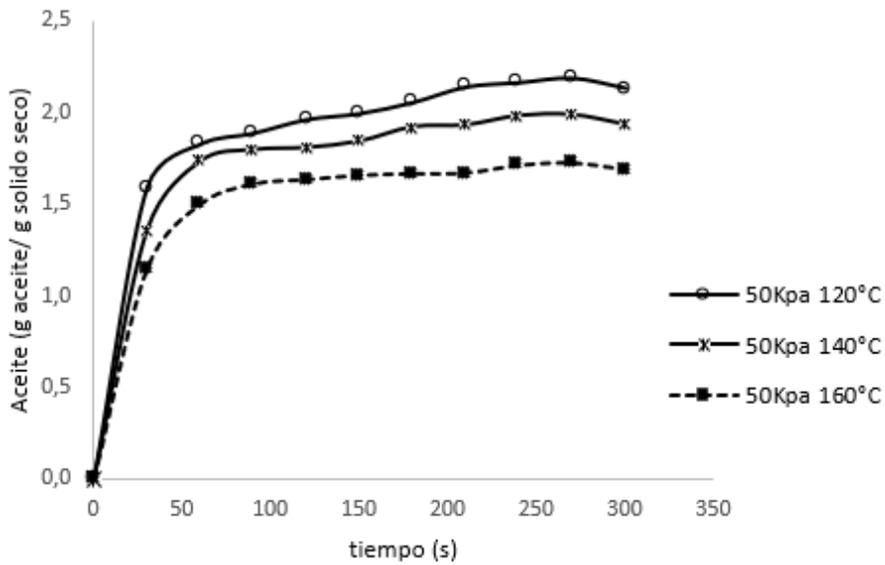


Figura 6. 9 Cinética de absorción de aceite durante la fritura a 50 Kpa y diferentes temperaturas de proceso.

Fuente: Este estudio

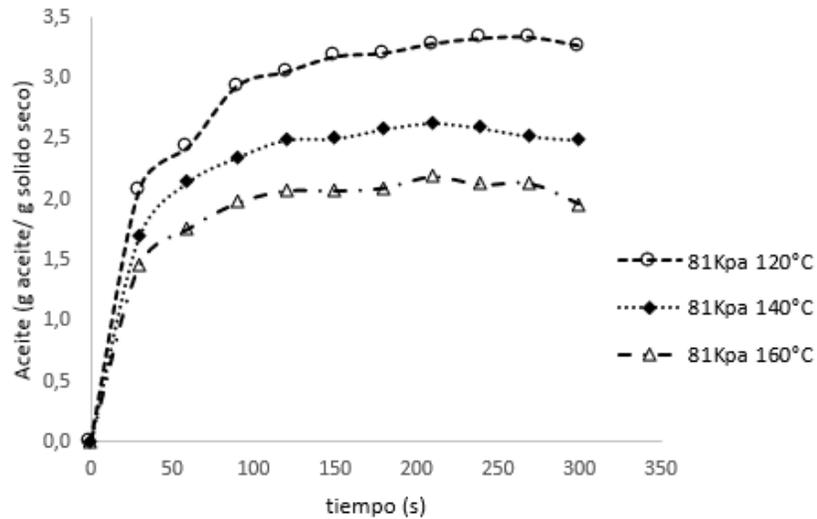


Figura 6. 10 Cinética de absorción de aceite durante la fritura a 81 Kpa y diferentes temperaturas de proceso.

Fuente: Este estudio

En las figuras 6.8, 6.9 y 6.10 se muestra que la velocidad de absorción de aceite; que viene dada por la pendiente del primer tramo de las curvas para cada temperatura, se incrementa en los primeros 30 segundos del proceso, aumentando rápidamente el contenido de aceite para todas las presiones trabajadas; y coincide con el tiempo en el que se pierde una considerable cantidad de agua en las rodajas; resultado que concuerda con lo reportado por Bravo-Vásquez (2008) y Gómez (2012) en fritura de manzana y kiwi, respectivamente. Lo anterior se debe; principalmente, a que hay mayor evaporación del agua superficial; y los espacios capilares dejados por la misma son reemplazados por el aceite (Alvis-Bermúdez et al., 2016; Moya, 2011). Los resultados obtenidos permiten ratificar la relación que existe entre la pérdida de agua y la absorción de aceite y, que, además, la absorción de aceite es un fenómeno complejo que ocurre a nivel superficial; tal como lo señalan Krokida et al. (2000); Mellema (2003); Moyano & Pedreschi (2006); y Troncoso & Pedreschi (2009).

Yamsaengsung & Moreira (2002) afirman que dicha porosidad juega un papel muy importante en la absorción de aceite; puesto que el aceite se adhiere a la superficie, y su entrada en la estructura del alimento es impedida por las presiones internas mayores (Pedreschi, Cocio, Moyano, & Troncoso, 2008), y sólo se absorbe en los poros cuando el producto es retirado del aceite; es decir, en el periodo de enfriamiento (Mai Tran, Dong Chen, & Southern, 2007). En este momento se desarrolla rápidamente un gradiente de presión positiva que produce un efecto de vacío que genera la fuerza que succiona el aceite dentro de los poros (Yamsaengsung & Moreira, 2002). Bouchon & Pyle (2005); Durán, Pedreschi, Moyano, & Troncoso (2007); y Pedreschi et al. (2008) coinciden con las afirmaciones anteriores.

En las figuras 6.8, 6.9 y 6.10 también se aprecia que, pasados los 30 segundos del proceso, el contenido de aceite tiende a disminuir; debido a que, por un lado, los espacios capilares quedan saturados con aceite y, por otro lado, el encogimiento y la formación de la costra superficial, conforme transcurre el tiempo, dificultan la absorción de aceite (Aguilera, 1997; Villada, Villada, & Mosquera, 2009). Esta misma tendencia fue informada en diferentes productos fritos (Alvis-Bermúdez et al., 2016; Jibaja, 2010; Moya, 2011); hasta alcanzar un valor de equilibrio, el cual representa la máxima cantidad de aceite que el producto frito podría absorber.

Respecto al efecto de la temperatura, las curvas corroboran que el contenido final de aceite en las muestras freídas a 120 °C es mayor que en aquellas freídas a 140 °C, y éste a su vez, mayor que en las de 160°C, con lo cual se evidencia una disminución significativa en el contenido de aceite conforme se incrementa la temperatura (ver anexo 8). Así, los valores máximos de contenido de aceite absorbido (tablas 6.7, 6.8 y 6.9) corresponden a la temperatura de 120 °C, para luego disminuir en un 9.9% a 140 °C y 2.7% a 160 °C para las presiones de 20 Kpa, 50 Kpa y 81 Kpa, respectivamente. Todo lo anterior permite concluir, en este estudio, que, a mayor temperatura en un tiempo dado, menor es la absorción de aceite en el producto. Conclusiones similares fueron reportadas en fritura convencional (Alvis, González, & Arrázola, 2015; Moya, 2011; Ortega & Montes, 2014).

Por otro lado, en las figuras 6.11, 6.12 y 6.13 se observa que la evolución de la absorción de aceite es diferente para cada temperatura con respecto a la presión empleada. Así, las rodajas de papa absorbieron significativamente menos aceite cuando se sometieron a presiones subatmosféricas (ver anexo 8) en comparación con las sometidas a presión atmosférica. Este comportamiento era esperado ya que al disminuir la presión, se consigue también disminuir sustancialmente la temperatura de fritura debido a la reducción en el punto de ebullición del agua contenida en la matriz alimenticia (Diaz Willian, Romero Pedro, Castelanos Francisco, Rodriguez Jhonatan, Gutierrez Luis, 2016), con lo cual se puede afirmar en este estudio que la absorción de aceite también se relaciona con la presión empleada.

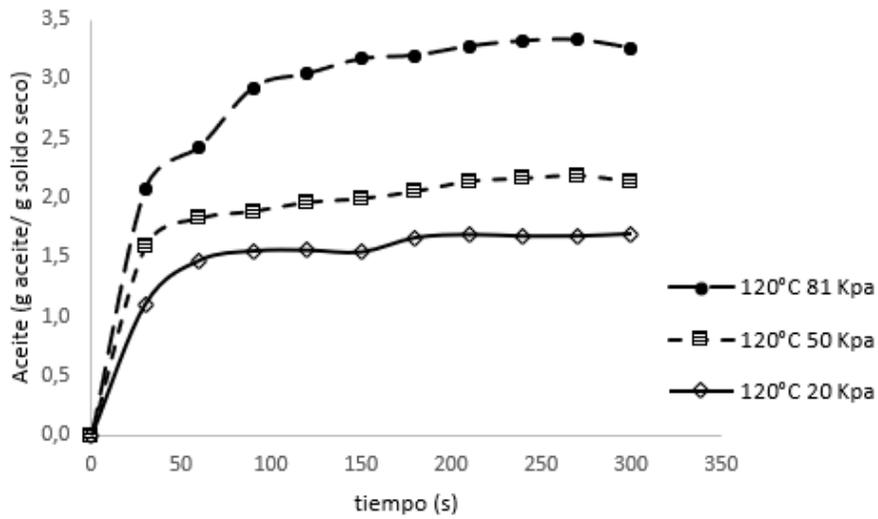


Figura 6. 11 Cinética de absorción de aceite durante la fritura a 120 °C y diferentes presiones de proceso.

Fuente: Este estudio

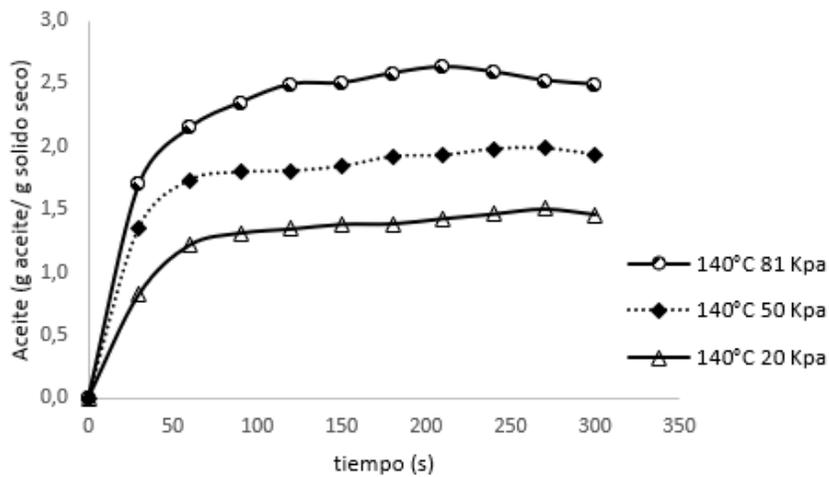


Figura 6. 12 Cinética de absorción de aceite durante la fritura a 140 °C y diferentes presiones de proceso.

Fuente: Este estudio

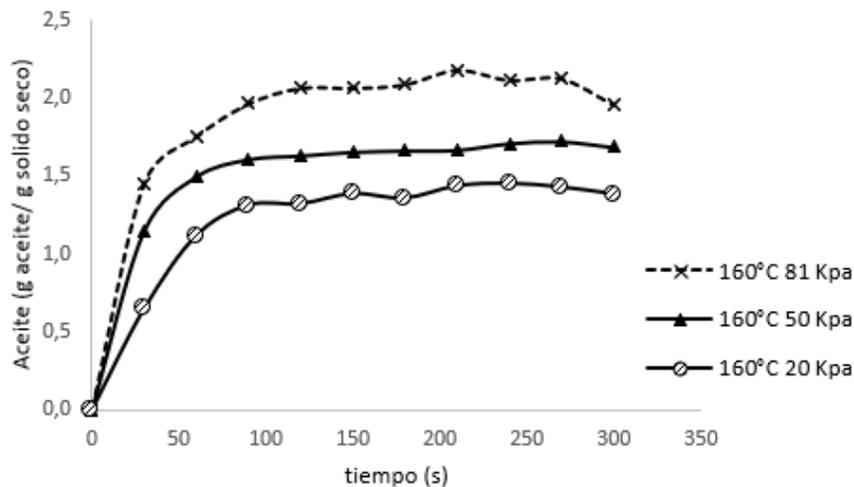


Figura 6. 13 Cinética de absorción de aceite durante la fritura a 140 °C y diferentes presiones de proceso.

Fuente: Este estudio

Autores como Silva et al., 2008 quien afirma que la fritura a vacío es un método eficiente para reducir el contenido de grasa, corrobora esta información, puesto que al someter el proceso de fritura a presiones subatmosféricas se consigue un producto con menor contenido de grasa, así Duieik et al., 2009 también informaron una reducción del 50% en el contenido de aceite en chips de zanahoria debido a la fritura a vacío, con respecto a la fritura convencional, al igual que Mariscal et al., 2008 quienes reportaron que el contenido de aceite en los chips de boniato y mango procesados por fritura a vacío fue significativamente menor al de los chips procesados por fritura tradicional.

Las curvas de las figuras 6.11, 6.12 y 6.13 corroboran que el contenido final de aceite en las muestras freídas a presiones de 20 Kpa y 50 Kpa es menor que en aquellas que fueron freídas a presión atmosférica (81 Kpa), con lo cual se evidencia una disminución significativa en el contenido de aceite conforme disminuye la presión. Así los valores máximos de contenido del contenido de aceite corresponde a la presión de 81 Kpa para todas las temperaturas, así, se concluye que a menor presión menor es la absorción de aceite en el producto conclusiones similares fueron reportadas en fritura a vacío (Crosa et al., 2014).

6.1.4 Modelado matemático de la cinética de absorción de aceite

6.1.4.1 Modelo de Monod

Los resultados obtenidos de los parámetros cinéticos mediante regresión no lineal para la resolución del modelo de Monod, con ayuda del programa Matlab, se muestran en la tabla 6.10 para cada temperatura y presión de fritura.

Tabla 6. 10 Parámetros cinéticos del modelo de Monod para cada temperatura y presión de fritura.

Presión (Kpa)	Temperatura (°C)					
	120		140		160	
	* Y _{e1} g aceite / g bs	*b (s)	* Y _{e1} g aceite / g bs	*b (s)	* Y _{e1} g aceite / g bs	*b (s)
20	1.811 ± 0.023 ^b	17.820 ± 1.534 ^a	1.608 ± 0.001 ^b	25.960 ± 2.503 ^a	1.608 ± 0.041 ^b	30.600 ± 2.878 ^a
50	2.226 ± 0.012 ^b	13.640 ± 0.460 ^a	2.067 ± 0.004 ^b	15.530 ± 1.400 ^a	1.833 ± 0.022 ^b	16.110 ± 1.259 ^a
81	3.602 ± 0.014 ^a	31.010 ± 0.460 ^a	2.803 ± 0.047 ^a	18.780 ± 1.817 ^a	2.271 ± 0.028 ^a	18.760 ± 1.916 ^a

*Valores promedio (n = 2) ± desviación estándar; Y_{e1} = contenido de aceite en equilibrio o máximo contenido; bs = base seca; b = tiempo de fritura durante el cual se ha adquirido la mitad de Y_{e1}. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 6.i).

Fuente: Este estudio

Con los parámetros cinéticos calculados mediante la regresión no lineal, se puede establecer la ecuación de Monod que describe el comportamiento de la cinética de absorción de aceite para las presiones de 20 Kpa, 50 Kpa y 81 Kpa (ecuaciones 27, 28 y 29, respectivamente). Tomando los resultados de la temperatura de 160 °C, las ecuaciones quedan:

$$Y = \frac{(Y_{e1} * t)}{(b+t)} = \frac{(1.608 * t)}{(30.600+t)} \tag{27}$$

$$Y = \frac{(Y_{e1} * t)}{(b+t)} = \frac{(1.833 * t)}{(16.110+t)} \tag{28}$$

$$Y = \frac{(Y_{e1} * t)}{(b+t)} = \frac{(18.760 * t)}{(30.600+t)} \tag{29}$$

Los parámetros empíricos de la ecuación de Monod, indican que el contenido de aceite en el equilibrio o máximo contenido de aceite absorbido (Y_e) en el tiempo de fritura es menor cuando el producto fue sometido a presiones subatmosféricas obteniendo así valores de 1.608 g/g bs, 1.833 g/g bs y 18.760 g/g bs cuando han transcurrido 30.6 s, 16.1 s y 30.6 s del proceso (parámetro b), el producto adquiere la mitad del máximo contenido de aceite (valores para presiones de 20, 50 y 81 Kpa, respectivamente).

Al efectuar la comparación en las medias de los valores de los parámetros Y_e y b del modelo de Moyano-Pedreschi entre las presiones y temperaturas se obtuvo un valor de $p < 0.05$ (ver anexo 6.i) según el análisis de varianza ANOVA, lo cual demuestra que estos parámetros cinéticos dependen significativamente de la presión y temperatura; mostrando valores significativamente más bajos a menor presión y mayor temperatura, tal como se muestra en la tabla 5.10.

6.1.4.2 Modelo de Moyano-Pedreschi

Los resultados obtenidos de los parámetros cinéticos mediante regresión no lineal para la resolución del modelo de Moyano-pedreschi, con ayuda del programa Matlab, se muestran en la tabla 6.11 para cada temperatura y presión de fritura.

Tabla 6. 11 Parámetros cinéticos del modelo de Moyano- pedreschi para cada temperatura y presión de fritura.

Presión (Kpa)	Temperatura (°C)					
	120		140		160	
	* Y_{e2} g aceite / g bs	* $k_1 \times 10^{-2}$ (s ⁻¹)	* Y_{e2} g aceite / g bs	* $k_1 \times 10^{-2}$ (s ⁻¹)	* Y_{e2} g aceite / g bs	* $k_1 \times 10^{-2}$ (s ⁻¹)
20	1.811 ± 0.023 ^b	5.611 ± 0.006 ^a	1.608 ± 0.001 ^b	3.851 ± 0.004 ^a	1.608 ± 0.041 ^b	3.268 ± 0.003 ^a
50	2.226 ± 0.012 ^b	7.329 ± 0.003 ^a	2.067 ± 0.004 ^b	6.439 ± 0.007 ^a	1.833 ± 0.022 ^b	6.205 ± 0.005 ^a
81	3.602 ± 0.014 ^a	3.225 ± 0.001 ^a	2.803 ± 0.047 ^a	5.325 ± 0.006 ^a	2.271 ± 0.028 ^a	5.966 ± 0.008 ^a

*Valores promedio (n = 2) ± desviación estándar; Y_{e1} = contenido de aceite en equilibrio o máximo contenido; bs = base seca; b = tiempo de fritura durante el cual se ha adquirido la mitad de Y_{e1} . Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 6.ii).

Fuente: Este estudio

Con los parámetros cinéticos calculados mediante la regresión no lineal, se puede establecer la ecuación de Moyano-pedreschi que describe el comportamiento de la cinética de absorción de aceite para las presiones de 20 Kpa, 50 Kpa y 81 Kpa (ecuaciones 30, 31 y 32, respectivamente). Tomando los resultados de la temperatura de 160 °C, las ecuaciones quedan:

$$Y = \frac{(Y_{e2} * K_1 * t)}{1 + (K_1 * t)} = \frac{(1.608 * 0.03268 * t)}{1 + (0.03268 * t)} \tag{30}$$

$$Y = \frac{(Ye_2 * K_1 * t)}{1 + (K_1 * t)} = \frac{(1.833 * 0.06205 * t)}{1 + (0.06205 * t)} \quad (31)$$

$$Y = \frac{(Ye_2 * K_1 * t)}{1 + (K_1 * t)} = \frac{(2.271 * 0.05966 * t)}{1 + (0.05966 * t)} \quad (32)$$

Los parámetros empíricos de la ecuación de Moyano-Pedreschi, indican que el contenido de aceite en el equilibrio o máximo contenido de aceite absorbido (Ye) en el tiempo de fritura es menor cuando el producto fue sometido a presiones subatmosféricas obteniendo así valores de 1.608 g/g bs, 1.833 g/g bs y 2.271 g/g y para la constante de velocidad de absorción de aceite (k) de 0.03268 s^{-1} , 0.06205 s^{-1} y 0.05966 s^{-1} (valores para presiones de 20, 50 y 81 Kpa, respectivamente).

Al efectuar la comparación en las medias de los valores de los parámetros Ye y k del modelo de Moyano-Pedreschi entre las presiones y temperaturas, según el análisis de varianza ANOVA, se obtuvo un valor de $p < 0.05$ (ver anexo 6.ii); lo cual demuestra que estos parámetros cinéticos dependen significativamente de la presión y temperatura. Así, en la tabla 6.11, se observa que Ye disminuye significativamente a medida que disminuye la presión y se incrementa la temperatura, mientras que el parámetro k obtiene su valor más alto en la presión de 50 Kpa.

6.1.4.3 Modelo exponencial de primer orden

Los resultados obtenidos de los parámetros cinéticos mediante regresión no lineal para la resolución del modelo exponencial de primer orden, con ayuda del programa Matlab, se muestran en la tabla 6.12 para cada temperatura y presión de fritura.

Tabla 6. 12 Parámetros cinéticos del modelo exponencial de primer orden para cada temperatura y presión de fritura.

Presión (Kpa)	Temperatura (°C)					
	120		140		160	
	*Y _{e3} g aceite / g bs	*k ₂ x 10 ⁻² (s ⁻¹)	*Y _{e3} g aceite / g bs	*k ₂ x 10 ⁻² (s ⁻¹)	*Y _{e3} g aceite / g bs	*k ₂ x 10 ⁻² (s ⁻¹)
20	1.652 ± 0.008 ^b	3.516 ± 0.001 ^a	1.428 ± 0.013 ^b	2.725 ± 0.002 ^a	1.410 ± 0.023 ^b	2.424 ± 0.001 ^a
50	2.062 ± 0.016 ^b	4.238 ± 0.001 ^a	1.906 ± 0.006 ^b	3.778 ± 0.003 ^a	1.691 ± 0.015 ^b	3.588 ± 0.002 ^a
81	3.166 ± 0.007 ^a	2.346 ± 0.001 ^a	2.541 ± 0.025 ^a	3.245 ± 0.002 ^a	2.085 ± 0.009 ^a	3.441 ± 0.003 ^a

*Valores promedio (n = 2) ± desviación estándar; Y_{e1} = contenido de aceite en equilibrio o máximo contenido; bs = base seca; b = tiempo de fritura durante el cual se ha adquirido la mitad de Y_{e1}. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 6.iii).

Fuente: Este estudio

Con los parámetros cinéticos calculados mediante la regresión no lineal, se puede establecer la ecuación de primer orden que describe el comportamiento de la cinética de absorción de aceite para las presiones de 20 Kpa, 50 Kpa y 81 Kpa (ecuaciones 33, 34 y 35, respectivamente). Tomando los resultados de la temperatura de 160 °C, las ecuaciones quedan:

$$Y = Y_{e3} * (1 - e^{(-K_2 * t)}) = 1.410 * (1 - e^{(-0.02424 * t)}) \tag{33}$$

$$Y = Y_{e3} * (1 - e^{(-K_2 * t)}) = 1.691 * (1 - e^{(-0.03588 * t)}) \tag{34}$$

$$Y = Y_{e3} * (1 - e^{(-K_2 * t)}) = 2.085 * (1 - e^{(-0.03441 * t)}) \tag{35}$$

Los parámetros empíricos de la ecuación de primer orden, indican que el contenido de aceite en el equilibrio o máximo contenido de aceite absorbido (Ye) en el tiempo de fritura es menor cuando el producto fue sometido a presiones subatmosféricas obteniendo así valores de 1.410 g/g bs, 1.691 g/g bs y 2.085 g/g y para la constante de velocidad de absorción de aceite (k) de 0.02424 s⁻¹, 0.03588 s⁻¹ y 0.03441 s⁻¹ (valores para presiones de 20, 50 y 81 Kpa, respectivamente).

Al efectuar la comparación en las medias de los valores de los parámetros Ye y k del modelo de Moyano-Pedreschi entre las presiones y temperaturas, según el análisis de varianza ANOVA, se obtuvo un valor de p < 0.05 (anexo 6.iii); lo cual demuestra que estos parámetros cinéticos dependen

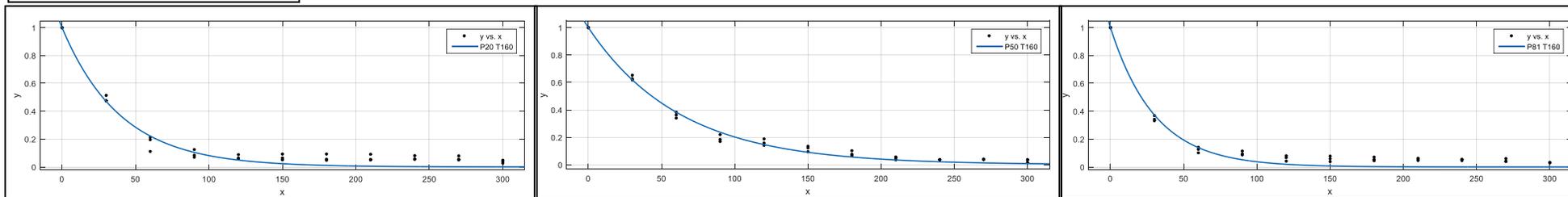
significativamente de la presión y temperatura. Así, en la tabla 6.12, se observa que Ye disminuye significativamente a medida que disminuye la presión y se incrementa la temperatura, mientras que el parámetro k obtiene su valor más alto en la presión de 50 Kpa.

6.2 Selección de los modelos matemáticos que mejor describen los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura a vacío de papa (*Solanum phureja*) variedad Ratona Morada

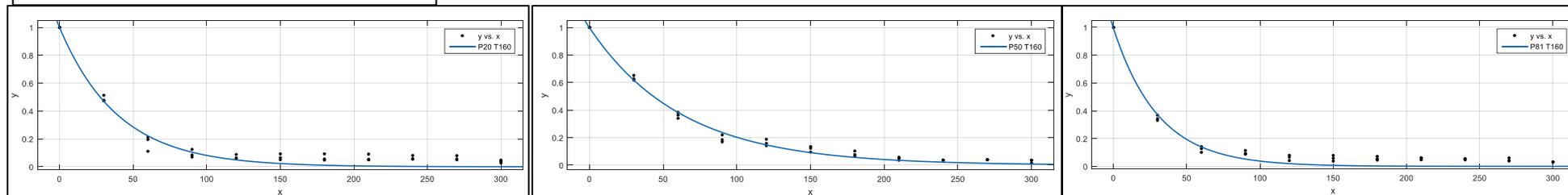
6.2.1 Evaluación de la calidad de ajuste de los modelos matemáticos aplicados a la cinética de pérdida de agua

La observación grafica es uno de los primeros criterios para evaluar la calidad de ajuste de un modelo, en este se puede juzgar la forma en que los valores calculados del modelo se ajustan a los datos experimentales (Gutiérrez & de la Vara, 2008). Con base en este criterio, en la figura 6.14 se muestra la representación gráfica de los datos de pérdida de agua ($y= MR$ en función de $x=$ tiempo) calculados con los modelos propuestos y los obtenidos experimentalmente, para mejor entendimiento se indican los modelos para la temperatura de 160 °C y las diferentes presiones empleadas, se observa que, en términos generales, los valores calculados de cada modelo se ajustan adecuadamente a los valores experimentales, validando su utilización en la descripción del fenómeno de pérdida de agua.

MODELO DE NEWTON



MODELO DE HENDERSON -PABIS



MODELO DE PAGE

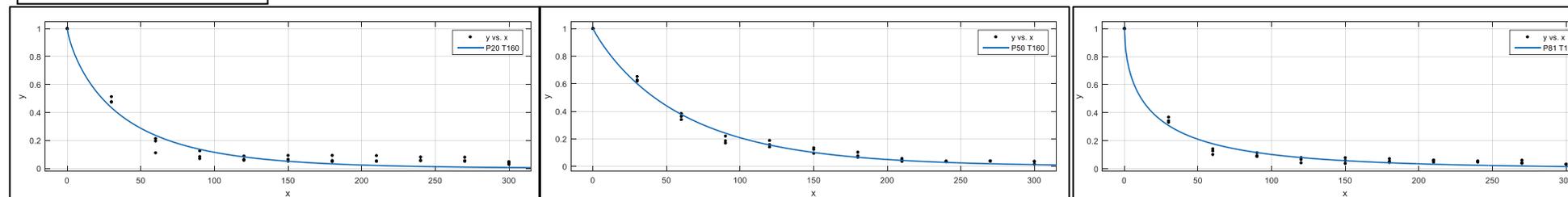


Figura 6. 14 Cinética de pérdida de agua experimental y calculada para la temperatura de 160 °C y todas las presiones.

Fuente: Este estudio

En la tabla 6.13 se muestra el resumen de los parámetros estadísticos de los modelos aplicados, obtenidos con el programa Matlab para cada presión y temperatura de fritura.

Tabla 6. 13 Parámetros estadísticos de ajuste de los modelos matemáticos de la cinética de pérdida de agua para cada presión y temperatura de fritura.

		Parámetros estadísticos								
Modelo	Presión (Kpa)	Temperatura (°C)								
		120			140			160		
		R ²	SSE x 10 ⁻²	RMSE x 10 ⁻²	R ²	SSE x 10 ⁻²	RMSE x 10 ⁻²	R ²	SSE x 10 ⁻²	RMSE x 10 ⁻²
Newton	20	0.974	2.159	4.647	0.987	1.063	3.260	0.997	0.236	1.537
	50	0.994	0.534	2.311	0.984	1.314	3.625	0.997	0.250	1.580
	81	0.940	4.476	6.691	0.987	1.136	3.370	0.996	0.339	1.842
Henderson - Pabis	20	0.975	2.060	4.784	0.988	1.059	3.430	0.997	0.236	1.619
	50	0.994	0.517	2.397	0.984	1.313	3.820	0.997	0.249	1.665
	81	0.948	3.885	6.570	0.988	1.064	3.439	0.996	0.337	1.935
Page	20	0.989	0.040	0.668	0.992	0.093	1.016	0.998	0.178	1.408
	50	0.999	0.085	0.970	0.996	0.347	1.963	0.999	0.078	0.932
	81	0.989	0.807	2.995	0.998	0.140	1.248	0.999	0.111	1.108

Fuente: Este estudio

En términos generales, en la tabla 6.13, se observa que los valores de los parámetros estadísticos de los modelos a las presiones y temperaturas dadas se encuentran en rangos óptimos con valores de 0.940 a 0.999 para R^2 , 0.040×10^{-2} a 4.476×10^{-2} para SSE y 0.668×10^{-2} a 6.691×10^{-2} para $RMSE$; valores muy cercanos a 1, en el caso del parámetro R^2 ; y valores muy cercanos a 0, para los parámetros SSE y $RMSE$; lo cual indica que los modelos propuestos en este estudio describen de manera adecuada la cinética de pérdida de agua, presentando un buen ajuste de los datos calculados con los datos experimentales.

6.2.2 Selección del mejor modelo matemático aplicado a la cinética de pérdida de agua

En la tabla 6.14 se resume el promedio de los resultados de los parámetros estadísticos de cada temperatura para cada presión de trabajo. Los modelos ajustados se muestran como criterio de selección para cada una de las presiones de fritura.

Tabla 6. 14 Comparación de los parámetros estadísticos de ajuste de los modelos matemáticos de la cinética de pérdida de agua para cada presión de fritura.

Parámetros estadísticos									
Modelo	Presión (Kpa)								
	20			50			81		
	R2	SSE x 10-2	RMSE x 10-2	R2	SSE x 10-2	RMSE x 10-2	R2	SSE x 10-2	RMSE x 10-2
Newton	0.981	1.153	3.148	0.992	0.699	2.505	0.974	1.984	3.968
Henderson - Pabis	0.987	1.118	3.278	0.992	0.693	2.627	0.978	1.762	3.981
Page	0.993	0.104	1.031	0.998	0.170	1.288	0.995	0.353	1.784

*Valores promedio (n = 3).

Fuente: Este estudio

La tabla 6.14 indica que el modelo que mejor se ajusta a los datos experimentales de contenido de agua para cada presión de fritura es el modelo de Page, puesto que presentan una calidad de ajuste mayor con respecto a los modelos de Newton y de Henderson-Pabis, tendiendo valores de *R2* más próximos a 1 y valores de *SSE* y *RMSE* que tienden más a 0. En consecuencia, este modelo puede describir mejor el comportamiento cinético de pérdida de agua para las diferentes condiciones del proceso de fritura a vacío.

Por otra parte, al observar los parámetros cinéticos para las diferentes presiones de fritura trabajadas, se puede ver que el modelo de Page se ajusta mejor para la presión de 50 Kpa en comparación con la de 20 Kpa y 81 Kpa, esto debido a las condiciones generadas al interior del proceso, con lo cual se facilita la salida de agua del producto.

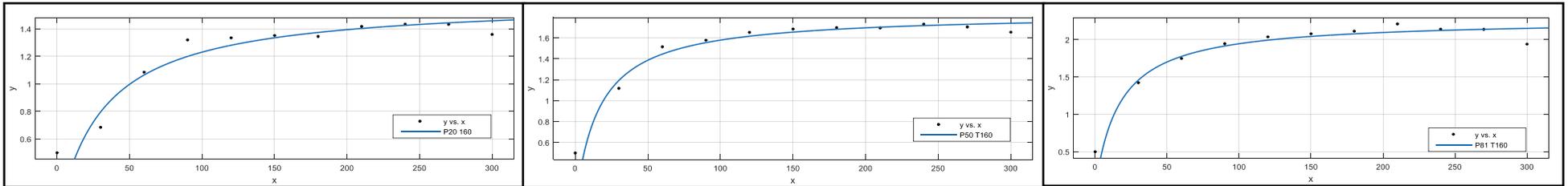
Resultados similares se han reportado en investigaciones previas por otros autores, en procesos de secado y fritura de diferentes productos alimenticios. Así, Vega & Lemus (2006) también obtuvieron el mejor ajuste de los datos experimentales con el modelo de Page frente a los modelos de Newton y de Henderson-Pabis en secado de papaya; informando los mayores valores de *R2* (0.98 a 0.99), *SSE* (9.0×10^{-4} a 2.0×10^{-3}); y *RMSE* (0.0292 a 0.0443); Garg, Sharma, Sadhu, & Sushmita (2014) informaron que el mejor ajuste de los datos experimentales del secado de láminas delgadas de arveja se dio con el modelo de Page, obteniendo altos valores de *R2* (0.9938), y valores bajos de *RMSE* (1.38×10^{-5}). Por su parte, Osorio et al. (2015) reportaron que el modelo de Page representaba mejor la cinética de pérdida de agua en fritura al vacío de arveja; con rangos de *R2* de 0.971 a 0.999, y rangos de *RMSE* de 0.052 a 0.424.

Según Vega & Lemus (2006), los mejores resultados obtenidos con el modelo de Page, se puede deber a que el parámetro n de este modelo, se encuentra en forma exponencial; con lo cual se obtiene una mejor aproximación matemática de los datos experimentales.

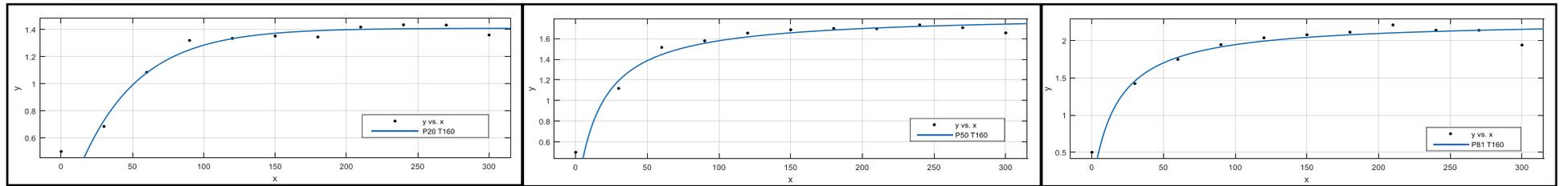
6.2.3 Evaluación de la calidad de ajuste de los modelos matemáticos aplicados a la cinética de absorción de aceite

La observación grafica es uno de los primeros criterios para evaluar la calidad de ajuste de un modelo, en este se puede juzgar la forma en que los valores calculados del modelo se ajustan a los datos experimentales (Gutiérrez & de la Vara, 2008). Con base en este criterio, en la figura 6.15 se muestra la representación gráfica de los datos de pérdida de agua ($y= MR$ en función de $x=$ tiempo) calculados con los modelos propuestos y los obtenidos experimentalmente, para mejor entendimiento se indican los modelos para la temperatura de 160 °C y las diferentes presiones empleadas, se observa que, en términos generales, los valores calculados de cada modelo se ajustan adecuadamente a los valores experimentales, validando su utilización en la descripción del fenómeno de absorción de aceite.

MODELO DE MONOD



MODELO DE MOYANO -



MODELO EXPONENCIAL DE PRIMER ORDEN

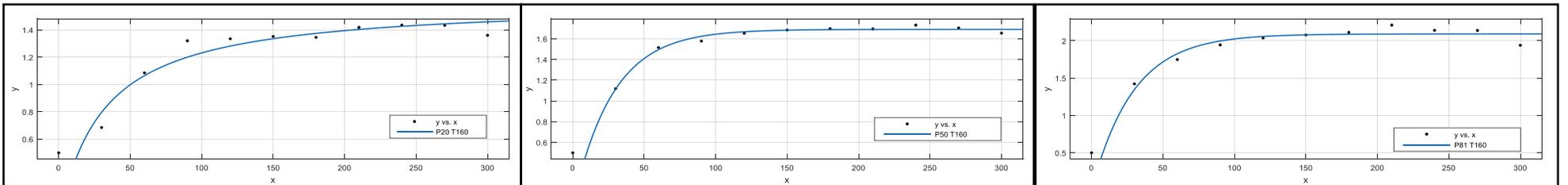


Figura 6. 15 Cinética de absorción de aceite experimental y calculada para la temperatura de 160 °C y todas las presiones.

Fuente: Este estudio

En la tabla 6.15 se muestra el resumen de los parámetros estadísticos de los modelos aplicados, obtenidos con el programa Matlab para cada presión y temperatura de fritura.

Tabla 6. 15 Parámetros estadísticos de ajuste de los modelos matemáticos de la cinética de absorción de aceite para cada presión y temperatura de fritura.

		Parámetros estadísticos								
Modelo	Presión (Kpa)	Temperatura (°C)								
		120			140			160		
		R ²	SSE x 10 ⁻²	RMSE x 10 ⁻²	R ²	SSE x 10 ⁻²	RMSE x 10 ⁻²	R ²	SSE x 10 ⁻²	RMSE x 10 ⁻²
Monod	20	0.951	2.659	1.719	0.949	2.715	1.737	0.974	2.914	1.799
	50	0.966	2.751	1.748	0.972	2.614	1.704	0.964	2.715	1.737
	81	0.932	3.542	1.984	0.963	2.939	1.807	0.907	3.135	1.866
Moyano- Pedreschi	20	0.951	2.659	1.719	0.949	2.715	1.737	0.974	2.914	1.799
	50	0.966	2.751	1.748	0.972	2.614	1.704	0.964	2.715	1.737
	81	0.932	3.542	1.984	0.963	2.939	1.807	0.907	3.135	1.866
Exponencial de primer orden	20	0.957	2.971	1.817	0.927	2.694	1.730	0.966	2.635	1.711
	50	0.977	3.331	1.924	0.958	2.721	1.739	0.954	2.561	1.687
	81	0.941	3.530	1.981	0.932	2.804	1.765	0.921	3.077	1.849

Fuente: Este estudio

En términos generales, en la tabla 6.15, se observa que los valores de los parámetros estadísticos de los modelos a las presiones y temperaturas dadas se encuentran en rangos óptimos con valores de 0.907 a 0.977 para R^2 , 2.635×10^{-2} a 3.542×10^{-2} para SSE y 1.687×10^{-2} a 1.984×10^{-2} para $RMSE$; valores muy cercanos a 1, en el caso del parámetro R^2 ; y valores muy cercanos a 0, para los parámetros SSE y $RMSE$; lo cual indica que los modelos propuestos en este estudio describen de manera adecuada la cinética de absorción de aceite, presentando un buen ajuste de los datos calculados con los datos experimentales.

6.2.4 Selección del mejor modelo matemático aplicado a la cinética de pérdida de agua

En la tabla 6.16 se resume el promedio de los resultados de los parámetros estadísticos de cada temperatura para cada presión de trabajo. Los modelos ajustados se muestran como criterio de selección para cada una de las presiones de fritura.

Tabla 6. 16 Comparación de los parámetros estadísticos de ajuste de los modelos matemáticos de la cinética de absorción de aceite para cada presión de fritura.

Modelo	Parámetros estadísticos								
	presión (Kpa)								
	20			50			81		
	R ²	SSE x 10 ⁻²	RMSE x 10 ⁻²	R ²	SSE x 10 ⁻²	RMSE x 10 ⁻²	R ²	SSE x 10 ⁻²	RMSE x 10 ⁻²
Monod	0.958	2.763	1.752	0.967	2.693	1.730	0.934	3.205	1.886
Moyano-Pedreschi	0.958	2.763	1.752	0.967	2.693	1.730	0.934	3.205	1.886
Exponencial de primer orden	0.950	2.767	1.753	0.963	2.871	1.783	0.931	3.137	1.865

*Valores promedio (n = 3).

Fuente: Este estudio

La tabla 6.16 indica que los modelos que mejor se ajustan a los datos experimentales de contenido de aceite para cada presión de fritura son los modelos de Monod y Moyano – Pedreschi, puesto que presentan una calidad de ajuste mayor con respecto al modelo exponencial de primer orden, asumiendo valores de *R2* más próximos a 1 y valores de *SSE* y *RMSE* que tienden más a 0. En consecuencia, este modelo puede describir mejor el comportamiento cinético de pérdida de agua para las diferentes condiciones del proceso de fritura a vacío. También se puede apreciar que estos dos modelos presentaron resultados muy similares, en consecuencia, cualquiera de los dos modelos puede describir mejor el comportamiento cinético de absorción de aceite para las diferentes condiciones del proceso de fritura a vacío, sin embargo, con respecto a la presión empleada se puede apreciar una diferencia notoria cuando se sometió el producto a una presión de 50 Kpa puesto que su parámetro *R2* es mayor que en las presiones de 20 Kpa y 81 Kpa. Comprobando así que ha de más de ser un punto óptimo de proceso, tiene también un ajuste en sus parámetros cinéticos mejor.

También se puede apreciar que estos dos modelos presentaron resultados muy similares. En consecuencia, cualesquiera de estos modelos pueden describir mejor el comportamiento cinético de absorción de aceite en rodajas de papa de para las diferentes condiciones del proceso de fritura a vacío.

Resultados similares se han reportado en investigaciones previas por otros autores. Así, Jibaja (2010) también obtuvo el mejor ajuste de los datos experimentales con los modelos de Monod y de Moyano Pedreschi frente al modelo exponencial en fritura al vacío de hojuelas de tomate de árbol; informando los mayores valores de *R2* (0.9927), *RMSE* (0.0031) y *MAE* (0.0021) para ambos modelos. Por su parte,

Osorio et al. (2015) reportaron que el modelo de Monod representaba mejor la cinética de absorción de aceite en fritura al vacío de arveja; con rangos de R^2 de 0.8840 a 0.9926, y rangos de $RMSE$ de 0.221 a 1.110.

Según Nielsen (2004) el modelo de Monod; conocido como la hipérbola rectangular, describe cinéticas de ganancia, y su representación gráfica es muy similar a la forma que presentan los datos experimentales de absorción de aceite, validando su utilización. No obstante, el modelo de Moyano-Pedreschi también resulta ser una buena opción.

6.3 Determinación de la difusividad del agua ($Deff$) y la energía de activación (Ea) requerida en los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura convencional de dos genotipos de papa (*Solanum phureja*).

6.3.1 Difusividad efectiva del agua

Las figuras 6.16, 6.17 y 6.18 muestran el ajuste lineal ($Ln MR$ vs t) del modelo de Fick de los datos experimentales para las rodajas de papa freídas a las presiones y temperaturas evaluadas; para la determinación de la difusividad efectiva ($Deff$). Los valores de $Deff$ obtenidos a través de la pendiente de las gráficas se presentan en la tabla 6.17.

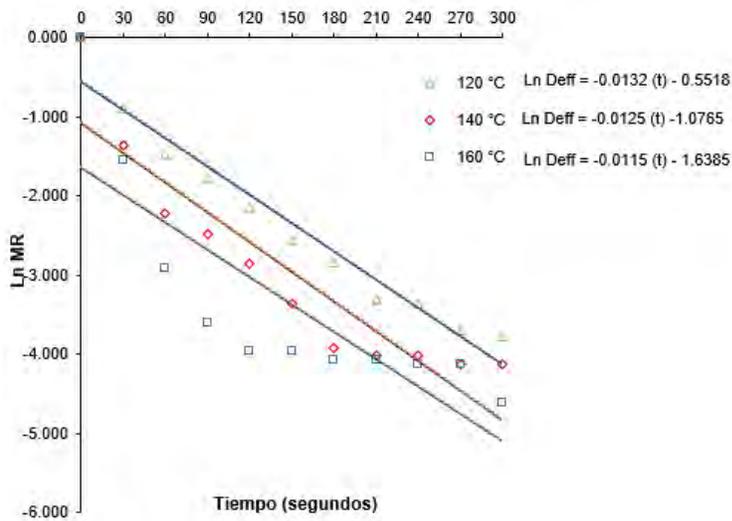


Figura 6. 16 Relación de Ln MR con el tiempo para una presión de 20 Kpa y cada temperatura de fritura.

Fuente: Este estudio

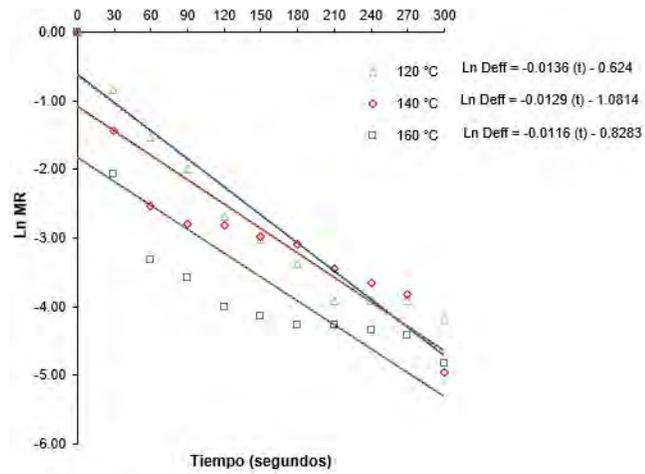


Figura 6. 17 Relación de Ln MR con el tiempo para una presión de 50 Kpa y cada temperatura de fritura.

Fuente: Este estudio

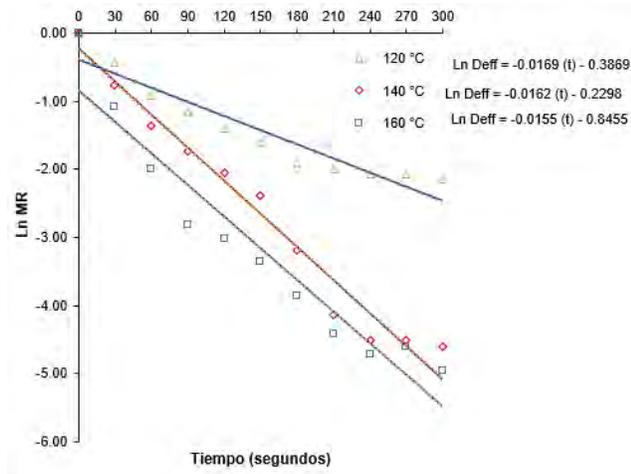


Figura 6. 18 Relación de Ln MR con el tiempo para una presión de 81 Kpa y cada temperatura de fritura.

Fuente: Este estudio

Tabla 6. 17 Difusividad efectiva del modelo de Fick para cada presión y temperatura de fritura.

Presión (Kpa)	Temperatura (°C)					
	120		140		160	
	*Deff x 10-8 (m2/s)	R2	*Deff x 10-8 (m2/s)	R2	*Deff x 10-8 (m2/s)	R2
20	2.139 ± 0.906 ^b	0.956	2.205 ± 0.877 ^b	0.973	2.739 ± 0.119 ^b	0.992
50	2.026 ± 0.825 ^b	0.853	2.091 ± 0.592 ^b	0.839	2.626 ± 0.995 ^b	0.969
81	1.864 ± 0.803 ^a	0.757	1.881 ± 0.208 ^a	0.799	2.513 ± 0.543 ^a	0.954

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar; Deff = difusividad efectiva del agua. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 9).

Fuente: Este estudio

En la tabla 6.17 se observa que los valores de coeficiente de determinación (R2) son mayores en todas las temperaturas de trabajo para la presión de 20 Kpa, seguida en su orden por las de 50 Kpa y 81 Kpa, por tanto, se puede afirmar que el modelo de difusión de Fick describe satisfactoriamente la transferencia de agua en el proceso de fritura a vacío, empleando presiones subatmosféricas. Los valores de *Deff* obtenidos en este estudio varían entre 2.739 x 10⁻⁸ y 1.864 x 10⁻⁸ m2/s; sin embargo, se encuentran en el orden de magnitud de 10-8 a 10-11 m2/s para los alimentos deshidratados (Sacilik & Elicin, 2006).

Algunos valores de *Deff* para otros materiales deshidratados en fritura han sido reportados en la literatura. Así, Alvis et al. (2015) reportaron valores en los rangos de 0.92 y 1.39 x 10⁻⁶ m2/s para trozos de batata a temperaturas de 150, 170 y 190 °C, siendo mayores a los obtenidos por Tirado, Acevedo, & Guzmán (2015) en fruta de pan (1.08 a 10.86 x 10⁻¹⁰ m2/s) a temperaturas en los rangos de 150 y 190 °C; aclarando que las diferencias pueden ser atribuidas a la naturaleza del producto, las condiciones del proceso como la temperatura, tamaño de la muestra y los métodos de determinación (Alvis et al., 2015; Ríos, Granados, Martínez, & Félix, 2013).

Por otra parte, el análisis de varianza ANOVA indicó que existe una influencia significativa de la presión y temperatura de fritura sobre la difusividad efectiva (p < 0.05; ver anexo 9); lo cual se evidencia en la tabla 6.17, mostrando que los valores de *Deff* aumentaron con presiones subatmosféricas y temperaturas más altas, el incremento de la temperatura, puede ser explicado ya que, a mayor temperatura,

las muestras ofrecen menor resistencia interna a la migración de la humedad (Sosa Brito & Campos Marín, 2010). Esto puede ser explicado por Pedreschi et al. (2006) y Montes et al. (2008); ya que mayor temperatura, implica mayor porosidad, porque la tasa de evaporación aumenta; como consecuencia, hay una mayor área de transferencia de masa. Otros estudios que también obtienen esta relación entre la temperatura y la difusividad del agua en fritura convencional y al vacío son los realizados por Yildiz et al. (2007) y Debnathb, Rastogia, Krishnab, & And Lokesh (2012) en trozos de papa; y Bravo, Sanjuán, Clemente, & Mulet (2011) en *chips* de manzana.

6.3.2 Energía de activación para la cinética de pérdida de agua

La difusividad efectiva ($Deff$) fue ajustada a la ecuación de Arrhenius mediante regresión lineal; la cual se muestra en la figura 6.19, con el fin de obtener la energía de activación (Ea) para el comportamiento cinético de pérdida de agua. Los valores de Ea obtenidos a través de la pendiente de las gráficas se presentan en la tabla 6.18.

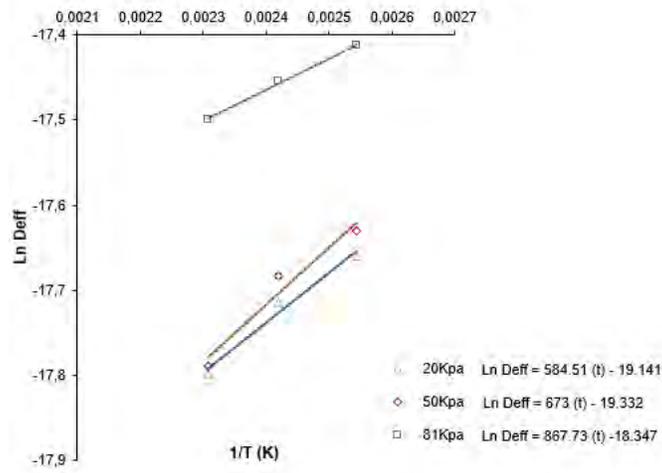


Figura 6. 19 Gráfica de Arrhenius de la difusividad del agua.

Fuente: Este estudio

Tabla 6. 18 Energía de activación del modelo de Arrhenius de la difusividad efectiva para cada presión de fritura.

Presión (Kpa)	*Ea (kJ/mol)	R2
20	24.859 ± 9.131	0.956
50	25.595 ± 8.490	0.853
81	27.214 ± 8.211	0.757

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar.

Fuente: Este estudio

Según Montes et al. (2008) y Melquíades et al. (2009), la energía de activación del fenómeno de pérdida de agua representa termodinámicamente la energía requerida por las moléculas para iniciar la difusión del agua a través del producto; la cual proviene, inicialmente, de la energía térmica aportada por el aceite (Osorio et al., 2015). Así, los valores de energía de activación requerida para la difusión del agua en el proceso de fritura se muestran en la tabla 6.18, encontrándose dentro del rango informado en la literatura para productos alimenticios sometidos a deshidratación (12.7 a 110 kJ/mol) (Montes et al., 2008). Espinoza-Saavedra (2011) señala que los valores de *Ea* dependen tanto de las temperaturas del proceso como del producto utilizado.

Algunos resultados similares para alimentos deshidratados son; zanahorias (22.43 kJ/mol), para un rango de temperaturas de 50 a 80 °C (Toğrul, 2006), papa (23.5 kJ/mol) para temperaturas entre 120 y 140 °C (Troncoso & Pedreschi, 2009) y por Ortega & Montes (2014) en yuca (37.84 kJ/mol) para temperaturas de entre 140 y 180 °C.

6.3.3 Energía de activación para la cinética de absorción de aceite

La variación del contenido máximo de aceite absorbido o contenido de aceite en equilibrio (*Ye*) con respecto a la temperatura de fritura fue ajustada a la ecuación de Arrhenius mediante regresión lineal; la cual se muestra en la figura 6.20, con el fin de obtener la energía de activación (*Ea*) para el comportamiento cinético de absorción de aceite en las presiones de 20 Kpa, 50 Kpa y 81 Kpa. Los valores de *Ea* obtenidos a través de la pendiente de las gráficas se presentan en la tabla 6.19.

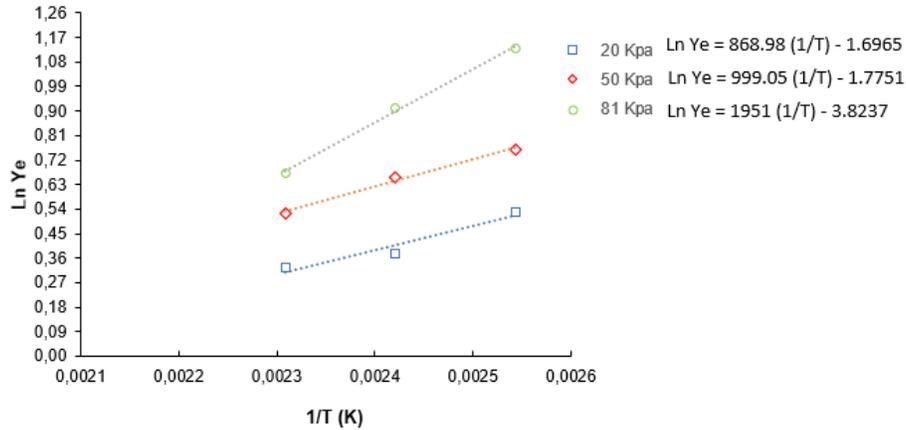


Figura 6. 20 Gráfica de Arrhenius para la variación del contenido de aceite en equilibrio con la temperatura para todas las presiones.

Fuente: Este estudio

Tabla 6. 19 Energía de activación del modelo de Arrhenius del contenido de aceite en equilibrio para cada presión de fritura.

Presión (Kpa)	*Ea (kJ/mol)	R2
20	-7.2247 ± 1.253	0.943
50	-8.3061 ± 1.632	0.988
81	-16.2206 ± 1.766	0.998

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar.

Fuente: Este estudio

Según Melquíades et al. (2009), la energía de activación del fenómeno de absorción de aceite representa termodinámicamente la energía que necesitan las moléculas para su migración o entrada hacia el interior del producto. Según lo anterior, en la tabla 6.19 se observa que los valores de *Ea* son negativos, lo cual se justifica al considerar que no existen barreras energéticas para que el aceite pueda entrar al alimento frito debido a que los espacios o huecos capilares dejados por la salida del agua del interior del producto son llenados con facilidad por el aceite. Resultados similares fueron reportados en rodajas de yuca, siendo el valor encontrado de -10.25 kJ/mol en muestra control para rangos de temperatura de 140 a 180 °C (Ortega & Montes, 2014) y en Nuggets de camarón (-13.45 a -27.58 kJ/mol) para temperaturas de entre 150 y 190 °C (Nasiri et al., 2011).

Respecto a la influencia de la temperatura, se evidencia que a mayor temperatura se requiere mayor E_a para comenzar a promover la absorción de aceite en el alimento (Bravo-Vásquez, 2008), concordando en este estudio con el hecho de que, a mayor temperatura, menor es la absorción de aceite.

7. CONCLUSIONES

La presión y temperatura afectaron significativamente el contenido de agua y de aceite durante la fritura a vacío de las rodajas de papa variedad ratona morada. Así, cuando el producto se sometió a presiones subatmosféricas el contenido de agua y aceite disminuye significativamente; por ende, se puede afirmar que la fritura a vacío en comparación a la fritura convencional es una herramienta que logra optimizar el proceso de una manera adecuada. Por otra parte, se observa que a medida que aumenta la temperatura, para un instante dado, el contenido de agua y de aceite disminuyen; es decir que, a mayor temperatura, mayor es la pérdida de agua y menor es la absorción de aceite en el producto.

El tiempo de residencia del alimento en el proceso de fritura a vacío también tuvo influencia, donde la velocidad de pérdida de agua y la velocidad de absorción de aceite aumentaron significativamente en los primeros instantes del proceso, y pasado ese tiempo, disminuyen hasta alcanzar un equilibrio en el contenido de agua y de aceite al finalizar el proceso.

Los datos obtenidos de contenido de agua y de aceite de los modelos matemáticos empíricos estudiados mostraron una buena calidad de ajuste sobre las curvas experimentales; con altos valores de R^2 (> 0.93), y bajos valores de SSE y $RMSE$ ($< 4.4 \times 10^{-2}$); validando su utilización para describir los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite. No obstante, el modelo de Page y los modelos de Monod y Moyano-Pedreschi describen mejor los fenómenos de pérdida de agua y absorción de aceite, mostrando los valores más altos de R^2 , y los valores más bajos de SSE y $RMSE$ frente a los demás modelos aplicados. En ambos casos los modelos se ajustaron mejor cuando el producto se sometió a una presión de 50 Kpa.

La transferencia de agua durante la fritura por inmersión de las rodajas de papa fue descrita apropiadamente por la segunda ley de Fick para la geometría de placas infinitas troncadas y la difusividad efectiva mostró dependencia con la presión y temperatura, siendo mayor, conforme aumenta la presión y temperatura de fritura. Así mismo, los valores encontrados de $Deff$ se encuentran dentro del intervalo general de 10^{-8} a 10^{-11} m²/s para alimentos deshidratados.

La difusividad efectiva y el contenido máximo de aceite o contenido en equilibrio se ajustaron a la ecuación de Arrhenius, permitiendo calcular la energía de activación requerida en el proceso, la cual se encuentran dentro del intervalo general de 12.7 a 110 kJ/mol para deshidratación de alimentos.

8. PROPIEDADES FÍSICAS; COLOR Y TEXTURA COMO PARÁMETRO DE CALIDAD EN LA FRITURA A VACÍO DE PAPA (*SOLANUM PHUREJA*) VARIEDAD RATONA MORADA

8.1 Fundamentos teóricos

8.1.2 Color en alimentos

8.1.2.1 Generalidades

Los cuatro factores más importantes que son evaluados en la calidad final de los alimentos son: aspecto (color, forma, brillo); sabor (olor y/o aroma); textura y nutrición. El aspecto, el sabor y la textura se refieren a la aceptabilidad sensorial ya que ellos son percibidos directamente por los sentidos. Está, en los productos fritos, es afectada por los procesos y las condiciones de operación y compromete al producto manufacturado, desde el cortado, escaldado, cocinado, freído, enfriado y empaquetado (Alvis, Villada, & Villada, 2008).

Por otra parte, el color es una cualidad organoléptica de los alimentos y se aprecia por medio del sentido físico de la vista. También suele ser considerado un factor psicológico de apreciación y un criterio para elegir un producto alimenticio. En la actualidad el color y la apariencia de un alimento o producto procesado, son el primer contacto que tiene a lugar el consumidor, condicionando sus preferencias e influenciando sobre su elección. El color está relacionado con las cualidades sensoriales, la composición química y, por lo tanto, uno de los factores que define la calidad de un producto alimentario.

El color dorado es característico y un atributo muy significativo en la calidad de un producto frito y determinante en la aceptación de este por parte de los consumidores. Sin embargo, este atributo de calidad puede ser afectado por el nivel de vacío, la temperatura, el tiempo de fritura y el pardeamiento (enzimático y no enzimático). Este último factor, el pardeamiento de los alimentos fritos, se puede evitar con el uso de pretratamientos (Jibaja, 2010).

El color de los chips cambia significativamente según el proceso aplicado, así, Shyu et al., 2005, afirma que la aplicación de la fritura a vacío permite mejorar el color de los alimentos fritos, ya que lo preserva mejor, favoreciendo el aspecto del chip desde lo sensorial y nutricional.

El color se puede evaluar fácilmente y puede ser un indicador de las reacciones de Maillard; las cuales han sido relacionadas con la producción de acrilamida en alimentos. Durante la fritura, el color de los productos se ve afectado por las condiciones del proceso, así como por las características del producto, tamaño y variedad; la medición de color comúnmente se hace con ayuda de un colorímetro, el cual posee diversas escalas. La más ampliamente usada en la determinación del color de chips es la escala CIELAB, ya que esta permite determinar los cambios de color en la misma forma que lo hace el ojo humano. En esta escala de color se miden los valores L^*a^*b para expresar la diferencia de color entre muestras, siendo la dimensión L la claridad o luminosidad, la dimensión a^* se refiere a los matices rojas-verdes, y la b se

refiere a las matices azul-amarillo7 (Juan Carlos Lucas, Víctor Dumar Quintero, Leal, & José Daniel Mosquera, 2013).

8.1.2.2 Perfil de color

Debido a la disposición de los equipos se puede decidir sobre el modelo a seguir para realizar un perfil de color, el modelo CIELAB el cual queda definido por tres variables que se representan en sistemas cartesianos o polares; en el primero se utilizan los valores de luminosidad (L^*

) y las coordenadas a^* y b^* ; en el segundo, los parámetros L^* , saturación (C^*) y tono (h^*). En un sistema ortogonal se lo representa mediante un eje vertical (L^*), que indica claridad u oscuridad, y un plano horizontal conformado por los ejes a^* y b^* . El eje a^* refleja la variación rojo-verde, siendo positivo para el primero ($+a^*$) y negativo para el segundo ($-a^*$); el b^* la variación amarillo-azul, siendo positivo para el primero ($+b^*$) y negativo para el otro ($-b^*$). Por otro lado, la saturación está asociada a qué tan vívido es un color y el tono (h^*) es el ángulo que indica si el color es rojo (0°), amarillo (90°), verde (180°) o azul (270°) (Lopez, A; Di Sarli, 2016).

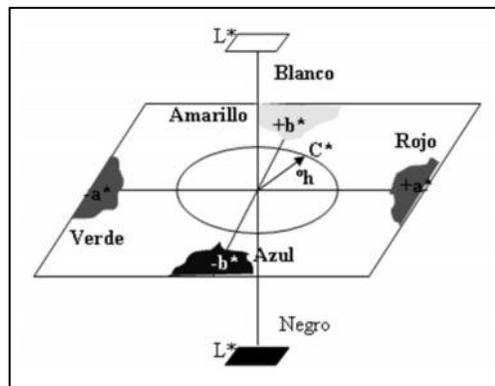


Figura 8. 1 modelo o espacio de color CIELAB.

Fuente: (Lopez, A; Di Sarli, 2016)

Por otra parte, el perfil de color es una herramienta ampliamente utilizada y de mucha ayuda a la hora de comparar los cambios de color, que sufren los alimentos durante diferentes tipos de procesos térmicos. Una forma de medir la diferencia existente entre dos colores, es la medida ΔE , puesto que representa la diferencia mínima entre dos colores que el ojo humano medio es capaz de distinguir. En realidad, lo que se está haciendo es medir la distancia entre puntos en un espacio tridimensional (Duymovich, Acheme, Sesini, & Mazziotta, 2005).

Las herramientas más empleadas en la industria de los alimentos para realizar las mediciones de color son los colorímetros y espectrofotómetros, su funcionamiento se basa en la medición de la cantidad de luz transmitida por una muestra a una longitud de onda seleccionada por el usuario y la predicción de la

transmisión o absorción de la luz a distintas longitudes de onda, respectivamente (Duymovich et al., 2005).

8.1.3 Textura en alimentos

8.1.3.1 Generalidades

La textura al igual que el color es uno de los parámetros de calidad en los alimentos que tiene una importancia fundamental en la producción y aceptación de un producto en el consumidor. La primera sensación de textura del consumidor lo lleva a aceptar el alimento y las sensaciones finales al masticarlo lo llevan a ingerirlo, porque el alimento ha respondido a lo que el consumidor esperaba de él (Juan Carlos Lucas et al., 2013).

La fritura modifica las características de textura de los productos; es así como el punto de quiebre (fuerza de dureza) de los productos se usa para medir el crujido de un producto frito. La textura depende de la estructura del alimento, y se le relaciona con la deformación, desintegración y flujo del alimento sometido a una fuerza y son medidos en función de la masa, el tiempo y la distancia. Los ensayos comúnmente realizados para el análisis de textura de alimentos son el de compresión simple, análisis de perfil de textura y relajación-tensión. Entre los tipos de pruebas más comúnmente usados en la determinación del crujido que pueda tener un alimento, se encuentran los de penetración y masticación (Juan Carlos Lucas et al., 2013).

Durante este proceso ocurren diversos cambios, que incluyen reacciones químicas en el aceite como hidrólisis, oxidación y cambios en el producto como pérdida de humedad, absorción de aceite, pirolización, gelatinización de almidón y desnaturalización de proteínas, lo que a su vez genera cambios en el color y la textura, parámetros que son dependientes de las condiciones de fritura, incluyendo la presión, el tiempo y temperatura del aceite. Por esta razón, es una de las técnicas de cocción más empleadas en la industria y ha sido aplicada en diversas matrices alimentarias como pimientos verdes, calabacines, berenjenas (Kalogeropoulos, Mylona, Chiou, Ioannou y Andrikopoulos, 2007), papas (Pedreschi, 2009), plátano (Gibert et al., 2009) y mango (Torres, Villamizar, Martínez y Hernández, 2014).

El estudio de la textura en productos a base de papa ha sido de mucho interés puesto que se considera que tanto el almidón como la pectina de la pared celular son los polímeros que determinan las propiedades estructurales en la papa. Considerando la importancia comercial de los productos procesados elaborados a partir de papa (Esquivel, Brenes, & Alfaro, 2009).

8.1.3.2 Perfil de textura

El estudio y conocimiento de la textura como propiedad física del alimento es de suma importancia para determinar la aceptabilidad de este. El consumidor prefiere aquellos alimentos que resulten agradables sensorialmente. Esta aceptación es determinante en alimentos como carne y sus derivados, así

como en los productos crujientes entre otros, también es importante en alimentos en los que la textura, a pesar de no ser una característica dominante, contribuye a su calidad global; algunos ejemplos se representan en frutas, hortalizas, entre otros (Alvis et al., 2011). La textura es un importante impulsor de las preferencias del consumidor (Granados, Acevedo, Cabeza, & Lozano, 2014).

La textura se puede medir de dos maneras; objetiva con ayuda de instrumentos y subjetiva por medio de pruebas sensoriales. Entre los dispositivos de prueba instrumental, se encuentran los texturómetros, los cuales imitan las condiciones de la masticación y presentan excelentes correlaciones con las evaluaciones sensoriales de textura. Por esta razón, han sido ampliamente utilizados para medir la textura de diferentes tipos de alimentos (Granados et al., 2014)

A.s Szczesniak, la que fuera una de las científicas principales de General Foods, indico la naturaleza multidimensional de la textura y la importancia que tiene para el consumidor. Por esto, los principios del análisis del perfil de textura, también conocido como TPA, tanto para el método instrumental como el sensorial, Los parámetros de textura identificados por el grupo General Foods dieron una relación excelente respecto a las mediciones sensoriales. Esto hace que sea un ensayo utilizado comúnmente para caracterizar productos (Bourne, 2002).

9. METODOLOGÍA

9.1 Determinación de color

Una vez realizado el proceso descrito en los apartados 5.2.1 y 5.3.1 correspondientes al proceso de fritura a vacío, se procedió a realizar la determinación de color en los chips de papa (*Solanum phureja*) variedad Ratoná Morada, empleando un espectrofotómetro (KONICA MINOLTA, CM-5), tomando como muestra una unidad experimental. Los parámetros evaluados corresponden a (ΔE) cambio de color a partir de las coordenadas L^* , a^* y b^* . El análisis se llevó a cabo por triplicado.



Imagen 9. 1 Determinación de color.

Fuente: este estudio.

9.1.1 Obtención del parámetro ΔE

Con los resultados experimentales de color obtenidos (parámetros de L^* , a^* y b^*), se construyó el gráfico de cambio de color, representando los valores medidos del cambio de color (ΔE) en el tiempo de fritura para cada presión y temperatura evaluada. La gráfica resultante fue obtenida mediante el programa Excel (2016).

se calculó las diferencias de color utilizando la distancia euclidiana (ΔE^*) existente entre dos puntos en un espacio tridimensional a partir de las determinaciones de los valores estado fresco (${}_0$) y freídas a vacío (${}_f$), descrito por la ecuación 36.

$$\Delta E = \sqrt{(L_f^* - L_0^*)^2 + (a_f^* - a_0^*)^2 + (b_f^* - b_0^*)^2} \quad (36)$$

Donde: L^* : es el parámetro Luminosidad; a^* : indica la variación rojo-verde y b^* : la variación amarillo-azul.

9.2 Determinación de textura

Una vez realizado el proceso descrito en los apartados 5.2.1 y 5.3.1 correspondientes al proceso de fritura a vacío, se procedió a realizar la determinación de textura en los chips de papa (*Solanum phureja*) variedad Ratona Morada, utilizando un analizador de textura LS1 (Test and Calibration Instruments Ametek, Lloyd Materials testing, USA) con vástago de punta circular, precarga de 0.1 N y una velocidad de 20 mm/min. Se tomo como muestra una unidad experimental. El análisis se llevó a cabo por triplicado.

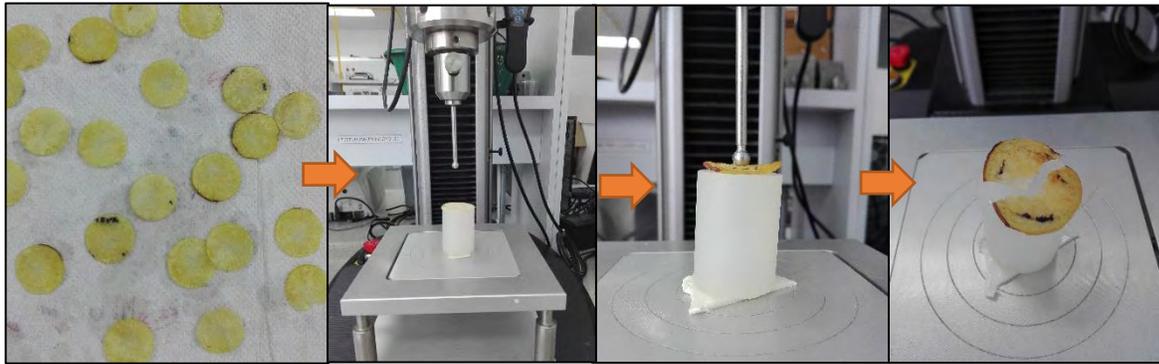


Imagen 9. 2 Determinación de textura.

Fuente: este estudio.

9.2.1 Determinación de textura

Con los resultados experimentales, se construyó las gráficas del perfil de textura, representando los valores medidos de dureza (N) de cada muestra en función del tiempo de fritura para cada presión y temperatura evaluadas. La gráfica resultante fue obtenida mediante el programa Excel (2016).

9.2.2 Análisis estadístico

El análisis estadístico de los resultados de las cinéticas de color y textura se realizó de acuerdo con la metodología descrita en el apartado 5.3.4.

10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

10.1 Construcción de los perfiles de color y textura durante la fritura a vacío de papa (*Solanum phureja*) variedad Ratona Morada

10.1.1 Perfil de color

La variación en el cambio de color ΔE para rodajas de papa (*Solanum phureja*) variedad Ratona Morada durante la fritura a vacío, a presiones de 20, 50 y 81 Kpa y temperaturas de 120, 140 y 160 °C en función del tiempo se muestran en las tablas 10.1, 10.2 y 10.3.

La figura 10.1 muestran los parámetros L^* , a^* y b^* para todas las temperaturas y presiones empleadas en el proceso de fritura a vacío.

Tabla 10. 1 Parámetros cinéticos y cambio de color en función del tiempo durante la fritura a 20 Kpa y diferentes temperaturas.

Tiempo (s)	Parámetros de color y ΔE para la presión de 20 Kpa											
	T= 120				T= 140				T= 160			
	L*	a*	b*	ΔE	L*	a*	b*	ΔE	L*	a*	b*	ΔE
0	52,077 ± 1,389 ^a	-0,763 ± 0,050 ^{ab}	8,277 ± 0,140 ^b	0,000 ± 0,000	52,077 ± 1,389 ^a	-0,763 ± 0,050 ^{ab}	8,277 ± 0,140 ^b	0,000 ± 0,000	52,077 ± 1,389 ^a	-0,763 ± 0,050 ^{ab}	8,277 ± 0,140 ^b	0,000 ± 0,000
30	67,133 ± 0,130 ^{bc}	-0,550 ± 0,026 ^{ab}	5,550 ± 0,393 ^{ab}	15,310 ± 1,196	59,750 ± 0,524 ^{bc}	0,437 ± 0,015 ^{ab}	1,843 ± 0,021 ^{ab}	10,131 ± 1,223	63,817 ± 0,131 ^{bc}	0,087 ± 0,025 ^{ab}	5,263 ± 0,083 ^{ab}	12,156 ± 1,448
60	67,283 ± 0,889 ^{bc}	-0,150 ± 0,010 ^{ab}	4,685 ± 0,175 ^a	15,643 ± 0,913	62,483 ± 0,224 ^{bc}	0,050 ± 0,010 ^{ab}	3,303 ± 0,277 ^a	11,583 ± 1,124	67,667 ± 0,072 ^{bc}	0,550 ± 0,036 ^{ab}	6,760 ± 0,185 ^a	15,720 ± 1,324
90	63,880 ± 1,607 ^b	0,707 ± 0,035 ^{bc}	4,290 ± 0,288 ^{ab}	12,563 ± 1,216	61,657 ± 1,261 ^b	0,370 ± 0,020 ^{bc}	3,637 ± 0,408 ^{ab}	10,716 ± 0,108	60,340 ± 0,070 ^b	1,917 ± 0,046 ^{bc}	4,847 ± 0,135 ^{ab}	9,358 ± 1,134
120	63,437 ± 0,306 ^{bc}	0,130 ± 0,010 ^{bcd}	4,547 ± 0,118 ^a	11,998 ± 1,524	64,327 ± 0,933 ^{bc}	-0,060 ± 0,010 ^{bcd}	4,343 ± 0,015 ^a	12,900 ± 2,016	60,430 ± 0,305 ^{bc}	1,503 ± 0,032 ^{bcd}	4,760 ± 0,288 ^a	9,371 ± 1,424
150	60,800 ± 0,800 ^{cd}	0,317 ± 0,015 ^{cd}	2,773 ± 0,170 ^a	10,393 ± 0,897	62,247 ± 0,852 ^{cd}	0,267 ± 0,025 ^{cd}	3,667 ± 0,067 ^a	11,238 ± 1,712	64,337 ± 0,104 ^{cd}	0,663 ± 0,038 ^{cd}	6,323 ± 0,318 ^a	12,508 ± 1,357
180	61,940 ± 0,609 ^{bcd}	0,130 ± 0,010 ^{cde}	3,157 ± 0,118 ^a	11,158 ± 0,791	61,387 ± 0,693 ^{bcd}	0,300 ± 0,010 ^{cde}	4,520 ± 0,234 ^a	10,097 ± 0,677	59,603 ± 0,358 ^{bcd}	1,323 ± 0,064 ^{cde}	5,697 ± 0,287 ^a	8,242 ± 1,518
210	63,550 ± 0,201 ^{cd}	0,260 ± 0,017 ^{cde}	3,443 ± 0,307 ^a	12,506 ± 1,367	67,653 ± 1,040 ^{cd}	0,543 ± 0,064 ^{cde}	6,420 ± 0,445 ^a	15,749 ± 0,857	63,540 ± 0,221 ^{cd}	1,337 ± 0,031 ^{cde}	7,260 ± 0,095 ^a	11,703 ± 1,566
240	64,490 ± 0,265 ^{cd}	0,160 ± 0,010 ^{cde}	6,590 ± 0,225 ^a	12,569 ± 1,237	61,237 ± 1,208 ^{cd}	0,507 ± 0,021 ^{cde}	4,350 ± 0,445 ^a	10,103 ± 2,285	61,503 ± 1,759 ^{cd}	1,813 ± 0,172 ^{cde}	6,403 ± 0,316 ^a	9,999 ± 2,870
270	64,397 ± 0,050 ^{cd}	-0,223 ± 0,006 ^{de}	5,337 ± 0,244 ^{ab}	12,688 ± 1,306	64,657 ± 0,758 ^{cd}	0,367 ± 0,021 ^{de}	5,407 ± 0,265 ^{ab}	12,967 ± 1,998	61,650 ± 1,059 ^{cd}	1,847 ± 0,051 ^{de}	7,687 ± 0,399 ^{ab}	9,958 ± 1,346
300	61,810 ± 0,685 ^d	0,313 ± 0,012 ^e	3,297 ± 0,188 ^{ab}	11,013 ± 1,265	67,457 ± 0,577 ^d	0,637 ± 0,050 ^e	5,707 ± 0,258 ^{ab}	15,658 ± 1,830	63,570 ± 0,272 ^d	1,643 ± 0,031 ^e	6,270 ± 0,060 ^{ab}	11,920 ± 1,542

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 3.a).

Fuente: Este estudio

Tabla 10. 2 Parámetros cinéticos y cambio de color en función del tiempo durante la fritura a 50 Kpa y diferentes temperaturas.

Tiempo (s)	Parámetros de color y ΔE para una presión de 50 Kpa											
	T= 120				T= 140				T= 160			
	L*	a*	b*	ΔE	L*	a*	b*	ΔE	L*	a*	b*	ΔE
0	52,077 ± 1,389 ^a	-0,763 ± 0,050 ^{ab}	8,277 ± 0,140 ^b	0,000 ± 0,000	52,077 ± 1,389 ^a	-0,763 ± 0,050 ^{ab}	8,277 ± 0,140 ^b	0,000 ± 0,000	52,077 ± 1,389 ^a	-0,763 ± 0,050 ^{ab}	8,277 ± 0,140 ^b	0,000 ± 0,000
30	57,417 ± 0,129 ^{bc}	-2,650 ± 0,030 ^{ab}	6,173 ± 0,032 ^{ab}	6,062 ± 1,111	54,250 ± 0,304 ^{bc}	-3,430 ± 0,040 ^{ab}	11,430 ± 0,105 ^{ab}	4,769 ± 0,649	49,270 ± 0,060 ^{bc}	-3,313 ± 0,065 ^{ab}	11,110 ± 0,044 ^{ab}	4,845 ± 0,695
60	56,347 ± 0,156 ^{bc}	-2,140 ± 0,040 ^{ab}	12,723 ± 0,038 ^a	6,365 ± 1,156	47,917 ± 0,075 ^{bc}	-3,280 ± 0,095 ^{ab}	11,450 ± 0,057 ^a	5,871 ± 0,888	58,237 ± 0,049 ^{bc}	0,523 ± 0,023 ^{ab}	1,925 ± 0,078 ^a	8,986 ± 0,864
90	57,243 ± 0,090 ^b	-2,127 ± 0,057 ^{bc}	14,390 ± 0,046 ^{ab}	8,154 ± 0,965	48,697 ± 0,050 ^b	-2,843 ± 0,047 ^{bc}	10,557 ± 0,103 ^{ab}	4,653 ± 0,912	61,677 ± 0,035 ^b	0,317 ± 0,031 ^{bc}	4,877 ± 0,068 ^{ab}	10,251 ± 1,295
120	54,630 ± 0,211 ^{bc}	-2,850 ± 0,066 ^{bcd}	15,673 ± 0,085 ^a	8,150 ± 0,534	59,833 ± 0,110 ^{bc}	-0,340 ± 0,036 ^{bcd}	2,480 ± 0,085 ^a	9,720 ± 1,117	63,560 ± 0,111 ^{bc}	0,497 ± 0,051 ^{bcd}	5,750 ± 0,078 ^a	11,832 ± 1,220
150	62,057 ± 0,015 ^{cd}	0,360 ± 0,026 ^{cd}	3,670 ± 0,056 ^a	11,062 ± 1,216	61,743 ± 0,076 ^{cd}	-0,447 ± 0,015 ^{cd}	3,027 ± 0,021 ^a	11,023 ± 1,216	64,113 ± 0,055 ^{cd}	0,603 ± 0,061 ^{cd}	5,340 ± 0,111 ^a	12,473 ± 1,289
180	61,160 ± 0,030 ^{bcd}	0,307 ± 0,015 ^{cde}	3,920 ± 0,030 ^a	10,146 ± 1,205	61,897 ± 0,060 ^{bcd}	0,900 ± 0,053 ^{cde}	3,483 ± 0,065	11,073 ± 1,212	65,427 ± 0,060 ^{bcd}	0,450 ± 0,020 ^{cde}	6,760 ± 0,092 ^a	13,673 ± 1,337
210	61,450 ± 0,125 ^{cd}	0,387 ± 0,021 ^{cde}	3,967 ± 0,025 ^a	10,396 ± 1,211	61,937 ± 0,045 ^{cd}	0,773 ± 0,032 ^{cde}	4,150 ± 0,098 ^a	10,814 ± 1,258	65,607 ± 0,075 ^{cd}	0,717 ± 0,055 ^{cde}	3,163 ± 0,065 ^a	14,515 ± 1,249
240	68,433 ± 0,067 ^{cd}	-0,173 ± 0,015 ^{cde}	6,837 ± 0,156 ^a	16,434 ± 1,364	63,970 ± 0,020 ^{cd}	0,443 ± 0,031 ^{cde}	5,830 ± 0,056 ^a	12,208 ± 1,334	65,800 ± 0,057 ^{cd}	0,640 ± 0,078 ^{cde}	6,433 ± 0,111 ^a	13,975 ± 1,300
270	68,643 ± 0,114 ^{cd}	0,307 ± 0,035 ^{de}	5,600 ± 0,171 ^{ab}	16,820 ± 1,433	63,537 ± 0,067 ^{cd}	0,363 ± 0,031 ^{de}	5,177 ± 0,060 ^{ab}	11,931 ± 1,360	65,743 ± 0,075 ^{cd}	0,530 ± 0,070 ^{de}	6,607 ± 0,071 ^{ab}	13,831 ± 1,387
300	68,453 ± 0,032 ^d	0,797 ± 0,023 ^e	7,890 ± 0,040 ^{ab}	16,456 ± 1,360	65,387 ± 0,080 ^d	2,783 ± 0,085 ^e	8,810 ± 0,060 ^{ab}	13,790 ± 1,385	66,250 ± 0,053 ^d	0,540 ± 0,044 ^e	4,543 ± 0,106 ^{ab}	14,718 ± 1,334

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 3.b).

Fuente: Este estudio

Tabla 10. 3 Parámetros y cambio de color en función del tiempo durante la fritura a 81 Kpa y diferentes temperaturas.

Tiempo (s)	Parámetros de color y ΔE para una presión de 81 Kpa											
	T= 120				T= 140				T= 160			
	L*	a*	b*	ΔE	L*	a*	b*	ΔE	L*	a*	b*	ΔE
0	52,077 ± 1,389 ^a	-0,763 ± 0,050 ^{ab}	8,277 ± 0,140 ^b	0,000 ± 0,000	52,077 ± 1,389 ^a	-0,763 ± 0,050 ^{ab}	8,277 ± 0,140 ^b	0,000 ± 0,000	52,077 ± 1,389 ^a	-0,763 ± 0,050 ^{ab}	8,277 ± 0,140 ^b	0,000 ± 0,000
30	68,360 ± 0,120 ^{bc}	-0,447 ± 0,035 ^{ab}	3,783 ± 0,179 ^{ab}	16,899 ± 1,352	69,633 ± 0,085 ^{bc}	-0,420 ± 0,030 ^{ab}	4,757 ± 0,075 ^{ab}	17,913 ± 1,308	67,570 ± 0,111 ^{bc}	-0,970 ± 0,098 ^{ab}	4,563 ± 0,095 ^{ab}	15,937 ± 1,246
60	67,077 ± 0,045 ^{bc}	-0,857 ± 0,023 ^{ab}	3,485 ± 0,064 ^a	15,769 ± 1,287	65,253 ± 0,097 ^{bc}	-0,553 ± 0,046 ^{ab}	4,260 ± 0,071 ^a	13,787 ± 1,361	66,860 ± 0,092 ^{bc}	-0,917 ± 0,045 ^{ab}	4,495 ± 0,064 ^a	15,260 ± 1,411
90	66,203 ± 0,150 ^b	-0,720 ± 0,062 ^{bc}	3,360 ± 0,092 ^{ab}	14,964 ± 1,430	66,757 ± 0,083 ^b	-0,413 ± 0,025 ^{bc}	4,823 ± 0,064 ^{ab}	15,089 ± 1,326	65,710 ± 0,070 ^b	-0,310 ± 0,040 ^{bc}	4,333 ± 0,051 ^{ab}	14,205 ± 1,320
120	65,133 ± 0,071 ^{bc}	-0,590 ± 0,040 ^{bcd}	4,240 ± 0,075 ^a	13,676 ± 1,255	62,357 ± 0,096 ^{bc}	-0,040 ± 0,010 ^{bcd}	3,453 ± 0,065 ^a	11,392 ± 1,151	66,247 ± 0,065 ^{bc}	0,837 ± 0,067 ^{bcd}	7,677 ± 0,085 ^a	14,275 ± 1,427
150	67,130 ± 0,085 ^{cd}	-0,627 ± 0,035 ^{cd}	4,237 ± 0,105 ^a	15,592 ± 1,308	69,173 ± 0,050 ^{cd}	-0,417 ± 0,035 ^{cd}	7,417 ± 0,084 ^a	17,123 ± 1,374	71,753 ± 0,097 ^{cd}	-0,580 ± 0,087 ^{cd}	6,203 ± 0,101 ^a	19,788 ± 1,384
180	68,663 ± 0,083 ^{bcd}	-0,427 ± 0,032 ^{cde}	4,673 ± 0,166 ^a	17,209 ± 1,361	68,860 ± 0,082 ^{bcd}	-0,140 ± 0,010 ^{cde}	7,097 ± 0,059 ^a	13,671 ± 1,281	67,270 ± 0,075 ^{bcd}	0,263 ± 0,025 ^{cde}	5,190 ± 0,096 ^a	16,593 ± 1,252
210	68,897 ± 0,059 ^{cd}	-0,860 ± 0,026 ^{cde}	5,223 ± 0,096 ^a	16,977 ± 1,439	65,680 ± 0,135 ^{cd}	-0,487 ± 0,021 ^{cde}	5,643 ± 0,083 ^a	14,828 ± 1,905	68,343 ± 0,083 ^{cd}	-0,383 ± 0,035 ^{cde}	9,657 ± 0,087 ^a	15,925 ± 1,650
240	63,330 ± 0,057 ^{cd}	-0,513 ± 0,025 ^{cde}	2,777 ± 0,051 ^a	12,587 ± 1,128	65,857 ± 0,095 ^{cd}	0,353 ± 0,025 ^{cde}	5,560 ± 0,130 ^a	14,092 ± 1,359	67,753 ± 0,105 ^{cd}	-0,547 ± 0,015 ^{cde}	6,123 ± 0,140 ^a	15,827 ± 1,455
270	61,907 ± 0,075 ^{cd}	-0,350 ± 0,020 ^{de}	2,433 ± 0,060 ^{ab}	11,459 ± 1,115	64,373 ± 0,096 ^{cd}	0,427 ± 0,035 ^{de}	5,867 ± 0,081 ^{ab}	12,590 ± 1,272	67,920 ± 0,050 ^{cd}	0,990 ± 0,020 ^{de}	10,553 ± 0,071 ^{ab}	16,103 ± 1,360
300	66,290 ± 0,087 ^d	-0,493 ± 0,035 ^e	5,380 ± 0,110 ^{ab}	14,513 ± 1,240	69,140 ± 0,075 ^d	0,293 ± 0,015 ^e	5,650 ± 0,082 ^{ab}	17,300 ± 1,336	63,850 ± 0,098 ^d	0,867 ± 0,081 ^e	6,870 ± 0,062 ^{ab}	11,972 ± 1,248

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 3.c).

Fuente: Este estudio

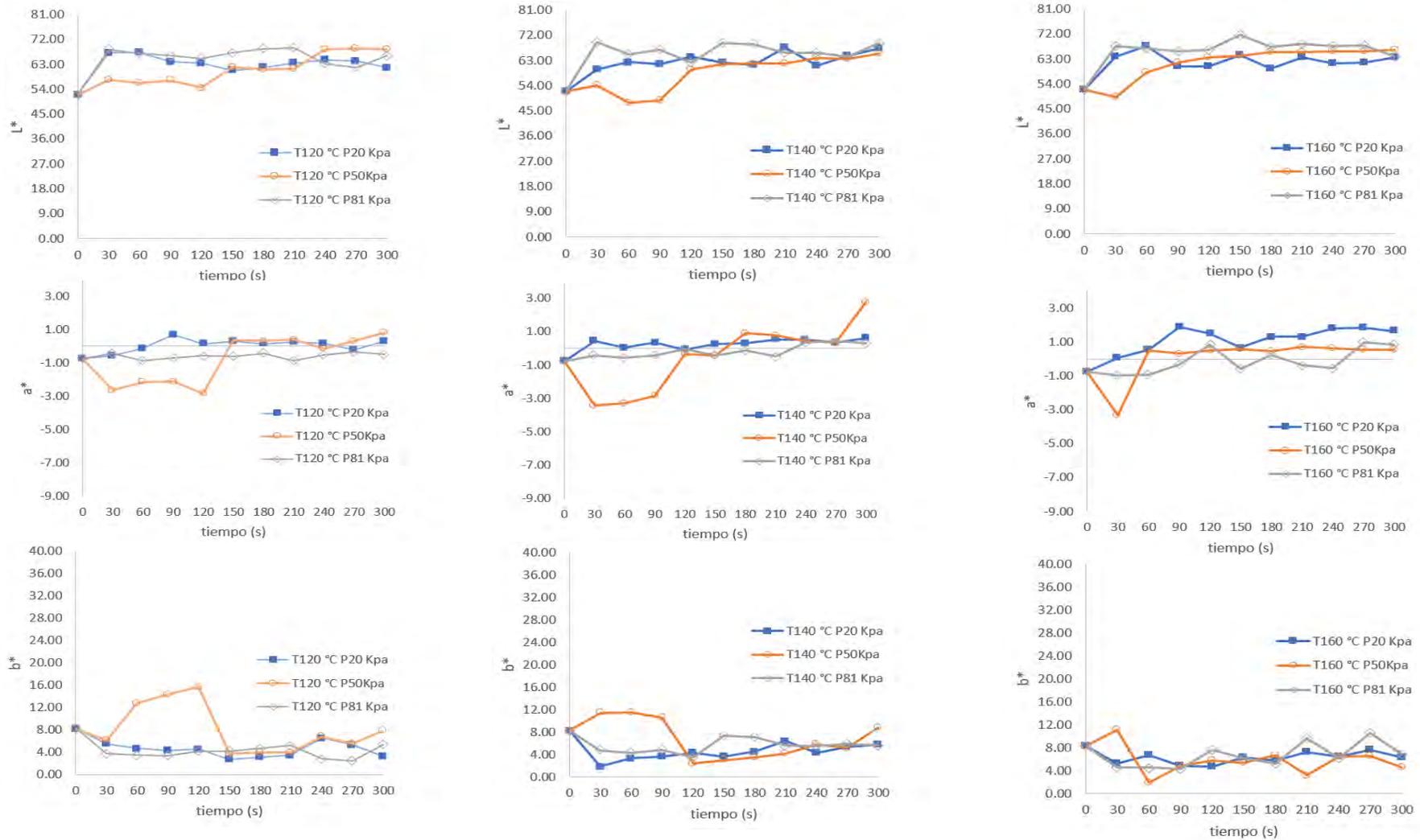


Figura 10. 1 Parámetros L^* , a^* y b^* durante la fritura a diferentes temperaturas y presiones de trabajo.

Fuente: Este estudio.

En las tablas 10.1, 10.2 y 10.3 se puede observar que los valores de ΔE se ven mayormente afectados cuando el producto fue sometido a presión atmosférica, caso contrario sucedió cuando se emplearon presiones subatmosféricas, obteniendo así valores de 15.643, 15.744 y 15.720 para una presión de 20 Kpa; 16.820, 13.790 y 14.718 para una presión de 50 Kpa y 16.977, 17.913 y 19.788 para una presión de 81 Kpa (temperaturas de 120, 140 y 160 °C, respectivamente).

Juan Carlos Lucas et al., (2013) aseguran que el cambio de color en la costra de alimentos sometidos a tratamientos térmicos se debe a reacciones químicas, tales como reacciones de caramelización, de pardeamiento no enzimáticas (reacción de Maillard) y cambios estructurales acelerados por las altas temperaturas del aceite de fritura, Que influyen en la coloración sabor y textura de los chips de papa.

Resultados similares se obtuvieron con un pasaboca de mango sometido a fritura convencional y vacío, donde se obtuvieron resultados de 30.73 y 19 respectivamente, para la variación de color ΔE (R. H. Villamizar, Quiceno, & Giraldo, 2011). En chips de papa se obtuvieron resultados de 12.1 y 25.5 para ΔE sometidos a fritura a vacío y convencional, respectivamente (Crosa et al., 2014).

Por otra parte, la figura 10.1 muestra las diferencias en los parámetros L^* , a^* y b^* para las diferentes temperaturas y presiones de trabajo. Los parámetros L^* y b^* obtuvieron valores positivos, esto relacionado con el color característico en chips de papa y debido a que el parámetro b^* representa el color amarillo y L^* la claridad de ese color. Con respecto a la presión se puede observar que no hay una diferencia marcada, sin embargo, el producto sometido a presiones subatmosféricas puede llegar a obtener las mismas características que un producto freído a presión atmosférica.

En esta investigación la temperatura no afecto el cambio de color en el periodo de tiempo empleado. Otras investigaciones demostraron que es necesario un periodo de tiempo mayor (0 -540 s), para poder evidenciar el cambio de color (Jibaja, 2010).

El análisis de varianza ANOVA indicó que la presión y el tiempo de fritura ejercieron un efecto significativo (p -Valor < 0.05 ; ver anexo 3.i) sobre el parámetro de color L^* , para a^* la presión, temperatura y tiempo de fritura ejercieron un efecto significativo (p -Valor < 0.05 ; ver anexo 3.ii), sin embargo, para b^* únicamente la presión ejerció un efecto significativo (p -Valor < 0.05 ; ver anexo 3.iii).

10.1.2 Perfil de textura

La variación en el cambio de dureza para rodajas de papa (*Solanum phureja*) variedad Ratona Morada durante la fritura a vacío, a presiones de 20, 50 y 81 Kpa y temperaturas de 120, 140 y 160 °C en función del tiempo se muestran en las tablas 10.4, 10.5 y 10.6.

La figura 10.2 muestra el parámetro dureza para todas las temperaturas y presiones empleadas en el proceso de fritura a vacío.

Tabla 10. 4 Determinación de dureza en función del tiempo durante la fritura a 20 Kpa y diferentes temperaturas.

Tiempo (s)	20 Kpa		
	Dureza (N)		
	T= 120	T= 140	T= 160
0	8.403 ± 0.562 ^d	8.403 ± 0.562 ^d	8.403 ± 0.562 ^d
30	1.513 ± 0.241 ^a	4.508 ± 0.726 ^a	8.476 ± 1.218 ^a
60	0.985 ± 0.138 ^a	2.828 ± 0.453 ^a	7.112 ± 0.766 ^a
90	1.949 ± 0.167 ^{ab}	6.637 ± 0.530 ^{ab}	4.566 ± 0.613 ^{ab}
120	5.648 ± 0.495 ^{bc}	6.526 ± 0.361 ^{bc}	5.773 ± 0.863 ^{bc}
150	4.531 ± 0.170 ^c	5.285 ± 0.516 ^c	9.554 ± 1.231 ^c
180	3.821 ± 0.648 ^{bc}	5.827 ± 0.598 ^{bc}	2.648 ± 0.050 ^{bc}
210	3.010 ± 0.180 ^c	4.835 ± 0.778 ^c	6.875 ± 0.802 ^c
240	4.579 ± 0.623 ^c	3.426 ± 0.737 ^c	4.253 ± 0.537 ^c
270	5.623 ± 0.273 ^c	4.473 ± 0.772 ^c	5.813 ± 0.800 ^c
300	6.636 ± 1.195 ^c	1.929 ± 0.155 ^c	4.873 ± 0.549 ^c

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 4.a).

Fuente: Este estudio

Tabla 10. 5 Determinación de dureza en función del tiempo durante la fritura a 50 Kpa y diferentes temperaturas.

Tiempo (s)	50 Kpa		
	Dureza (N)		
	T= 120	T= 140	T= 160
0	8.403 ± 0.562 ^d	8.403 ± 0.562 ^d	8.403 ± 0.562 ^d
30	1.786 ± 0.627 ^a	0.731 ± 0.106 ^a	0.976 ± 0.148 ^a
60	1.008 ± 0.071 ^a	1.966 ± 0.362 ^a	1.934 ± 0.289 ^a
90	0.628 ± 0.242 ^{ab}	1.182 ± 0.128 ^{ab}	4.290 ± 0.519 ^{ab}
120	3.422 ± 0.379 ^{bc}	6.759 ± 0.637 ^{bc}	3.599 ± 0.612 ^{bc}
150	6.617 ± 0.375 ^c	3.865 ± 0.152 ^c	4.884 ± 0.237 ^c
180	7.926 ± 0.975 ^{bc}	5.903 ± 0.607 ^{bc}	3.621 ± 0.090 ^{bc}
210	3.786 ± 0.590 ^c	7.530 ± 1.124 ^c	5.117 ± 0.961 ^c
240	6.132 ± 0.365 ^c	8.069 ± 1.048 ^c	4.255 ± 0.341 ^c
270	8.291 ± 0.294 ^c	7.514 ± 1.259 ^c	4.993 ± 0.622 ^c
300	7.875 ± 1.079 ^c	7.652 ± 1.197 ^c	2.762 ± 0.469 ^c

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 4.b).

Fuente: Este estudio

Tabla 10. 6 Determinación de dureza en función del tiempo durante la fritura a 81 Kpa y diferentes temperaturas.

Tiempo (s)	81 Kpa		
	Dureza (N)		
	T= 120	T= 140	T= 160
0	8.403 ± 0.562 ^d	8.403 ± 0.562 ^d	8.403 ± 0.562 ^d
30	0.599 ± 0.068 ^a	0.381 ± 0.059 ^a	0.231 ± 0.035 ^a
60	0.172 ± 0.025 ^a	0.344 ± 0.053 ^a	0.487 ± 0.073 ^a
90	0.140 ± 0.021 ^{ab}	3.511 ± 0.517 ^{ab}	0.700 ± 0.080 ^{ab}
120	0.126 ± 0.014 ^{bc}	1.784 ± 0.225 ^{bc}	1.644 ± 0.266 ^{bc}
150	0.348 ± 0.054 ^c	5.096 ± 0.542 ^c	3.426 ± 0.154 ^c
180	0.217 ± 0.025 ^{bc}	3.930 ± 0.346 ^{bc}	4.505 ± 0.435 ^{bc}
210	0.308 ± 0.050 ^c	5.305 ± 0.865 ^c	6.540 ± 0.208 ^c
240	0.393 ± 0.044 ^c	6.008 ± 0.881 ^c	4.028 ± 0.155 ^c
270	0.613 ± 0.069 ^c	4.699 ± 0.739 ^c	3.878 ± 0.638 ^c
300	0.307 ± 0.023 ^c	4.210 ± 0.449 ^c	5.750 ± 0.667 ^c

*Valores promedio (n = 3) ± desviación estándar. Letras no comunes implican diferencias entre promedios para una misma columna según método de LSD de Fisher a un 95% de confianza (anexo 4.c).

Fuente: Este estudio

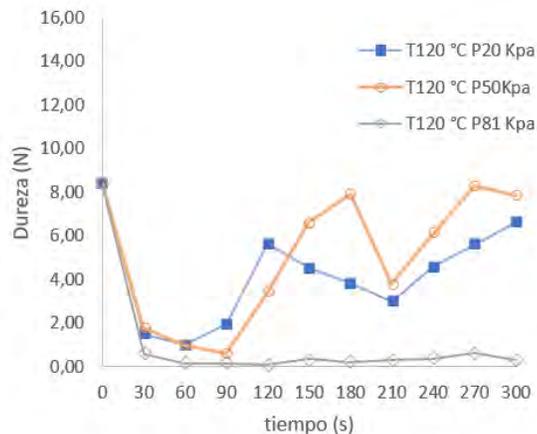


Figura 10. 2 Parámetro dureza durante la fritura a temperatura de 120 °C y presiones de trabajo.

Fuente: Este estudio

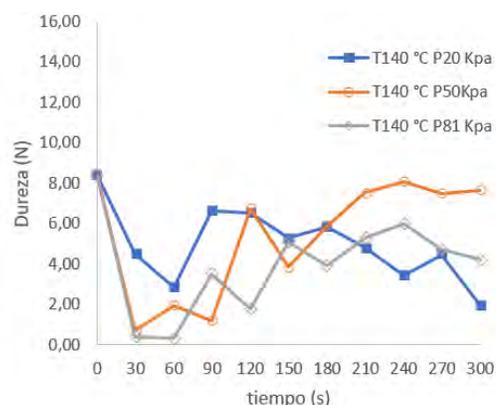


Figura 10. 3 Parámetro dureza durante la fritura a temperatura de 140 °C y presiones de trabajo.

Fuente: Este estudio

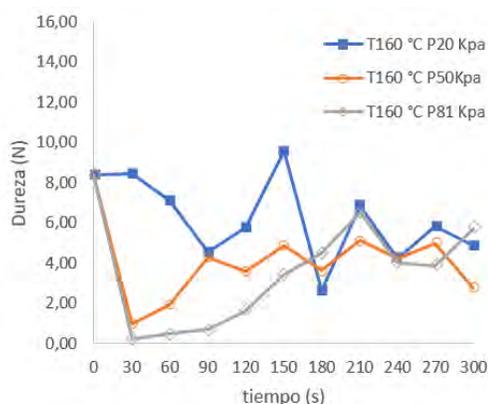


Figura 10. 4 Parámetro dureza durante la fritura a temperatura de 160 °C y presiones de trabajo.

Fuente: Este estudio.

En las tablas 10.4, 10.5 y 10.6 se puede observar de manera general que los valores de dureza (en todas las presiones) tiene un comportamiento creciente, ya que aumenta con el incremento de la temperatura. Obteniendo valores de 0.985, 1.929 y 2,648 N para una presión de 20 Kpa; 0.628, 0.731 y 0.976 N para una presión de 50 Kpa y 0.126, 0.344 y 0.231 para una presión de 81 Kpa (temperaturas de 120, 140 y 160 °C, respectivamente).

Así Pinto et al., (2017) observaron que la temperatura ejerce un efecto significativo con respecto a la fuerza necesaria para la deformación del alimento, ya que altas temperaturas generan cambios estructurales acelerados que dan lugar a la formación de la costra y reacciones como la gelatinización y caramelizarían de almidones, creando productos duros necesitando más fuerza para su deformación.

Por otra parte, las figuras 10.2, 10.3 y 10.4 muestran las diferencias en el parámetro dureza para las diferentes temperaturas y presiones. Para el caso de la temperatura de 120 °C (Figura 10.2) se observa que cuando el producto es sometido a presiones subatmosféricas adquiere características de textura que no puede obtener cuando se somete a presión atmosférica, esto debido a que en condiciones de vacío se disminuye el punto de ebullición del agua en el producto y por ende genera un rápido ingreso de aceite en un corto tiempo, logrando que el producto se cocine más rápido y obtenga un mayor grado dureza en la costra del alimento (Juan Carlos Lucas et al., 2013).

Para las temperaturas de 140 y 160 °C (figura 10.3 y 10.4) no se observa una diferencia marcada para el parámetro dureza con respecto al tiempo, sin embargo, para la presión de 20 Kpa se observa un mejor comportamiento de este parámetro, ya que es más homogéneo a lo largo de todo el proceso y no obtiene valores bajos.

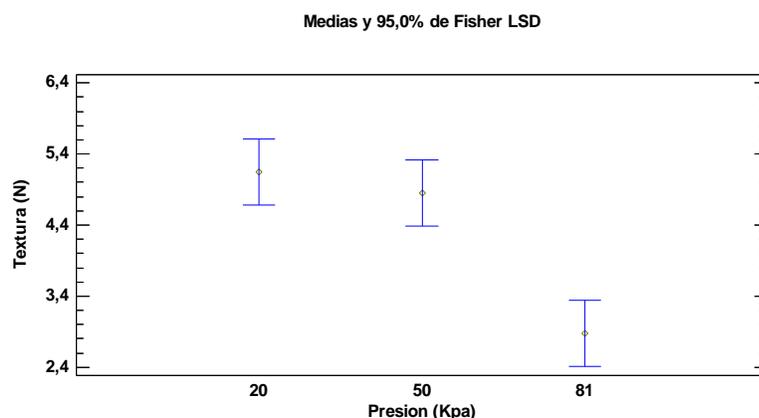


Figura 10. 5 Gráfico de medias para presión y textura.

Fuente: Este estudio

En figura 10.5 se puede observar la diferencia entre las medias de las presiones subatmosféricas y la presión atmosférica para el parámetro textura, confirmado así el efecto de la presión sobre este parámetro.

El análisis de varianza ANOVA indicó que la presión, temperatura y tiempo de fritura ejercieron un efecto significativo (p -Valor < 0.05; ver anexo11) sobre el parámetro dureza para la textura.

11. CONCLUSIONES

El color y la textura son dos características importantes que influyen a la hora de elegir un producto, mas aun en el caso de los chips. En esta investigación estos parámetros se ven significativamente afectados por las condiciones de presión, temperatura y tiempo durante el proceso, existiendo una diferencia notoria para presiones subatmosféricas y atmosférica.

Aunque los valores de color en chips de papa freídos a presiones subatmosféricas no superaron a los freídos a presión atmosférica, este parámetro se comporta adecuadamente para el proceso y si se compara con los valores de textura, se puede ver que son mucho más homogéneos y que se asimilan a las características esperadas.

12. RECOMENDACIONES

El proceso de fritura a vacío a demostrado ser un proceso optimo y con ventajas favorables a la hora de evaluar un alimento, sin embargo, es necesario realizar una optimización en el equipo, teniendo en cuenta que la mayoría que se encuentran en el mercado tienen implementado un sistema de centrifugado que actúa una vez se retira el producto del aceite, con lo cual se logra mayor eficiencia a la hora de eliminar el aceite residual.

Aunque en este trabajo se tocaron aspectos importantes asociados a fenómenos de transferencia de masa y calor, como lo son color y textura, es recomendable profundizar sobre estos, con modelos matemáticos que ayuden a predecir el comportamiento de una manera más profunda. Además, se podrían incluir pruebas sensoriales que ayuden a realizar una comparación adecuada de ambos procesos.

Un tema de importancia en la actualidad para productos fritos es el contenido de acrilamida presente en estos una vez culminen los procesos térmicos a altas temperaturas, ya que esta sustancia puede ser potencialmente cancerígena. por lo cual es recomendable realizar una cuantificación de esta sustancia con el fin de ofrecer a los consumidores alimentos más saludables, pero sin sacrificar la calidad organoléptica.

Complementar el estudio mediante la aplicación de pretratamientos previos al proceso de fritura, los cuales reduzcan aún más el contenido de aceite en el producto final.

Profundizar en el estudio de las condiciones óptimas de temperatura, presión (fritura al vacío) y tiempo para estandarizar el proceso de fritura, con el fin de obtener un producto frito comercial con valor agregado, con bajas necesidades de energía, tiempo y costos; y así, contribuir al desarrollo socioeconómico de la región.

De igual manera, se recomienda evaluar otras variedades de papa (*Solanum phureja*) nativa, en la elaboración de productos fritos; partiendo de este estudio como base para que los resultados de los nuevos trabajos expresen información diferente y novedosa y, permitan explotar aún más los recursos de papa nativa que posee el departamento de Nariño.

REFERENCIAS

- Aguilera, J. (1997). *Temas en tecnología de alimentos, Volumen 1*. (Editorial Instituto Politécnico Nacional, Ed.). México, México.
- Alvis, A., Villada, H. S., & Villada, D. C. (2008). Efecto de la temperatura y tiempo de fritura sobre las características sensoriales del ñame (*dioscorea alata*). *Informacion Tecnologica*, 19(5), 19–26. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.3958bit.07>
- Arévalo Herrera, A. O., & Rodríguez Molano, L. E. (2012). *Tecnologías de producción y transformación de papa criolla*. Bogotá D.C, Colombia.
- Banga, J., Balsa-Canto, E., Moles, C., & Alonso, A. (2003). Improving food processing using modern optimization methods. *Trends in Food Science & Technology*, 131–144.
- Banga, J., & Singh, P. (1994). Optimization of Air Drying of Foods. *Journal of Food Engineering*, 23, 189–211.
- Barrios, L., Osorio, O., & Cerón, A. (2015). Estudio de las cinéticas de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura de arveja (*Pisum sativum L.*) Study of the kinetics loss of water and oil absorption during the frying pea (*Pisum sativum L.*) Introducción La arveja (*Pisum sativum L.*). *Acta Agronómica*, 65(3), 1–16. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15446/acag.v65n3.49188>
- Bermúdez, A., Vélez, C., & Arrázola, G. (2010). Efecto de las condiciones de freído sobre la pérdida de humedad y ganancia de aceite en trozos de ñame (*Dioscorea alata*). *Ingeniería E Investigación*, 30(1), 41–44.
- Coronel, M. (2014). Fritura al Vacío : Un enfoque nutricional (Vacuum Frying : A nutritional approach), 15–24.
- Costa, R., & Oliveira, F. (1999). Modelling the kinetics of water loss during potato frying with a compartmental dynamic model. *Journal of Food Engineering*, (41), 177.
- Crosa, M., Elichalt, M., Skerl, V., Cadenazzi, M., Olazabal, L., Silva, R., ... Estellano, G. (2014). Chips de papa , la fritura en vacío y beneficios para la salud Potatoes chips , vacuum frying and health profits. *Laboratorio Tecnológico de Uruguay*, 9, 70–74.
- Cueto, C., García, D., & Cepeda, J. (2007). Predibal 1.0: Herramienta informática para la predicción de la población de dos bacterias ácido lácticas, aisladas del suero costeño. *Alimentos Ciencia E Ingeniería*, 16(1), 52.
- Demirkol, E., Ferruh, & Koray. (2006). Analysis of mass transfer parameters (changes in mass flux, difusión coefficient and mass transfer coefficient during baking of cookies. *Journal of Food Engineering*, 72, 364–371.
- Diaz Willian, Romero Pedro, Castelanos Francisco, Rodriguez Jhonatan, Gutierrez Luis, R. S. (2016). Efecto de la presión a vacío en la fritura por inmersión de hamburguesas. *Agronomía Colombiana*,

- 34(1), 371–373. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n1supl.58134>
- Dobarganes, C., Márquez-Ruiz, G., & Velasco, J. (2000). Interactions between fat and food during deep-frying. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 102, 521.
- Dueik, V., Robert, P., & Bouchon, P. (2010). Vacuum frying reduces oil uptake and improves the quality parameters of carrot crisps. *Food Chemistry*, 119(3), 1143–1149. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.08.027>
- Duymovich, C., Acheme, R., Sesini, S., & Mazziotta, D. (2005). Programa de Control de Calidad Instrumental Espectrofotómetros y Fotocolorímetros Guía práctica de actualización Control de la exactitud de la longitud de onda NO APTO PARA FOTOCOLORÍMETROS NI AUTOANALIZADORES. *Acta Bioquím Clín Latinoam*, 39(4), 529–39.
- Espinal, C. F., Martínez, H. J., Pinzón, N., & Barrios, C. (2005). *La cadena de la papa en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinamica 1991-2005*. Min. Agricultura y Desarrollo Rural, Obs. Agrocadenas Colombia. Bogotá D.C, Colombia.
- Esquivel, P., Brenes, A., & Alfaro, I. (2009). Propiedades Físico-Químicas Y Parámetros De Calidad, 33(1), 77–89.
- FAO. (2009). (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). Año Internacional de la Papa 2008. Nueva luz sobre un tesoro enterrado., Roma.
- Farkas, B., Singh, R., & Rumsey, T. (1996). Modeling heat and mass transfer in immersion frying. I. Model Development. *Journal of Food Engineering*, 29, 211.
- Fellows, P. (1998). *Food processing technology: Principles and practice* (Second Edi). New York, USA.
- Figuerola N., D., Rosas L., D., & Torres M., F. (2012). Comercialización de papa de las variedades diacolo Capiro, parda pastusa Solanum tuberosum L. y amarilla Solanum phureja, en tres corregimientos del municipio de Pasto. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 29(1), 16–28.
- Gamble, M., Rice, P., & Selman, J. (1987). Relationship between oil uptake and moisture loss during frying of potato slices from c.v. Record U.K. tubers. *Journal of Food Science Technology*, 22, 233.
- Garayo, J., & Moreira, R. (2002). Vacuum frying of potato chips. *Journal of Food Engineering*, 55(2), 181–191. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00062-6](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00062-6)
- Ghislain, M., Andrade, D., Rodríguez, F., Hijmans, R., & Spooner, D. (2006). Genetic analysis of the cultivated potato Solanum tuberosum L. Phureja Group using RAPDs and nuclear SSRs. *Theoretical and Applied Genetics*, 113, 1515–1527.
- Gómez, A. (2014). *Análisis de la cadena productiva de la papa criolla en Colombia (tesis de grado en Administrador de Empresas Agropecuarias)*. Universidad de la Salle, Bogotá D.C, Colombia.
- Gómez, M. (2008). *La papa, su comercialización y el caso especial frente a la comunidad de Pasquilla (tesis de grado en Especialista en Gerencia Social)*. Escuela superior de administración pública,

Bogotá D.C, Colombia.

- Gómez, S. (2012). *Efecto de las condiciones de fritura a vacío en el procesado de chips de kiwi (Tesis de Master en Ingeniería de Alimentos)*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Granados, C., Acevedo, D., Cabeza, A., & Lozano, A. (2014). Análisis de perfil de textura en plátanos Pelipita, Hartón y Topocho. *Informacion Tecnologica*, 25(5), 35–40. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000500006>
- Hernandez, N., & Suarez, J. (2009). *Caracterización de accesiones de Solanum phureja procedentes del banco de germoplasma vegetal que administra Corpoica por sus caracteres morfológicos, agronómicos e industriales (tesis de grado en Ingeniería de Alimentos)*. Universidad de la Salle, Bogotá D.C, Colombia.
- Himmelblau, D., & Bischoff, K. (1992). *Análisis y simulación de procesos*. (Editorial Reverté S.A., Ed.). Barcelona, España.
- Jibaja, H. (2010). *Modelado de la cinética de absorción de aceite durante el proceso de fritura al vacío de hojuelas de tomate de árbol (solanum betaceum cav.), (tesis de grado para Ingeniero Agroindustrial)*. Escuela Politécnica Nacional, IQuito, Ecuador.
- Juan Carlos Lucas, A., Víctor Dumar Quintero, C., Leal, J. F. V., & José Daniel Mosquera, A. (2013). Evaluación de los parámetros de calidad de chips en relación con diferentes variedades de plátano (Musa paradisiaca L.). *Revista Lasallista de Investigacion*, 9(2), 65–74. <https://doi.org/1794-4449>
- Kozempel, M., Tomasula, P., & Craig, J. (1991). Correlation of moisture and oil concentration in french fries. *Lebensm-Wiss.u.- Technol.*, 24(5), 445–448.
- Krokida, M. K., Oreopoulou, V., & Maroulis, Z. B. (2000). Water loss and oil uptake as a function of frying time. *Journal of Food Engineering*, 44(1), 39–46.
- Lamberg, I. (1990). Transport phenomena in potato tissues., Dissertation, Departments of Food Engineering, Lund University. Lund, Sweden.
- Ligarreto, G., & Suárez, M. (2003). Evaluación del potencial de los recursos genéticos de papa criolla (solanum phureja) por calidad industrial. *Agronomía Colombiana*, 21(1–3), 83–94.
- Lopez, A; Di Sarli, A. . (2016). EL MODELO CIELAB , LAS FÓRMULAS DE DIFERENCIA DE COLOR HORMIGONES COLOREADOS CIELAB MODEL , COLOR-DIFFERENCE FORMULAS AND USE OF THE EUROPEAN EN 12878 STANDARD IN COLORED MORTARS AND CONCRETES. *Ciencia Y Tecnologia de Los Materiales*.
- MADR. (2011). (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural). Acuerdo de competitividad de la cadena agroalimentaria de la papa en Colombia.
- Madroñero, I. C., Rosero M., J. E., Rodríguez M., L. E., Navia E., F., & Benavides, C. A. (2013). Caracterización morfoagronómica de genotipos promisorios de papa criolla (Solanum tuberosum L.

- Grupo andigenum) en Nariño. *Temas Agrarios*, 18(2), 50–66.
- Martin, G. a, Bonilla, D. S., Ligarreto, G. a., & Fajardo, D. a. (2000). MORFOLOGICA DE 59 CULTIVARES DE PAPA CRIOLLA (*Solanum phureja* Juz . et Buk .). *Agronomía Colombiana*, 17, 49–60.
- Math, R., Velu, V., Nagender, A., & Rao, D. G. (2004). Effect of frying conditions on moisture, fat, and density of potatoes. *Journal of Food Engineering*, 64(4), 429–434.
- Ministerio del trabajo. (2011). Programa Nacional de Asistencia Técnica para el Fortalecimiento de las Políticas de Empleo , Emprendimiento y Generación de Ingresos en el ámbito Regional y Local DIAGNÓSTICO VILLAVICENCIO, 1–137.
- Moreira, R. (2001). *Deep-Fat Frying of Foods*. In: J. Irudayaraj. *Food Processing Operations Modeling*. (Marcel Dekker Inc., Ed.). New York, USA.
- Moreira, R., & Bakker-Arkem, F. (1989). Moisture desorption model for nonpareil almonds. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 42, 123–133.
- Moreira, R., Palau, J., & Sun, X. (1995). Deep-fat frying of tortilla chips: An engineering approach. *Food Technology*, 146–150.
- Moyano, P., & Pedreschi, F. (2006). Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: Effect of pre-treatments. *Food Science and Technology*, 39, 285.
- Mulet, A. (1994). Drying modelling and Water Diffusivity in Carrots and Potatoes. *Journal of Food Engineering*, (22), 329–348.
- Ortega, F. a, & Montes, E. J. (2014). Parámetros cinéticos de transferencia de masa durante el freído por inmersión de rodajas de yuca (*Manihot esculenta* Crantz). *Ingeniería Y Competitividad*, 255(2), 247–255.
- Osorio, O., Cerón, A., Rodríguez, G., Castellanos, F., & Chávez, A. (2010). Cinética de absorción de aceite en chips de arveja (*Pisum sativum* L.) en condiciones de fritura convencional y a vacío.
- Osorio, O., Rodríguez, G., Castellanos, F., & Chávez, A. (2010). Cinética de Pérdida de Agua en Chips de Arveja (*Pisum sativum* L.) en Condiciones de Fritura Convencional y a Vacío.
- Piñeros, C. (2009). Recopilación de la investigación del sistema productivo papa criolla. *Fedepapa*, 152.
- Puno, gobierno regional. (2011). *manual tecnicas de manejo, seleccion y clasificacion de papas nativas*.
- Ramírez Suárez, L. M., Zárate Polanco, L. M., & Otálora Santamaría, N. A. (2011). *Caracterización de almidón nativo extraído de clones promisorios de papa criolla (Solanum phureja) para su aplicación en un derivado cárnico*. Bogotá D.C, Colombia.
- Rimac, S., Lelas, V., Rade, D., & Simundié, B. (2004). Decreasing of oil absorption in potato strips during deep-fat frying. *Journal of Food Engineering*, (64), 237.
- Rivera, J. E., Herrera, A., & Rodríguez, L. E. (2003). Procesamiento de papa criolla precocida y congelada

- mediante la técnica de congelación individual (IQF), en seis genotipos promisorios de papa criolla (*Solanum phureja*). *Agronomía Colombiana*, 21(1–2), 95–101.
- Rodríguez, L., Ñustez, C., & Estrada, N. (2009). Criolla Latina, Criolla Paisa y Criolla Colombia, nuevos cultivares de papa criolla para el departamento de Antioquia (Colombia). *Agronomía Colombiana*, 27(3), 289–303.
- Rozo, D. R., & Ramírez, L. N. (2011). La agroindustria de la papa criolla en Colombia. Situación actual y retos para su desarrollo. *Gestión Y Sociedad*, 4(2), 17–30.
- Sablany, S., Datta, A., Rahman, M., & Mujumdar, A. (2006). *Handbook of Food and Bioprocess Modeling Techniques*. (Editorial Taylor & Francis Group, Ed.). Boca Raton, London.
- Saguy, I., & Dana, D. (2003). Integrated approach to deep fat frying: engineering, nutrition, health and consumer aspects. *Journal of Food Engineering*, (56), 143.
- Sahin, S., Sastry, S. K., & Bayindirli, L. (1999). Heat transfer during frying of potato slices. *Lebensmittel. Wissenschaft Und Technologie*, (32), 19–24.
- Santamaría Galindo, M., Montañez Gómez, J., & Sánchez Polo, R. R. (2010). Evaluación de la producción limpia de papa criolla (*Solanum phureja*) en Madrid, Cundinamarca. *Revista Inventum*, (9), 8–12.
- Singh, R. P. (2000). Moving Boundaries in Food Engineering. *Food Technology. Food Technology*, 54(2), 44–53.
- Sosa-Morales, M. E., Orzuna-Espiritu, R., & Vélez-Ruiz, J. F. (2006). Mass, thermal and quality aspects of deep-fat frying of pork meat. *Journal of Food Engineering*, 77(3), 731–738.
- Stier, R. (2004). Frying as a science - An introduction. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 106, 715.
- Troncoso, E., & Pedreschi, F. (2009). Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices, (July). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.01.008>
- Vélez, R. J. F., & Sosa-Morales, M. E. (2003). Heat and mass transfer during the frying process of donuts, by CRC Press LLC.
- Villamizar, R. H., Quiceno, M. C., & Giraldo, G. A. (2011). COMPARACIÓN DE LA FRITURA AL VACÍO Y ATMOSFÉRICA EN LA OBTENCIÓN DE PASABOCAS DE MANGO (*Manguifera indica* L.). *Temas Agrarios*, 16 (1), 64–74.
- Villamizar, R., Quiceno, M., & Germán, G. (2016). Valoración fisicoquímica y sensorial de pasabocas de plátano (*AAB*, *Musa paradisiaca* sp.) en fritura al vacío Physicochemical and sensory valuation of plantain snacks (*AAB*, *Musa paradisiaca* sp.) in vacuum frying, 34, 1272–1275. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n1supl.58411>
- Villamizar, R., Quiceno, M., & Giraldo, G. (2011). Comparación de la fritura al vacío y atmosférica en la obtención de pasabocas de mango (*Manguifera indica* l.). *Temas Agrarios*, 16(1), 64–74.

- Villamizar V, R. H., Quiceno G, M. C., & Giraldo G, G. A. (2012). Efecto del proceso de fritura al vacío sobre la calidad de un pasabocas de mango (*Manguifera indica* L.) = Effect of vacuum frying process on the quality of a snack of mango (*Manguifera indica* L.). *Acta Agronómica*, 61(1), 40–51.
Retrieved from
http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/32458/40362
- Vitrac, O., Trystram, G., & Raoult-Wack, A. L. (2000). Deep-fat frying of food: heat and mass transfer, transformations and reactions inside the frying material. *European Journal of Lipid Science and Technology*, (102), 529–538.
- Yamsaengsung, R., & Moreira, R. (2002). Modeling the transport phenomena and structural changes during deep fat frying Part II. Model solution & validation. *Journal of Food Engineering*, 53, 1–10.
- Yildiz, A. T., Palazoglu, K., & Erdogdu, F. (2007). Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 11–17.

ANEXOS

ANEXO 1 DATOS EXPERIMENTALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CINÉTICA DE PÉRDIDA DE AGUA

a) Presión 20 Kpa

Tabla 1. 1 Datos obtenidos para determinar el contenido de agua en base seca a temperatura de 120 °C

t	CORRIDAS	P1	X	\bar{X}	σ
0	1	75,300	3,0486	3,0449	0,2581
	2	73,580	2,7850		
	3	76,750	3,3011		
30	1	54,580	1,2017	1,2398	0,0622
	2	54,674	1,2062		
	3	56,740	1,3116		
60	1	42,170	0,7292	0,7012	0,0268
	2	40,330	0,6759		
	3	41,120	0,6984		
90	1	36,480	0,5743	0,5154	0,0689
	2	30,540	0,4397		
	3	34,730	0,5321		
120	1	27,180	0,3732	0,3583	0,0435
	2	23,620	0,3092		
	3	28,180	0,3924		
150	1	18,740	0,2306	0,2299	0,0936
	2	24,420	0,3231		
	3	11,960	0,1358		
180	1	12,86	0,1476	0,1961	0,0458
	2	19,27	0,2387		
	3	16,81	0,2021		
210	1	6,94	0,0746	0,1228	0,0597
	2	9,43	0,1041		
	3	15,937	0,1896		
240	1	7,94	0,0862	0,1157	0,0299
	2	10,3	0,1148		
	3	12,74	0,1460		
270	1	9,35	0,1031	0,0841	0,0225
	2	8,25	0,0899		
	3	5,6	0,0593		
300	1	3,61	0,0375	0,0757	0,0360
	2	7,46	0,0806		
	3	9,83	0,1090		

Tabla 1. 2 Datos obtenidos para determinar el contenido de agua en base seca a temperatura de 140 °C

t	CORRIDAS	P1	X	\bar{X}	σ
0	1	75,300	3,0486	3,0449	0,2581
	2	73,580	2,7850		
	3	76,750	3,3011		
30	1	44,520	0,8025	0,7831	0,1089
	2	39,970	0,6658		
	3	46,840	0,8811		
60	1	25,780	0,3473	0,3261	0,0704
	2	27,720	0,3835		
	3	19,840	0,2475		
90	1	22,800	0,2953	0,2595	0,1065
	2	12,260	0,1397		
	3	25,570	0,3435		
120	1	18,220	0,2228	0,1727	0,0495
	2	14,640	0,1715		
	3	11,020	0,1238		
150	1	9,850	0,1093	0,1052	0,0267
	2	11,480	0,1297		
	3	7,130	0,0768		
180	1	3,32	0,0343	0,0651	0,0277
	2	8,08	0,0879		
	3	6,81	0,0731		
210	1	4,81	0,0505	0,0593	0,0206
	2	7,65	0,0828		
	3	4,26	0,0445		
240	1	6,72	0,0720	0,0587	0,0246
	2	6,86	0,0737		
	3	2,94	0,0303		
270	1	2,98	0,0307	0,0544	0,0225
	2	5,4	0,0571		
	3	7,01	0,0754		
300	1	2,38	0,0244	0,0539	0,0357
	2	4,18	0,0436		
	3	8,56	0,0936		

t = tiempo (s); P1 = contenido de agua en base húmeda (%); X = contenido de agua en base seca (g agua/ g sólido seco); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de \bar{X} .

Fuente: Este estudio

Tabla 1. 3 Datos obtenidos para determinar el contenido de agua en base seca a temperatura de 160 °C

t	CORRIDAS	P1	X	\bar{X}	σ
0	1	75,300	3,0486	3,0449	0,2581
	2	73,580	2,7850		
	3	76,750	3,3011		
30	1	37,900	0,6103	0,6413	0,0483
	2	38,140	0,6166		
	3	41,070	0,6969		
60	1	17,030	0,2053	0,1627	0,0574
	2	15,650	0,1855		
	3	8,880	0,0975		
90	1	9,980	0,1109	0,0808	0,0269
	2	5,590	0,0592		
	3	6,740	0,0723		
120	1	4,610	0,0483	0,0592	0,0147
	2	5,060	0,0533		
	3	7,060	0,0760		
150	1	4,080	0,0425	0,0588	0,0189
	2	5,160	0,0544		
	3	7,370	0,0796		
180	1	3,82	0,0397	0,0554	0,0215
	2	4,44	0,0465		
	3	7,4	0,0799		
210	1	3,95	0,0411	0,0548	0,0204
	2	4,3	0,0449		
	3	7,26	0,0783		
240	1	4,55	0,0477	0,0539	0,0131
	2	6,45	0,0689		
	3	4,32	0,0452		
270	1	6,35	0,0678	0,0519	0,0141
	2	4,45	0,0466		
	3	3,96	0,0412		
300	1	3,16	0,0326	0,0317	0,0088
	2	3,84	0,0399		
	3	2,2	0,0225		

t = tiempo (s); P1 = contenido de agua en base húmeda (%); X = contenido de agua en base seca (g agua/ g sólido seco); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de \bar{X} .
 Fuente: Este estudio

a) **Presión 50 Kpa**

Tabla 1. 4 Datos obtenidos para determinar el contenido de agua en base seca a temperatura de 120 °C

t	CORRIDAS	P1	X	\bar{X}	σ
0	1	75,300	3,0486	3,0449	0,2581
	2	73,580	2,7850		
	3	76,750	3,3011		
30	1	58,800	1,4272	1,3246	0,1247
	2	54,250	1,1858		
	3	57,640	1,3607		
60	1	37,570	0,6018	0,6604	0,0581
	2	39,810	0,6614		
	3	41,790	0,7179		
90	1	28,660	0,4017	0,4198	0,0732
	2	26,330	0,3574		
	3	33,350	0,5004		
120	1	16,570	0,1986	0,2027	0,0592
	2	20,870	0,2637		
	3	12,710	0,1456		
150	1	12,500	0,1429	0,1486	0,0231
	2	14,820	0,1740		
	3	11,420	0,1289		
180	1	11,44	0,1292	0,1119	0,0165
	2	8,79	0,0964		
	3	9,91	0,1100		
210	1	4,22	0,0441	0,0645	0,0203
	2	6,09	0,0648		
	3	7,81	0,0847		
240	1	9,06	0,0996	0,0647	0,0359
	2	2,72	0,0280		
	3	6,24	0,0666		
270	1	5,83	0,0619	0,0649	0,0150
	2	7,51	0,0812		
	3	4,91	0,0516		
300	1	6,47	0,0692	0,0511	0,0160
	2	4,32	0,0452		
	3	3,74	0,0389		

t = tiempo (s); P1 = contenido de agua en base húmeda (%); X = contenido de agua en base seca (g agua/ g sólido seco); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de \bar{X} .

Fuente: Este estudio

Tabla 1. 5 Datos obtenidos para determinar el contenido de agua en base seca para una presión de 50 Kpa y temperatura de 140 °C

t	CORRIDAS	P1	X	\bar{X}	σ
0	1	75,300	3,0486	3,0449	0,2581
	2	73,580	2,7850		
	3	76,750	3,3011		
30	1	38,310	0,6210	0,7248	0,0942
	2	42,800	0,7483		
	3	44,600	0,8051		
60	1	20,020	0,2503	0,2373	0,0214
	2	19,930	0,2489		
	3	17,530	0,2126		
90	1	15,490	0,1833	0,1896	0,0646
	2	11,380	0,1284		
	3	20,460	0,2572		
120	1	11,310	0,1275	0,1827	0,0497
	2	16,430	0,1966		
	3	18,290	0,2238		
150	1	12,270	0,1399	0,1566	0,0191
	2	13,230	0,1525		
	3	15,070	0,1774		
180	1	15,16	0,1787	0,1480	0,0276
	2	11,12	0,1251		
	3	12,3	0,1403		
210	1	12,16	0,1384	0,1066	0,0276
	2	8,35	0,0911		
	3	8,28	0,0903		
240	1	10,79	0,1210	0,0846	0,0330
	2	5,35	0,0565		
	3	7,08	0,0762		
270	1	6,77	0,0726	0,0739	0,0289
	2	4,36	0,0456		
	3	9,37	0,1034		
300	1	2,33	0,0239	0,0215	0,0051
	2	2,45	0,0251		
	3	1,54	0,0156		

t = tiempo (s); P1 = contenido de agua en base húmeda (%); X = contenido de agua en base seca (g agua/ g sólido seco); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de \bar{X} .

Fuente: Este estudio

Tabla 1. 6 Datos obtenidos para determinar el contenido de agua en base seca a temperatura de 160 °C

t	CORRIDAS	P1	X	\bar{X}	σ
0	1	75,300	3,0486	3,0449	0,2581
	2	73,580	2,7850		
	3	76,750	3,3011		
30	1	26,500	0,3605	0,3850	0,0294
	2	29,460	0,4176		
	3	27,370	0,3768		
60	1	11,310	0,1275	0,1095	0,0198
	2	8,110	0,0883		
	3	10,140	0,1128		
90	1	6,940	0,0746	0,0853	0,0135
	2	7,470	0,0807		
	3	9,130	0,1005		
120	1	3,330	0,0344	0,0529	0,0171
	2	6,390	0,0683		
	3	5,290	0,0559		
150	1	3,000	0,0309	0,0489	0,0179
	2	6,260	0,0668		
	3	4,660	0,0489		
180	1	5,7	0,0604	0,0474	0,0119
	2	3,57	0,0370		
	3	4,29	0,0448		
210	1	4,98	0,0524	0,0467	0,0072
	2	3,72	0,0386		
	3	4,68	0,0491		
240	1	4,45	0,0466	0,0429	0,0043
	2	3,68	0,0382		
	3	4,21	0,0440		
270	1	3,07	0,0317	0,0391	0,0103
	2	3,36	0,0348		
	3	4,84	0,0509		
300	1	2,5	0,0256	0,0257	0,0005
	2	2,56	0,0263		
	3	2,47	0,0253		

t = tiempo (s); P1 = contenido de agua en base húmeda (%); X = contenido de agua en base seca (g agua/ g sólido seco); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de \bar{X} .

Fuente: Este estudio

b) Presión 81 Kpa
Tabla 1. 7 Datos obtenidos para determinar el contenido de agua en base seca a temperatura de 120 °C

t	CORRIDAS	P1	X	\bar{X}	σ
0	1	75,300	3,0486	3,0449	0,2581
	2	73,580	2,7850		
	3	76,750	3,3011		
30	1	69,490	2,2776	1,9543	0,2921
	2	65,230	1,8760		
	3	63,090	1,7093		
60	1	57,360	1,3452	1,2169	0,1185
	2	54,420	1,1939		
	3	52,640	1,1115		
90	1	50,480	1,0194	0,9489	0,0731
	2	48,820	0,9539		
	3	46,620	0,8734		
120	1	37,160	0,5913	0,7452	0,1354
	2	44,390	0,7982		
	3	45,830	0,8460		
150	1	37,570	0,6018	0,6180	0,1200
	2	33,640	0,5069		
	3	42,700	0,7452		
180	1	30,66	0,4422	0,4900	0,0592
	2	32,05	0,4717		
	3	35,74	0,5562		
210	1	27,7	0,3831	0,4454	0,0858
	2	35,2	0,5432		
	3	29,07	0,4098		
240	1	32,4	0,4793	0,4182	0,0646
	2	29,81	0,4247		
	3	25,96	0,3506		
270	1	22,79	0,2952	0,4149	0,1329
	2	35,81	0,5579		
	3	28,14	0,3916		
300	1	28,9	0,4065	0,3880	0,0216
	2	26,7	0,3643		
	3	28,22	0,3931		

t = tiempo (s); P1 = contenido de agua en base húmeda (%); X = contenido de agua en base seca (g agua/ g sólido seco); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de \bar{X} .

Fuente: Este estudio

Tabla 1. 8 Datos obtenidos para determinar el contenido de agua en base seca a temperatura de 140 °C

t	CORRIDAS	P1	X	\bar{X}	σ
0	1	75,300	3,0486	3,0449	0,2581
	2	73,580	2,7850		
	3	76,750	3,3011		
30	1	58,910	1,4337	1,4123	0,0578
	2	57,390	1,3469		
	3	59,290	1,4564		
60	1	44,450	0,8002	0,7830	0,1001
	2	40,310	0,6753		
	3	46,620	0,8734		
90	1	34,260	0,5211	0,5402	0,0431
	2	33,770	0,5099		
	3	37,090	0,5896		
120	1	25,840	0,3484	0,3906	0,0376
	2	29,600	0,4205		
	3	28,720	0,4029		
150	1	23,930	0,3146	0,2792	0,0344
	2	21,700	0,2771		
	3	19,730	0,2458		
180	1	11,61	0,1313	0,1346	0,0368
	2	14,74	0,1729		
	3	9,05	0,0995		
210	1	4,64	0,0487	0,0531	0,0041
	2	5,12	0,0540		
	3	5,37	0,0567		
240	1	3,67	0,0381	0,0364	0,0091
	2	4,26	0,0445		
	3	2,59	0,0266		
270	1	2,55	0,0262	0,0374	0,0107
	2	4,54	0,0476		
	3	3,7	0,0384		
300	1	2,55	0,0262	0,0329	0,0059
	2	3,59	0,0372		
	3	3,4	0,0352		

t = tiempo (s); P1 = contenido de agua en base húmeda (%); X = contenido de agua en base seca (g agua/ g sólido seco); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de \bar{X} .

Fuente: Este estudio

Tabla 1. 9 Datos obtenidos para determinar el contenido de agua en base seca a temperatura de 160 °C

t	CORRIDAS	P1	X	\bar{X}	σ
0	1	75,300	3,0486	3,0449	0,2581
	2	73,580	2,7850		
	3	76,750	3,3011		
30	1	50,160	1,0064	1,0254	0,0586
	2	49,460	0,9786		
	3	52,180	1,0912		
60	1	27,210	0,3738	0,4085	0,0341
	2	30,650	0,4420		
	3	29,070	0,4098		
90	1	17,590	0,2134	0,1811	0,0293
	2	13,530	0,1565		
	3	14,770	0,1733		
120	1	11,320	0,1276	0,1499	0,0251
	2	12,650	0,1448		
	3	15,050	0,1772		
150	1	10,770	0,1207	0,1039	0,0198
	2	9,820	0,1089		
	3	7,580	0,0820		
180	1	8,22	0,0896	0,0701	0,0175
	2	6,12	0,0652		
	3	5,27	0,0556		
210	1	4,55	0,0477	0,0392	0,0091
	2	3,89	0,0405		
	3	2,87	0,0295		
240	1	2,99	0,0308	0,0301	0,0007
	2	2,85	0,0293		
	3	2,92	0,0301		
270	1	3,06	0,0316	0,0325	0,0010
	2	3,24	0,0335		
	3	3,14	0,0324		
300	1	1,26	0,0128	0,0241	0,0098
	2	2,86	0,0294		
	3	2,92	0,0301		



t = tiempo (s); P1 = contenido de agua en base húmeda (%); X = contenido de agua en base seca (g agua/ g sólido seco); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de \bar{X} .
 Fuente: Este estudio

ANEXO 2 DATOS EXPERIMENTALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CINÉTICA DE ABSORCIÓN DE ACEITE

a. Presión 20 Kpa

Tabla 2.1. Datos obtenidos para determinar el contenido de aceite en base seca a temperatura de 120 °C

t (s)	CORRIDA	P1	P2	P3	Y	\bar{Y}	σ
0	1	72.69	72.690	0	0	0.000	0.0000
	2	72.69	72.690	0	0		
30	1	72.69	73.135	22.250	1.113	1.121	0.0124
	2	72.69	73.142	22.600	1.130		
60	1	72.69	73.271	29.050	1.453	1.444	0.0124
	2	72.69	73.264	28.700	1.435		
90	1	72.69	73.287	29.850	1.493	1.501	0.0124
	2	72.69	73.294	30.200	1.510		
120	1	72.69	73.301	30.550	1.528	1.540	0.0177
	2	72.69	73.311	31.050	1.553		
150	1	72.69	73.307	30.850	1.543	1.531	0.0159
	2	72.69	73.298	30.400	1.520		
180	1	72.69	73.309	30.950	1.548	1.559	0.0159
	2	72.69	73.318	31.400	1.570		
210	1	72.69	73.321	31.550	1.578	1.569	0.0124
	2	72.69	73.314	31.200	1.560		
240	1	72.69	73.321	31.550	1.578	1.575	0.0035
	2	72.69	73.319	31.450	1.573		
270	1	72.69	73.327	31.850	1.593	1.579	0.0194
	2	72.69	73.316	31.300	1.565		
300	1	72.69	73.330	32.000	1.600	1.593	0.0106
	2	72.69	73.324	31.700	1.585		

t = tiempo (s); P1 = peso del balón vacío seco (g); P2 = peso del balón + aceite (g); P3 = contenido de aceite (%); Y= contenido de aceite en base seca (g aceite/ g sólido seco); \bar{Y} = promedio de Y; σ = desviación estándar de \bar{Y} .

Fuente: Este estudio

Tabla 2.2. Datos obtenidos para determinar el contenido de aceite en base seca a temperatura de 140 °C

t (s)	CORRIDA	P1	P2	P3	Y	\bar{Y}	σ
0	1	72.69	72.690	0	0	0.000	0.0000
	2	72.69	72.690	0	0		
30	1	72.69	73.006	15.800	0.790	0.825	0.0495
	2	72.69	73.034	17.200	0.860		
60	1	72.69	73.164	23.700	1.185	1.216	0.0442
	2	72.69	73.189	24.950	1.247		
90	1	72.69	73.218	26.400	1.320	1.311	0.0124
	2	72.69	73.211	26.050	1.303		
120	1	72.69	73.218	26.400	1.320	1.344	0.0336
	2	72.69	73.237	27.350	1.367		
150	1	72.69	73.228	26.900	1.345	1.381	0.0513
	2	72.69	73.257	28.350	1.418		
180	1	72.69	73.237	27.350	1.367	1.385	0.0247
	2	72.69	73.251	28.050	1.403		
210	1	72.69	73.264	28.700	1.435	1.426	0.0124
	2	72.69	73.257	28.350	1.418		
240	1	72.69	73.264	28.700	1.435	1.464	0.0407
	2	72.69	73.287	29.850	1.493		
270	1	72.69	73.298	30.400	1.520	1.503	0.0247
	2	72.69	73.284	29.700	1.485		
300	1	72.69	73.264	28.700	1.435	1.459	0.0336
	2	72.69	73.283	29.650	1.483		

t = tiempo (s); P1 = peso del balón vacío seco (g); P2 = peso del balón + aceite (g); P3 = contenido de aceite (%); Y= contenido de aceite en base seca (g aceite/ g sólido seco); \bar{Y} = promedio de Y; σ = desviación estándar de \bar{Y} .

Fuente: Este estudio

Tabla 2.3. Datos obtenidos para determinar el contenido de aceite en base seca a temperatura de 160 °C

t (s)	CORRIDA	P1	P2	P3	Y	\bar{Y}	σ
0	1	72.69	72.690	0	0	0.000	0.0000
	2	72.69	72.690	0	0		
30	1	72.69	72.964	13.700	0.685	0.648	0.0530
	2	72.69	72.934	12.200	0.610		
60	1	72.69	73.124	21.700	1.085	1.116	0.0442
	2	72.69	73.149	22.950	1.148		
90	1	72.69	73.218	26.400	1.320	1.311	0.0124
	2	72.69	73.211	26.050	1.303		
120	1	72.69	73.224	26.700	1.335	1.320	0.0212
	2	72.69	73.212	26.100	1.305		
150	1	72.69	73.231	27.050	1.352	1.385	0.0460
	2	72.69	73.257	28.350	1.418		
180	1	72.69	73.228	26.900	1.345	1.356	0.0159
	2	72.69	73.237	27.350	1.367		
210	1	72.69	73.257	28.350	1.418	1.435	0.0247
	2	72.69	73.271	29.050	1.453		
240	1	72.69	73.264	28.700	1.435	1.451	0.0230
	2	72.69	73.277	29.350	1.468		
270	1	72.69	73.263	28.650	1.433	1.428	0.0071
	2	72.69	73.259	28.450	1.423		
300	1	72.69	73.234	27.200	1.360	1.384	0.0336
	2	72.69	73.253	28.150	1.408		

t = tiempo (s); P1 = peso del balón vacío seco (g); P2 = peso del balón + aceite (g); P3 = contenido de aceite (%); Y = contenido de aceite en base seca (g aceite/ g sólido seco); \bar{Y} = promedio de Y; σ = desviación estándar de \bar{Y} .

Fuente: Este estudio

b. Presión de 50 Kpa

Tabla 2.4. Datos obtenidos para determinar el contenido de aceite en base seca a temperatura de 120 °C

t (s)	CORRIDA	P1	P2	P3	Y	\bar{Y}	σ
0	1	72.69	72.690	0	0	0.000	0.0000
	2	72.69	72.690	0	0		
30	1	72.69	73.313	31.150	1.558	1.593	0.0495
	2	72.69	73.341	32.550	1.627		
60	1	72.69	73.431	37.050	1.853	1.828	0.0354
	2	72.69	73.411	36.050	1.803		
90	1	72.69	73.435	37.250	1.863	1.888	0.0354
	2	72.69	73.455	38.250	1.913		
120	1	72.69	73.469	38.950	1.947	1.962	0.0212
	2	72.69	73.481	39.550	1.977		
150	1	72.69	73.479	39.465	1.973	1.995	0.0313
	2	72.69	73.497	40.350	2.018		
180	1	72.69	73.509	40.950	2.048	2.056	0.0124
	2	72.69	73.516	41.300	2.065		
210	1	72.69	73.534	42.200	2.110	2.141	0.0442
	2	72.69	73.559	43.450	2.173		
240	1	72.69	73.567	43.850	2.192	2.165	0.0389
	2	72.69	73.545	42.750	2.138		
270	1	72.69	73.557	43.350	2.168	2.190	0.0318
	2	72.69	73.575	44.250	2.213		
300	1	72.69	73.538	42.400	2.120	2.136	0.0230
	2	72.69	73.551	43.050	2.153		

t = tiempo (s); P1 = peso del balón vacío seco (g); P2 = peso del balón + aceite (g); P3 = contenido de aceite (%); Y = contenido de aceite en base seca (g aceite/ g sólido seco); \bar{Y} = promedio de Y; σ = desviación estándar de \bar{Y} .

Fuente: Este estudio

Tabla 2.5. Datos obtenidos para determinar el contenido de aceite en base seca a temperatura de 140 °C

t (s)	CORRIDA	P1	P2	P3	Y	\bar{Y}	σ
0	1	72.69	72.690	0	0	0.000	0.0000
	2	72.69	72.690	0	0		
30	1	72.69	73.217	26.350	1.318	1.356	0.0548
	2	72.69	73.248	27.900	1.395		
60	1	72.69	73.373	34.150	1.708	1.730	0.0318
	2	72.69	73.391	35.050	1.753		
90	1	72.69	73.413	36.150	1.808	1.794	0.0194
	2	72.69	73.402	35.600	1.780		
120	1	72.69	73.408	35.900	1.795	1.805	0.0141
	2	72.69	73.416	36.300	1.815		
150	1	72.69	73.431	37.050	1.853	1.840	0.0177
	2	72.69	73.421	36.550	1.828		
180	1	72.69	73.443	37.650	1.883	1.919	0.0513
	2	72.69	73.472	39.100	1.955		
210	1	72.69	73.454	38.200	1.910	1.929	0.0265
	2	72.69	73.469	38.950	1.947		
240	1	72.69	73.478	39.400	1.970	1.980	0.0141
	2	72.69	73.486	39.800	1.990		
270	1	72.69	73.472	39.100	1.955	1.985	0.0424
	2	72.69	73.496	40.300	2.015		
300	1	72.69	73.474	39.200	1.960	1.931	0.0407
	2	72.69	73.451	38.050	1.902		

t = tiempo (s); P1 = peso del balón vacío seco (g); P2 = peso del balón + aceite (g); P3 = contenido de aceite (%); Y= contenido de aceite en base seca (g aceite/ g solido seco); \bar{Y} = promedio de Y; σ = desviación estándar de \bar{Y} .

Fuente: Este estudio

Tabla 2.6. Datos obtenidos para determinar el contenido de aceite en base seca a temperatura de 160 °C

t (s)	CORRIDA	P1	P2	P3	Y	\bar{Y}	σ
0	1	72.69	72.690	0	0	0.000	0.0000
	2	72.69	72.690	0	0		
30	1	72.69	73.137	22.350	1.118	1.148	0.0424
	2	72.69	73.161	23.550	1.178		
60	1	72.69	73.296	30.300	1.515	1.498	0.0247
	2	72.69	73.282	29.600	1.480		
90	1	72.69	73.321	31.550	1.578	1.609	0.0442
	2	72.69	73.346	32.800	1.640		
120	1	72.69	73.351	33.050	1.653	1.633	0.0283
	2	72.69	73.335	32.250	1.612		
150	1	72.69	73.364	33.700	1.685	1.656	0.0407
	2	72.69	73.341	32.550	1.627		
180	1	72.69	73.369	33.950	1.698	1.665	0.0460
	2	72.69	73.343	32.650	1.633		
210	1	72.69	73.368	33.900	1.695	1.669	0.0371
	2	72.69	73.347	32.850	1.642		
240	1	72.69	73.383	34.650	1.732	1.711	0.0301
	2	72.69	73.366	33.800	1.690		
270	1	72.69	73.372	34.100	1.705	1.724	0.0265
	2	72.69	73.387	34.850	1.743		
300	1	72.69	73.352	33.100	1.655	1.688	0.0460
	2	72.69	73.378	34.400	1.720		

t = tiempo (s); P1 = peso del balón vacío seco (g); P2 = peso del balón + aceite (g); P3 = contenido de aceite (%); Y= contenido de aceite en base seca (g aceite/ g sólido seco); \bar{Y} = promedio de Y; σ = desviación estándar de \bar{Y} .

Fuente: Este estudio

c. Presión de 81 Kpa

Tabla 2.7. Datos obtenidos para determinar el contenido de aceite en base seca a temperatura de 120 °C

t (s)	CORRIDA	P1	P2	P3	Y	\bar{Y}	σ
0	1	72.69	72.690	0	0	0.000	0.0000
	2	72.69	72.690	0	0		
30	1	72.69	73.382	34.600	1.730	1.723	0.0106
	2	72.69	73.376	34.300	1.715		
60	1	72.69	73.627	46.850	2.342	2.326	0.0230
	2	72.69	73.614	46.200	2.310		
90	1	72.69	73.737	52.350	2.617	2.676	0.0831
	2	72.69	73.784	54.700	2.735		
120	1	72.69	73.923	61.650	3.083	3.043	0.0566
	2	72.69	73.891	60.050	3.003		
150	1	72.69	73.871	59.050	2.952	2.980	0.0389
	2	72.69	73.893	60.150	3.008		
180	1	72.69	73.953	63.150	3.158	3.109	0.0689
	2	72.69	73.914	61.200	3.060		
210	1	72.69	73.956	63.300	3.165	3.149	0.0230
	2	72.69	73.943	62.650	3.133		
240	1	72.69	73.927	61.850	3.093	3.144	0.0725
	2	72.69	73.968	63.900	3.195		
270	1	72.69	74.013	66.150	3.308	3.328	0.0283
	2	72.69	74.029	66.950	3.348		
300	1	72.69	73.933	62.150	3.108	3.103	0.0071
	2	72.69	73.929	61.950	3.098		

t = tiempo (s); P1 = peso del balón vacío seco (g); P2 = peso del balón + aceite (g); P3 = contenido de aceite (%); Y = contenido de aceite en base seca (g aceite/ g sólido seco); \bar{Y} = promedio de Y; σ = desviación estándar de \bar{Y} .

Fuente: Este estudio

Tabla 2.8. Datos obtenidos para determinar el contenido de aceite en base seca a temperatura de 140 °C

t (s)	CORRIDA	P1	P2	P3	Y	\bar{Y}	σ
0	1	72.69	72.690	0	0	0.000	0.0000
	2	72.69	72.690	0	0		
30	1	72.69	73.352	33.100	1.655	1.695	0.0566
	2	72.69	73.384	34.700	1.735		
60	1	72.69	73.556	43.300	2.165	2.144	0.0301
	2	72.69	73.539	42.450	2.123		
90	1	72.69	73.619	46.450	2.323	2.345	0.0318
	2	72.69	73.637	47.350	2.368		
120	1	72.69	73.695	50.250	2.512	2.491	0.0301
	2	72.69	73.678	49.400	2.470		
150	1	72.69	73.697	50.350	2.518	2.501	0.0230
	2	72.69	73.684	49.700	2.485		
180	1	72.69	73.714	51.200	2.560	2.579	0.0265
	2	72.69	73.729	51.950	2.598		
210	1	72.69	73.754	53.200	2.660	2.629	0.0442
	2	72.69	73.729	51.950	2.598		
240	1	72.69	73.733	52.150	2.608	2.588	0.0283
	2	72.69	73.717	51.350	2.568		
270	1	72.69	73.703	50.650	2.533	2.520	0.0177
	2	72.69	73.693	50.150	2.508		
300	1	72.69	73.698	50.400	2.520	2.489	0.0442
	2	72.69	73.673	49.150	2.458		

t = tiempo (s); P1 = peso del balón vacío seco (g); P2 = peso del balón + aceite (g); P3 = contenido de aceite (%); Y = contenido de aceite en base seca (g aceite/ g sólido seco); \bar{Y} = promedio de Y; σ = desviación estándar de \bar{Y} .

Fuente: Este estudio

Tabla 2.9. Datos obtenidos para determinar el contenido de aceite en base seca a temperatura de 160 °C

t (s)	CORRIDA	P1	P2	P3	Y	\bar{Y}	σ
0	1	72.69	72.690	0	0	0.000	0.0000
	2	72.69	72.690	0	0		
30	1	72.69	73.259	28.450	1.423	1.455	0.0460
	2	72.69	73.285	29.750	1.488		
60	1	72.69	73.389	34.950	1.748	1.755	0.0106
	2	72.69	73.395	35.250	1.763		
90	1	72.69	73.468	38.900	1.945	1.966	0.0301
	2	72.69	73.485	39.750	1.988		
120	1	72.69	73.505	40.750	2.037	2.068	0.0424
	2	72.69	73.529	41.950	2.098		
150	1	72.69	73.521	41.550	2.078	2.068	0.0141
	2	72.69	73.513	41.150	2.058		
180	1	72.69	73.535	42.250	2.113	2.090	0.0318
	2	72.69	73.517	41.350	2.068		
210	1	72.69	73.574	44.200	2.210	2.184	0.0371
	2	72.69	73.553	43.150	2.158		
240	1	72.69	73.546	42.800	2.140	2.119	0.0301
	2	72.69	73.529	41.950	2.098		
270	1	72.69	73.545	42.750	2.138	2.129	0.0124
	2	72.69	73.538	42.400	2.120		
300	1	72.69	73.466	38.800	1.940	1.961	0.0301
	2	72.69	73.483	39.650	1.983		

t = tiempo (s); P1 = peso del balón vacío seco (g); P2 = peso del balón + aceite (g); P3 = contenido de aceite (%); Y= contenido de aceite en base seca (g aceite/ g solido seco); \bar{Y} = promedio de Y; σ = desviación estándar de \bar{Y} .

Fuente: Este estudio

ANEXO 3 DATOS EXPERIMENTALES PARA EL ANÁLISIS DE COLOR

a. Presión de 81 Kpa

Tabla 3.1. Datos obtenidos para determinar el parámetro ΔE a temperatura de 120 °C

t (s)	CORRIDAS	L	\bar{x}	σ	a	\bar{x}	σ	b	\bar{x}	σ	ΔE	\bar{x}	σ
0	1	52.520			0.810			8.390			0.000		
	2	50.520	52.077	1.389	-	-	0.050	8.120	8.277	0.140	0.000	0.000	0.000
	3	53.190			0.770			8.320			0.000		
30	1	67.140			-0.56			5.910			14.831		
	2	67.000	67.133	0.130	-0.52	-	0.026	5.610	5.550	0.393	16.671	15.310	1.196
	3	67.260			-0.57	0.550		5.130			14.428		
60	1	66.760			-0.14			4.540			14.766		
	2	66.780	67.283	0.889	-0.16	-	0.010	4.880	4.685	0.175	16.589	15.643	0.913
	3	68.310			-0.15	0.150		4.635			15.575		
90	1	62.70			0.74			4.09			11.159		
	2	63.23	63.880	1.607	0.67	0.707	0.035	4.62	4.290	0.288	13.255	12.563	1.216
	3	65.71			0.71			4.16			13.276		
120	1	63.12			0.14			4.61			11.294		
	2	63.73	63.437	0.306	0.12	0.130	0.010	4.41	4.547	0.118	13.746	11.998	1.524
	3	63.46			0.13			4.62			10.953		
150	1	60.17			0.30			2.60			9.658		
	2	60.53	60.800	0.800	0.32	0.317	0.015	2.78	2.773	0.170	11.392	10.393	0.897
	3	61.70			0.33			2.94			10.128		
180	1	62.46			0.12			3.020			11.336		
	2	61.27	61.940	0.609	0.14	0.130	0.010	3.220	3.157	0.118	11.845	11.158	0.791
	3	62.09			0.13			3.230			10.292		
210	1	63.34			0.27			3.78			11.811		
	2	63.74	63.550	0.201	0.27	0.260	0.017	3.37	3.443	0.307	14.082	12.506	1.367
	3	63.57			0.24			3.18			11.627		
240	1	64.26			0.17			6.45			11.939		
	2	64.43	64.490	0.265	0.15	0.160	0.010	6.85	6.590	0.225	13.994	12.569	1.237
	3	64.78			0.16			6.47			11.774		
270	1	64.45			-0.22			5.07			12.397		
	2	64.39	64.397	0.050	-0.23	-	0.006	5.55	5.337	0.244	14.114	12.688	1.306
	3	64.35			-0.22	0.223		5.39			11.551		
300	1	61.05			0.32			3.08			10.111		
	2	62.00	61.810	0.685	0.32	0.313	0.012	3.39	3.297	0.188	12.459	11.013	1.265
	3	62.38			0.30			3.42			10.470		

t = tiempo (s); L = parámetro L*; a = parámetro a*; b=parámetro b*; \bar{X} = promedio de L, a y b; σ = desviación estándar de L, a y b.

Fuente: Este estudio

Tabla 3.2. Datos obtenidos para determinar el parámetro ΔE a temperatura de 140 °C

t (s)	CORRIDAS	L	\bar{x}	σ	a	\bar{x}	σ	b	\bar{x}	σ	ΔE	\bar{x}	σ
0	1	52.520			0.810			8.390			0.000		
	2	50.520	52.077	1.389	0.710	0.763	0.050	8.120	8.277	0.140	0.000	0.000	0.000
	3	53.190			0.770			8.320			0.000		
30	1	60.19			0.42			1.82			10.174		
	2	59.89	59.750	0.524	0.44	0.437	0.015	1.85	1.843	0.021	11.333	10.131	1.223
	3	59.17			0.45			1.86			8.887		
60	1	62.74			0.06			3.56			11.337		
	2	62.38	62.483	0.224	0.05	0.050	0.010	3.34	3.303	0.277	12.810	11.583	1.124
	3	62.33			0.04			3.01			10.601		
90	1	61.71			0.39			3.19			10.627		
	2	60.37	61.657	1.261	0.35	0.370	0.020	3.73	3.637	0.408	10.836	10.716	0.108
	3	62.89			0.37			3.99			10.684		
120	1	64.85			-0.06			4.33			13.003		
	2	64.88	64.327	0.933	-0.07	0.060	0.010	4.34	4.343	0.015	14.863	12.900	2.016
	3	63.25			-0.05			4.36			10.835		
150	1	61.28			0.27			3.74			9.976		
	2	62.89	62.247	0.852	0.24	0.267	0.025	3.65	3.667	0.067	13.187	11.238	1.712
	3	62.57			0.29			3.61			10.550		
180	1	61.57			0.31			4.67			9.849		
	2	60.62	61.387	0.693	0.3	0.300	0.010	4.25	4.520	0.234	10.863	10.097	0.677
	3	61.97			0.29			4.64			9.579		
210	1	67.14			0.57			6.02			14.875		
	2	66.97	67.653	1.040	0.47	0.543	0.064	6.34	6.420	0.445	16.588	15.749	0.857
	3	68.85			0.59			6.9			15.783		
240	1	60.81			0.5			4.80			9.128		
	2	62.6	61.237	1.208	0.49	0.507	0.021	4.34	4.350	0.445	12.714	10.103	2.285
	3	60.3			0.53			3.91			8.467		
270	1	64.74			0.36			5.67			12.574		
	2	65.37	64.657	0.758	0.35	0.367	0.021	5.41	5.407	0.265	15.132	12.967	1.998
	3	63.86			0.39			5.14			11.194		
300	1	67.78			0.59			5.75			15.550		
	2	67.8	67.457	0.577	0.63	0.637	0.050	5.43	5.707	0.258	17.539	15.658	1.830
	3	66.79			0.69			5.94			13.884		

t = tiempo (s); L = parámetro L*; a = parámetro a*; b=parámetro b*; \bar{X} = promedio de L, a y b; σ = desviación estándar de L, a y b.

Fuente: Este estudio

Tabla 3.3. Datos obtenidos para determinar el parámetro ΔE a temperatura de 160 °C

t (s)	CORRIDAS	L	\bar{x}	σ	a	\bar{x}	σ	b	\bar{x}	σ	ΔE	\bar{x}	σ
0	1	52.520			-			8.390			0.000		
	2	50.520	52.077	1.389	-	-	0.050	8.120	8.277	0.140	0.000	0.000	0.000
	3	53.190			-			8.320			0.000		
30	1	63.83			0.06			5.33			11.749		
	2	63.94	63.817	0.131	0.09	0.087	0.025	5.17	5.263	0.083	13.764	12.156	1.448
	3	63.68			0.11			5.29			10.954		
60	1	67.62			0.54			6.97			15.227		
	2	67.63	67.667	0.072	0.52	0.550	0.036	6.62	6.760	0.185	17.220	15.720	1.324
	3	67.75			0.59			6.69			14.714		
90	1	60.31			1.89			4.98			8.922		
	2	60.29	60.340	0.070	1.97	1.917	0.046	4.85	4.847	0.135	10.646	9.358	1.134
	3	60.42			1.89			4.71			8.508		
120	1	60.57			1.48			4.43			9.259		
	2	60.64	60.430	0.305	1.49	1.503	0.032	4.89	4.760	0.288	10.848	9.371	1.424
	3	60.08			1.54			4.96			8.006		
150	1	64.42			0.62			6.12			12.199		
	2	64.37	64.337	0.104	0.69	0.663	0.038	6.69	6.323	0.318	13.994	12.508	1.357
	3	64.22			0.68			6.16			11.333		
180	1	59.22			1.37			5.96			7.453		
	2	59.93	59.603	0.358	1.25	1.323	0.064	5.39	5.697	0.287	9.992	8.242	1.518
	3	59.66			1.35			5.74			7.281		
210	1	63.46			1.33			7.31			11.200		
	2	63.79	63.540	0.221	1.31	1.337	0.031	7.15	7.260	0.095	13.458	11.703	1.566
	3	63.37			1.37			7.32			10.450		
240	1	61.84			1.97			6.16			9.978		
	2	63.07	61.503	1.759	1.84	1.813	0.172	6.76	6.403	0.316	12.878	9.999	2.870
	3	59.6			1.63			6.29			7.139		
270	1	60.65			1.86			7.23			8.635		
	2	61.54	61.650	1.059	1.89	1.847	0.051	7.86	7.687	0.399	11.326	9.958	1.346
	3	62.76			1.79			7.97			9.913		
300	1	63.68			1.61			6.21			11.626		
	2	63.77	63.570	0.272	1.67	1.643	0.031	6.27	6.270	0.060	13.589	11.920	1.542
	3	63.26			1.65			6.33			10.546		

t = tiempo (s); L = parámetro L*; a = parámetro a*; b=parámetro b*; \bar{X} = promedio de L, a y b; σ = desviación estándar de L, a y b.

Fuente: Este estudio

b. Presión de 50 Kpa
Tabla 3.4. Datos obtenidos para determinar el parámetro ΔE a temperatura de 120 °C

t (s)	CORRIDAS	L	\bar{x}	σ	a	\bar{x}	σ	b	\bar{x}	σ	ΔE	\bar{x}	σ
0	1	52.520			-			8.390			0.000		
	2	50.520	52.077	1.389	0.810	-	0.050	8.120	8.277	0.140	0.000	0.000	0.000
	3	53.190			0.710	0.763		8.320			0.000		
30	1	57.47			-2.65	-		6.15			5.736		
	2	57.27	57.417	0.129	-2.68	2.650	0.030	6.16	6.173	0.032	7.300	6.062	1.111
	3	57.51			-2.62			6.21			5.151		
60	1	56.18			-2.10	-		12.75			5.837		
	2	56.49	56.347	0.156	-2.18	2.140	0.040	12.74	12.723	0.038	7.691	6.365	1.156
	3	56.37			-2.14			12.68			5.568		
90	1	57.33			-2.11	-		14.44			7.838		
	2	57.15	57.243	0.090	-2.19	2.127	0.057	14.38	14.390	0.046	9.238	8.154	0.965
	3	57.25			-2.08			14.35			7.387		
120	1	54.83			-2.91	-		15.76			8.004		
	2	54.41	54.630	0.211	-2.78	2.850	0.066	15.67	15.673	0.085	8.742	8.150	0.534
	3	54.65			-2.86			15.59			7.704		
150	1	62.07			0.34	-		3.66			10.719		
	2	62.04	62.057	0.015	0.35	0.360	0.026	3.62	3.670	0.056	12.413	11.062	1.216
	3	62.06			0.39			3.73			10.054		
180	1	61.13			0.29	-		3.92			9.763		
	2	61.16	61.160	0.030	0.32	0.307	0.015	3.89	3.920	0.030	11.496	10.146	1.205
	3	61.19			0.31			3.95			9.180		
210	1	61.59			0.38	-		3.94			10.173		
	2	61.41	61.450	0.125	0.37	0.387	0.021	3.97	3.967	0.025	11.704	10.396	1.211
	3	61.35			0.41			3.99			9.313		
240	1	68.36			-0.16	-		6.67			15.946		
	2	68.45	68.433	0.067	-0.17	0.173	0.015	6.98	6.837	0.156	17.974	16.434	1.364
	3	68.49			-0.19			6.86			15.380		
270	1	68.55			0.34	-		5.74			16.288		
	2	68.77	68.643	0.114	0.27	0.307	0.035	5.65	5.600	0.171	18.442	16.820	1.433
	3	68.61			0.31			5.41			15.729		
300	1	68.43			0.77	-		7.89			15.996		
	2	68.44	68.453	0.032	0.81	0.797	0.023	7.85	7.890	0.040	17.986	16.456	1.360
	3	68.49			0.81			7.93			15.386		

t = tiempo (s); L = parámetro L*; a = parámetro a*; b=parámetro b*; \bar{X} = promedio de L, a y b; σ = desviación estándar de L, a y b.

Fuente: Este estudio

Tabla 3.5. Datos obtenidos para determinar el parámetro ΔE a temperatura de 140 °C

t (s)	CORRIDAS	L	\bar{x}	σ	a	\bar{x}	σ	b	\bar{x}	σ	ΔE	\bar{x}	σ
0	1	52.520			-			8.390			0.000		
	2	50.520	52.077	1.389	0.810	-	0.050	8.120	8.277	0.140	0.000	0.000	0.000
	3	53.190			-			8.320			0.000		
30	1	54.6			-3.47			11.44			4.550		
	2	54.1	54.250	0.304	-3.39	-	0.040	11.32	11.430	0.105	5.499	4.769	0.649
	3	54.05			-3.43	3.430		11.53			4.257		
60	1	47.92			-3.19			11.37			5.975		
	2	47.99	47.917	0.075	-3.38	-	0.095	11.41	11.450	0.057	4.935	5.871	0.888
	3	47.84			-3.27	3.280		11.49			6.702		
90	1	48.65			-2.86			10.67			4.937		
	2	48.69	48.697	0.050	-2.79	-	0.047	10.47	10.557	0.103	3.633	4.653	0.912
	3	48.75			-2.88	2.843		10.53			5.390		
120	1	59.94			-0.38			2.56			9.446		
	2	59.84	59.833	0.110	-0.31	-	0.036	2.39	2.480	0.085	10.948	9.720	1.117
	3	59.72			-0.33	0.340		2.49			8.765		
150	1	61.66			-0.43			3.01			10.613		
	2	61.81	61.743	0.076	-0.45	-	0.015	3.02	3.027	0.021	12.391	11.023	1.216
	3	61.76			-0.46	0.447		3.05			10.065		
180	1	61.89			0.84			3.48			10.706		
	2	61.96	61.897	0.060	0.92	0.900	0.053	3.55	3.483	0.065	12.426	11.073	1.212
	3	61.84			0.94			3.42			10.087		
210	1	61.94			0.76			4.26			10.405		
	2	61.98	61.937	0.045	0.75	0.773	0.032	4.12	4.150	0.098	12.226	10.814	1.258
	3	61.89			0.81			4.07			9.811		
240	1	63.95			0.41			5.82			11.779		
	2	63.99	63.970	0.020	0.47	0.443	0.031	5.89	5.830	0.056	13.704	12.208	1.334
	3	63.97			0.45			5.78			11.142		
270	1	63.58			0.33			5.17			11.575		
	2	63.57	63.537	0.067	0.37	0.363	0.031	5.12	5.177	0.060	13.434	11.931	1.360
	3	63.46			0.39			5.24			10.784		
300	1	65.31			2.72			8.87			13.277		
	2	65.47	65.387	0.080	2.75	2.783	0.085	8.75	8.810	0.060	15.358	13.790	1.385
	3	65.38			2.88			8.81			12.734		

t = tiempo (s); L = parámetro L*; a = parámetro a*; b=parámetro b*; \bar{X} = promedio de L, a y b; σ = desviación estándar de L, a y b.

Fuente: Este estudio

Tabla 3.6. Datos obtenidos para determinar el parámetro ΔE a temperatura de 160 °C

t (s)	CORRIDAS	L	\bar{x}	σ	a	\bar{x}	σ	b	\bar{x}	σ	ΔE	\bar{x}	σ
0	1	52.520			-			8.390			0.000		
	2	50.520	52.077	1.389	-	-	0.050	8.120	8.277	0.140	0.000	0.000	0.000
	3	53.190			-			8.320			0.000		
30	1	49.21			-3.25			11.09			4.919		
	2	49.33	49.270	0.060	-3.31	-	0.065	11.08	11.110	0.044	4.116	4.845	0.695
	3	49.27			-3.38	3.313		11.16			5.499		
60	1	58.18			0.51			1.93			8.690		
	2	58.26	58.237	0.049	0.55	0.523	0.023	1.98	1.925	0.078	9.960	8.986	0.864
	3	58.27			0.51			1.87			8.309		
90	1	61.71			0.35			4.9			9.899		
	2	61.68	61.677	0.035	0.29	0.317	0.031	4.8	4.877	0.068	11.686	10.251	1.295
	3	61.64			0.31			4.93			9.168		
120	1	63.66			0.44			5.71			11.526		
	2	63.44	63.560	0.111	0.51	0.497	0.051	5.84	5.750	0.078	13.176	11.832	1.220
	3	63.58			0.54			5.7			10.795		
150	1	64.06			0.59			5.22			12.049		
	2	64.11	64.113	0.055	0.67	0.603	0.061	5.44	5.340	0.111	13.920	12.473	1.289
	3	64.17			0.55			5.36			11.448		
180	1	65.42			0.47			6.68			13.184		
	2	65.37	65.427	0.060	0.43	0.450	0.020	6.86	6.760	0.092	15.185	13.673	1.337
	3	65.49			0.45			6.74			12.649		
210	1	65.53			0.72			3.23			13.978		
	2	65.61	65.607	0.075	0.66	0.717	0.055	3.16	3.163	0.065	15.943	14.515	1.249
	3	65.68			0.77			3.10			13.624		
240	1	65.97			0.55			6.55			13.643		
	2	65.76	65.800	0.057	0.69	0.640	0.078	6.33	6.433	0.111	15.408	13.975	1.300
	3	65.84			0.68			6.42			12.874		
270	1	65.82			0.56			6.62			13.487		
	2	65.74	65.743	0.075	0.58	0.530	0.070	6.53	6.607	0.071	15.357	13.831	1.387
	3	65.67			0.45			6.67			12.648		
300	1	66.19			0.49			4.64			14.235		
	2	66.27	66.250	0.053	0.57	0.540	0.044	4.43	4.543	0.106	16.227	14.718	1.334
	3	66.29			0.56			4.56			13.694		

t = tiempo (s); L = parámetro L*; a = parámetro a*; b=parámetro b*; \bar{X} = promedio de L, a y b; σ = desviación estándar de L, a y b.

Fuente: Este estudio

c. Presión de 81 Kpa

Tabla 3.7. Datos obtenidos para determinar el parámetro ΔE a temperatura de 120 °C

t (s)	CORRIDAS	L	\bar{x}	σ	a	\bar{x}	σ	b	\bar{x}	σ	ΔE	\bar{x}	σ
0	1	52.520			-			8.390			0.000		
	2	50.520	52.077	1.389	0.810	-	0.050	8.120	8.277	0.140	0.000	0.000	0.000
	3	53.190			-			8.320			0.000		
30	1	68.48			-0.48			3.99			16.559		
	2	68.36	68.360	0.120	-0.41	-	0.035	3.67	3.783	0.179	18.389	16.899	1.352
	3	68.24			-0.45	0.447		3.69			15.749		
60	1	67.03			-0.83			3.33			15.367		
	2	67.08	67.077	0.045	-0.87	-	0.023	3.44	3.485	0.064	17.209	15.769	1.287
	3	67.12			-0.87	0.857		3.53			14.731		
90	1	66.08			-0.74			3.38			14.456		
	2	66.37	66.203	0.150	-0.77	-	0.062	3.26	3.360	0.092	16.578	14.964	1.430
	3	66.16			-0.65	0.720		3.44			13.858		
120	1	65.07			-0.63			4.16			13.245		
	2	65.12	65.133	0.071	-0.59	-	0.040	4.31	4.240	0.075	15.089	13.676	1.255
	3	65.21			-0.55	0.590		4.25			12.692		
150	1	67.04			-0.66			4.13			15.133		
	2	67.14	67.130	0.085	-0.59	-	0.035	4.24	4.237	0.105	17.067	15.592	1.308
	3	67.21			-0.63	0.627		4.34			14.575		
180	1	68.57			-0.44			4.85			16.801		
	2	68.69	68.663	0.083	-0.39	-	0.032	4.65	4.673	0.166	18.727	17.209	1.361
	3	68.73			-0.45	0.427		4.52			16.098		
210	1	68.94			-0.84			5.31			16.343		
	2	68.92	68.897	0.059	-0.89	-	0.026	5.24	5.223	0.096	18.625	16.977	1.439
	3	68.83			-0.85	0.860		5.12			15.964		
240	1	63.48			-0.49			2.79			12.312		
	2	63.29	63.330	0.057	-0.54	-	0.025	2.82	2.777	0.051	13.827	12.587	1.128
	3	63.37			-0.51	0.513		2.72			11.622		
270	1	61.98			-0.35			2.49			11.159		
	2	61.83	61.907	0.075	-0.33	-	0.020	2.37	2.433	0.060	12.693	11.459	1.115
	3	61.91			-0.37	0.350		2.44			10.525		
300	1	66.33			-0.53			5.27			14.161		
	2	66.19	66.290	0.087	-0.49	-	0.035	5.49	5.380	0.110	15.891	14.513	1.240
	3	66.35			-0.46	0.493		5.38			13.488		

t = tiempo (s); L = parámetro L*; a = parámetro a*; b=parámetro b*; \bar{X} = promedio de L, a y b; σ = desviación estándar de L, a y b.

Fuente: Este estudio

Tabla 3.8. Datos obtenidos para determinar el parámetro ΔE a temperatura de 140 °C

t (s)	CORRIDAS	L	\bar{x}	σ	a	\bar{x}	σ	b	\bar{x}	σ	ΔE	\bar{x}	σ
0	1	52.520			-	0.810		8.390			0.000		
	2	50.520	52.077	1.389	-	0.710	0.763	0.050	8.120	8.277	0.140	0.000	0.000
	3	53.190			-	0.770		8.320			0.000		
30	1	69.55			-0.42			4.68			17.434		
	2	69.63	69.633	0.085	-0.45	0.420	0.030	4.83	4.757	0.075	19.393	17.913	1.308
	3	69.72			-0.39			4.76			16.913		
60	1	65.17			-0.58			4.24			13.315		
	2	65.36	65.253	0.097	-0.58	0.553	0.046	4.31	4.260	0.071	15.322	13.787	1.361
	3	65.23			-0.50			4.21			12.725		
90	1	66.85			-0.44			4.75			14.790		
	2	66.73	66.757	0.083	-0.41	0.413	0.025	4.85	4.823	0.064	16.539	15.089	1.326
	3	66.69			-0.39			4.87			13.939		
120	1	62.46			-0.05			3.52			11.095		
	2	62.27	62.357	0.096	-0.03	0.040	0.010	3.45	3.453	0.065	12.662	11.392	1.151
	3	62.34			-0.04			3.39			10.419		
150	1	69.12			-0.45			7.32			16.638		
	2	69.18	69.173	0.050	-0.42	0.417	0.035	7.47	7.417	0.084	18.674	17.123	1.374
	3	69.22			-0.38			7.46			16.058		
180	1	68.77			-0.13			7.12			13.378		
	2	68.88	68.860	0.082	-0.14	0.140	0.010	7.14	7.097	0.059	15.073	13.671	1.281
	3	68.93			-0.15			7.03			12.562		
210	1	65.82			-0.51			5.55			16.499		
	2	65.55	65.680	0.135	-0.48	0.487	0.021	5.67	5.643	0.083	15.230	14.828	1.905
	3	65.67			-0.47			5.71			12.754		
240	1	65.75			0.35			5.69			13.552		
	2	65.89	65.857	0.095	0.33	0.353	0.025	5.43	5.560	0.130	15.638	14.092	1.359
	3	65.93			0.38			5.56			13.086		
270	1	64.46			0.39			5.88			12.260		
	2	64.27	64.373	0.096	0.43	0.427	0.035	5.78	5.867	0.081	13.994	12.590	1.272
	3	64.39			0.46			5.94			11.516		
300	1	69.06			0.29			5.56			16.816		
	2	69.15	69.140	0.075	0.28	0.293	0.015	5.72	5.650	0.082	18.810	17.300	1.336
	3	69.21			0.31			5.67			16.274		

t = tiempo (s); L = parámetro L*; a = parámetro a*; b=parámetro b*; \bar{X} = promedio de L, a y b; σ = desviación estándar de L, a y b.

Fuente: Este estudio

Tabla 3.9. Datos obtenidos para determinar el parámetro ΔE a temperatura de 160 °C

t (s)	CORRIDAS	L	\bar{x}	σ	a	\bar{x}	σ	b	\bar{x}	σ	ΔE	\bar{x}	σ
0	1	52.520			-			8.390			0.000		
	2	50.520	52.077	1.389	0.810	-	0.050	8.120	8.277	0.140	0.000	0.000	0.000
	3	53.190			-			8.320			0.000		
30	1	67.67			-0.94			4.67			15.601		
	2	67.45	67.570	0.111	-0.89	-	0.098	4.49	4.563	0.095	17.316	15.937	1.246
	3	67.59			-1.08	0.970		4.53			14.894		
60	1	66.88			-0.92			4.54			14.868		
	2	66.94	66.860	0.092	-0.87	-	0.045	4.45	4.495	0.064	16.826	15.260	1.411
	3	66.76			-0.96	0.917		4.54			14.088		
90	1	65.63			-0.31			4.29			13.745		
	2	65.74	65.710	0.070	-0.27	-	0.040	4.32	4.333	0.051	15.693	14.205	1.320
	3	65.76			-0.35	0.310		4.39			13.177		
120	1	66.25			0.82			7.59			13.850		
	2	66.31	66.247	0.065	0.78	0.837	0.067	7.68	7.677	0.085	15.866	14.275	1.427
	3	66.18			0.91			7.76			13.110		
150	1	71.86			-0.52			6.14			19.473		
	2	71.73	71.753	0.097	-0.54	-	0.087	6.15	6.203	0.101	21.302	19.788	1.384
	3	71.67			-0.68	0.580		6.32			18.588		
180	1	67.19			0.29			5.23			16.238		
	2	67.34	67.270	0.075	0.24	0.263	0.025	5.26	5.190	0.096	17.984	16.593	1.252
	3	67.28			0.26			5.08			15.556		
210	1	68.41			-0.38			9.56			14.723		
	2	68.25	68.343	0.083	-0.35	-	0.035	9.73	9.657	0.087	17.807	15.925	1.650
	3	68.37			-0.42	0.383		9.68			15.245		
240	1	67.65			-0.56			6.11			15.303		
	2	67.86	67.753	0.105	-0.55	-	0.015	5.99	6.123	0.140	17.471	15.827	1.455
	3	67.75			-0.53	0.547		6.27			14.706		
270	1	67.87			0.97			10.54			15.602		
	2	67.92	67.920	0.050	0.99	0.990	0.020	10.49	10.553	0.071	17.643	16.103	1.360
	3	67.97			1.01			10.63			15.065		
300	1	63.88			0.81			6.94			11.566		
	2	63.74	63.850	0.098	0.83	0.867	0.081	6.82	6.870	0.062	13.373	11.972	1.248
	3	63.93			0.96			6.85			10.977		

t = tiempo (s); L = parámetro L*; a = parámetro a*; b=parámetro b*; \bar{X} = promedio de L, a y b; σ = desviación estándar de L, a y b.

Fuente: Este estudio

ANEXO 4 DATOS EXPERIMENTALES PARA EL ANÁLISIS DE TEXTURA

A. Presión de 20 Kpa

Tabla 4.1. Datos obtenidos para el análisis de textura a temperatura de 120 °C

t	CORRIDAS	X	\bar{x}	σ
0	1	9.029	8.403	0.562
	2	8.237		
	3	7.942		
30	1	1.756	1.513	0.241
	2	1.274		
	3	1.510		
60	1	0.996	0.985	0.138
	2	1.118		
	3	0.842		
90	1	1.794	1.949	0.167
	2	2.125		
	3	1.928		
120	1	5.229	5.648	0.495
	2	6.195		
	3	5.520		
150	1	4.611	4.531	0.170
	2	4.335		
	3	4.647		
180	1	3.829	3.821	0.648
	2	4.465		
	3	3.170		
210	1	2.881	3.010	0.180
	2	3.215		
	3	2.933		
240	1	5.289	4.579	0.623
	2	4.125		
	3	4.324		
270	1	5.333	5.623	0.273
	2	5.875		
	3	5.661		
300	1	6.065	6.636	1.195
	2	5.835		
	3	8.010		

t = tiempo (s); X = Dureza (N); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de X.

Fuente: Este estudio

Tabla 4.2. Datos obtenidos para el análisis de textura a temperatura de 140 °C

t	CORRIDAS	X	\bar{x}	σ
0	1	9.029	8.403	0.562
	2	8.237		
	3	7.942		
30	1	3.953	4.508	0.726
	2	4.241		
	3	5.330		
60	1	2.348	2.828	0.453
	2	3.247		
	3	2.889		
90	1	6.256	6.637	0.530
	2	6.413		
	3	7.242		
120	1	6.212	6.526	0.361
	2	6.446		
	3	6.921		
150	1	4.814	5.285	0.516
	2	5.205		
	3	5.836		
180	1	6.513	5.827	0.598
	2	5.545		
	3	5.422		
210	1	5.624	4.835	0.778
	2	4.069		
	3	4.811		
240	1	2.838	3.426	0.737
	2	4.253		
	3	3.186		
270	1	3.709	4.473	0.772
	2	5.253		
	3	4.458		
300	1	1.758	1.929	0.155
	2	1.968		
	3	2.061		

t = tiempo (s); X = Dureza (N); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de X.

Fuente: Este estudio

Tabla 4.3. Datos obtenidos para el análisis de textura a temperatura de 160 °C

t	CORRIDAS	X	\bar{x}	σ
0	1	9.029	8.403	0.562
	2	8.237		
	3	7.942		
30	1	7.414	8.476	1.218
	2	9.806		
	3	8.209		
60	1	6.572	7.112	0.766
	2	7.988		
	3	6.775		
90	1	4.765	4.566	0.613
	2	3.878		
	3	5.054		
120	1	6.723	5.773	0.863
	2	5.038		
	3	5.557		
150	1	10.283	9.554	1.231
	2	8.132		
	3	10.246		
180	1	2.660	2.648	0.050
	2	2.691		
	3	2.593		
210	1	7.674	6.875	0.802
	2	6.880		
	3	6.070		
240	1	4.534	4.253	0.537
	2	3.634		
	3	4.591		
270	1	4.890	5.813	0.800
	2	6.250		
	3	6.299		
300	1	5.491	4.873	0.549
	2	4.684		
	3	4.442		

t = tiempo (s); X = Dureza (N); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de X.

Fuente: Este estudio

B. Presión de 50 Kpa

Tabla 4.4. Datos obtenidos para el análisis de textura a temperatura de 120 °C

t	CORRIDAS	X	\bar{x}	σ
0	1	9.029	8.403	0.562
	2	8.237		
	3	7.942		
30	1	1.123	1.786	0.627
	2	2.370		
	3	1.864		
60	1	1.085	1.008	0.071
	2	0.996		
	3	0.944		
90	1	0.502	0.628	0.242
	2	0.475		
	3	0.908		
120	1	3.801	3.422	0.379
	2	3.043		
	3	3.422		
150	1	6.530	6.617	0.375
	2	6.293		
	3	7.027		
180	1	7.679	7.926	0.975
	2	7.099		
	3	9.001		
210	1	3.223	3.786	0.590
	2	3.735		
	3	4.401		
240	1	5.724	6.132	0.365
	2	6.248		
	3	6.425		
270	1	8.630	8.291	0.294
	2	8.133		
	3	8.108		
300	1	8.747	7.875	1.079
	2	8.209		
	3	6.669		

t = tiempo (s); X = Dureza (N); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de X.

Fuente: Este estudio

Tabla 4.5. Datos obtenidos para el análisis de textura a temperatura de 140 °C

t	CORRIDAS	X	\bar{x}	σ
0	1	9.029	8.403	0.562
	2	8.237		
	3	7.942		
30	1	0.609	0.731	0.106
	2	0.795		
	3	0.789		
60	1	2.338	1.966	0.362
	2	1.616		
	3	1.946		
90	1	1.077	1.182	0.128
	2	1.325		
	3	1.144		
120	1	6.024	6.759	0.637
	2	7.163		
	3	7.090		
150	1	3.874	3.865	0.152
	2	4.012		
	3	3.709		
180	1	6.038	5.903	0.607
	2	5.239		
	3	6.432		
210	1	8.554	7.530	1.124
	2	7.708		
	3	6.327		
240	1	9.262	8.069	1.048
	2	7.296		
	3	7.648		
270	1	8.962	7.514	1.259
	2	6.899		
	3	6.681		
300	1	7.598	7.652	1.197
	2	6.484		
	3	8.875		

t = tiempo (s); X = Dureza (N); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de X.

Fuente: Este estudio

Tabla 4.6. Datos obtenidos para el análisis de textura a temperatura de 160 °C

t	CORRIDAS	X	\bar{x}	σ
0	1	9.029	8.403	0.562
	2	8.237		
	3	7.942		
30	1	0.820	0.976	0.148
	2	0.996		
	3	1.113		
60	1	1.601	1.934	0.289
	2	2.088		
	3	2.113		
90	1	4.851	4.290	0.519
	2	3.827		
	3	4.192		
120	1	3.170	3.599	0.612
	2	3.328		
	3	4.299		
150	1	4.612	4.884	0.237
	2	4.996		
	3	5.044		
180	1	3.520	3.621	0.090
	2	3.695		
	3	3.647		
210	1	4.661	5.117	0.961
	2	6.221		
	3	4.469		
240	1	4.504	4.255	0.341
	2	3.867		
	3	4.394		
270	1	4.333	4.993	0.622
	2	5.567		
	3	5.081		
300	1	2.534	2.762	0.469
	2	2.450		
	3	3.301		

t = tiempo (s); X = Dureza (N); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de X.

Fuente: Este estudio

C. Presión de 81 Kpa

Tabla 4.7. Datos obtenidos para el análisis de textura a temperatura de 120 °C

t	CORRIDAS	X	\bar{x}	σ
0	1	9.029	8.403	0.562
	2	8.237		
	3	7.942		
30	1	0.652	0.599	0.068
	2	0.622		
	3	0.522		
60	1	0.201	0.172	0.025
	2	0.158		
	3	0.156		
90	1	0.163	0.140	0.021
	2	0.132		
	3	0.124		
120	1	0.141	0.126	0.014
	2	0.114		
	3	0.124		
150	1	0.353	0.348	0.054
	2	0.400		
	3	0.292		
180	1	0.245	0.217	0.025
	2	0.196		
	3	0.210		
210	1	0.353	0.308	0.050
	2	0.254		
	3	0.316		
240	1	0.439	0.393	0.044
	2	0.390		
	3	0.351		
270	1	0.543	0.613	0.069
	2	0.614		
	3	0.681		
300	1	0.317	0.307	0.023
	2	0.282		
	3	0.324		

t = tiempo (s); X = Dureza (N); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de X.

Fuente: Este estudio

Tabla 4.8. Datos obtenidos para el análisis de textura a temperatura de 140 °C

t	CORRIDAS	X	\bar{x}	σ
0	1	9.029	8.403	0.562
	2	8.237		
	3	7.942		
30	1	0.371	0.381	0.059
	2	0.444		
	3	0.327		
60	1	0.313	0.344	0.053
	2	0.314		
	3	0.405		
90	1	3.046	3.511	0.517
	2	4.068		
	3	3.420		
120	1	1.577	1.784	0.225
	2	1.751		
	3	2.024		
150	1	4.704	5.096	0.542
	2	4.870		
	3	5.715		
180	1	4.329	3.930	0.346
	2	3.734		
	3	3.726		
210	1	6.237	5.305	0.865
	2	5.151		
	3	4.528		
240	1	5.039	6.008	0.881
	2	6.761		
	3	6.225		
270	1	4.352	4.699	0.739
	2	4.198		
	3	5.548		
300	1	4.709	4.210	0.449
	2	4.079		
	3	3.841		

t = tiempo (s); X = Dureza (N); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de X.

Fuente: Este estudio

Tabla 4.9. Datos obtenidos para el análisis de textura a temperatura de 140 °C

t	CORRIDAS	X	\bar{x}	σ
0	1	9.029	8.403	0.562
	2	8.237		
	3	7.942		
30	1	0.210	0.231	0.035
	2	0.271		
	3	0.212		
60	1	0.542	0.487	0.073
	2	0.405		
	3	0.515		
90	1	0.765	0.700	0.080
	2	0.611		
	3	0.723		
120	1	1.757	1.644	0.266
	2	1.341		
	3	1.836		
150	1	3.277	3.426	0.154
	2	3.417		
	3	3.584		
180	1	4.561	4.505	0.435
	2	4.910		
	3	4.046		
210	1	6.605	6.540	0.208
	2	6.709		
	3	6.307		
240	1	3.886	4.028	0.155
	2	4.193		
	3	4.003		
270	1	3.218	3.878	0.638
	2	4.490		
	3	3.927		
300	1	5.775	5.750	0.667
	2	6.405		
	3	5.072		

t = tiempo (s); X = Dureza (N); \bar{X} = promedio de X; σ = desviación estándar de X.

Fuente: Este estudio

ANEXO 5 DATOS ESTADÍSTICOS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE LA CINÉTICA DE PERDIDA DE AGUA

i. Modelo de Newton

Análisis de Varianza para K1 – Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A: Presión (Kpa)	0,000858692	2	0,000429346	14,94	0,0139
B: Temperatura (°C)	0,00141889	2	0,000709446	24,69	0,0056
RESIDUOS	0,000114955	4	0,0000287389		
TOTAL (CORREGIDO)	0,00239254	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para K1 por Presión (Kpa)

Método: 95,0 porcentaje LSD

Presión (Kpa)	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
81	3	0,02245	0,0030951	x
20	3	0,0385767	0,0030951	x
50	3	0,04582	0,0030951	x

ii. Modelo de Henderson - Pabis

Análisis de Varianza para K2 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A: Presión (Kpa)	0,000887511	2	0,000443755	16,14	0,0122
B: Temperatura (°C)	0,00147773	2	0,000738866	26,87	0,0048
RESIDUOS	0,00010999	4	0,0000274976		
TOTAL (CORREGIDO)	0,00247523	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para K2 por Presión (Kpa)

Método: 95,0 porcentaje LSD

Presión (Kpa)	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
81	3	0,0218967	0,00302752	x
20	3	0,03823	0,00302752	x
50	3	0,0456733	0,00302752	x

Análisis de Varianza para a - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A: Presión (Kpa)	0,00126961	2	0,000634804	3,40	0,1372
B: Temperatura (°C)	0,00209272	2	0,00104636	5,60	0,0692
RESIDUOS	0,000746978	4	0,000186744		
TOTAL (CORREGIDO)	0,00410931	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

iii. Modelo de Page

Análisis de Varianza para K3 - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Temperatura (°C)	0,112303	2	0,0561513	4,96	0,0167
B: Presión (Kpa)	0,219917	2	0,109959	9,71	0,0009
RESIDUOS	0,249071	4	0,0113214		
TOTAL (CORREGIDO)	0,581291	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para K3 por Presión (Kpa)

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>Presión (Kpa)</i>	<i>Cas os</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
81	9	0,0686589	0,0354674	x
20	9	0,148807	0,0354674	x
50	9	0,287157	0,0354674	x

Análisis de Varianza para n - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Presión (Kpa)	0,0403151	2	0,0201575	0,92	0,4687
B: Temperatura (°C)	0,0181271	2	0,00906357	0,41	0,6862
RESIDUOS	0,087505	4	0,0218763		
TOTAL (CORREGIDO)	0,145947	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

ANEXO 6 DATOS ESTADÍSTICOS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE LA CINÉTICA DE ABSORCIÓN DE ACEITE

i. Modelo de monod

Análisis de Varianza para ye1 (g aceite / g bs) - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A: Presión (Kpa)	2,33617	2	1,16808	12,44	0,0192
B: Temperatura (°C)	0,627556	2	0,313778	3,34	0,0009
RESIDUOS	0,37574	4	0,0939351		
TOTAL (CORREGIDO)	3,33946	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para ye1 (g aceite / g bs) por P (Kpa)

Método: 95,0 porcentaje LSD

Presión (Kpa)	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
20	3	1,67567	0,176951	X
50	3	2,042	0,176951	X
81	3	2,892	0,176951	X

Análisis de Varianza para b (s) - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A: Presión (Kpa)	1,5117	2	0,55851	1,48	0,0301
B: Temperatura (°C)	1,78667	2	0,893333	0,02	0,0027
RESIDUOS	2,04161	4	1,0402		
TOTAL (CORREGIDO)	5,33998	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para b (s) por P (Kpa)

Método: 95,0 porcentaje LSD

P (Kpa)	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
50	3	5,0933	0,12473	X
20	3	5,7933	0,12473	X
81	3	2,1833	0,12473	X

MOYANO-PEDRESCHI

Análisis de Varianza para ye2 (g aceite / g bs) - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A: Presión (Kpa)	2,33617	2	1,16808	12,44	0,0192
B: Temperatura (°C)	0,627556	2	0,313778	3,34	0,0140
RESIDUOS	0,37574	4	0,0939351		
TOTAL (CORREGIDO)	3,33946	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para ye2 (g aceite / g bs) por P (Kpa)

Método: 95,0 porcentaje LSD

Presión (Kpa)	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
20	3	1,67567	0,176951	X
50	3	2,042	0,176951	X
81	3	3,71767	0,176951	X

Análisis de Varianza para K1 (s-1) - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Presión (Kpa)	0,0949219	2	0,0474609	2,47	0,002
B: Temperatura (°C)	0,0956169	2	0,0478084	0,02	0,0076
RESIDUOS	0,0769483	4	0,0192371		
TOTAL (CORREGIDO)	0,267487	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para K1 (s-1) por P (Kpa)

Método: 95,0 porcentaje LSD

Presión (Kpa)	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
20	3	0,0424333	0,00800772	x
50	3	0,0483867	0,00800772	x
81	3	0,0865767	0,00800772	x

ii. Modelo exponencial de primer orden
Análisis de Varianza para ye3 (g aceite / g bs) - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Presión (Kpa)	0,897856	2	0,448928	14,17	0,0153
B: Temperatura (°C)	0,106468	2	0,0532341	1,68	0,2953
RESIDUOS	0,12673	4	0,0316824		
TOTAL (CORREGIDO)	1,13105	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para ye3 (g aceite / g bs) por P (Kpa)

Método: 95,0 porcentaje LSD

P (Kpa)	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
20	3	1,49667	0,102766	x
50	3	1,88633	0,102766	x
81	3	2,27033	0,102766	x

Análisis de Varianza para K2 (s-1) - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Presión (Kpa)	0,000170973	2	0,0000854866	2,32	0,2140
B: Temperatura (°C)	0,0000699487	2	0,0000349743	0,10	0,9113
RESIDUOS	0,000147158	4	0,0000367895		
TOTAL (CORREGIDO)	0,000325126	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para K2 (s-1) por P (Kpa)

Método: 95,0 porcentaje LSD

Presión (Kpa)	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
20	3	0,0288833	0,00350188	x
50	3	0,02868	0,00350188	x
81	3	0,034675	0,00350188	x

ANEXO 7 DATOS ESTADÍSTICOS DEL CONTENIDO DE AGUA

Análisis de Varianza para X (g de agua/ g sólido seco) - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: tiempo (s)	208,314	10	20,8314	719,14	0,0000
B: Temperatura (°C)	4,87715	2	2,43857	84,18	0,0000
C: Presión (Kpa)	3,06024	2	1,53012	52,82	0,0000
RESIDUOS	8,16873	282	0,0289671		
TOTAL (CORREGIDO)	224,42	296			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para humedad (BS) por tiempo (s) a presión 20 Kpa

Método: 95,0 porcentaje LSD

tiempo (s)	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
300	9	0,0537444	0,0408258	X
270	9	0,0634556	0,0408258	X
240	9	0,0760889	0,0408258	X
210	9	0,0789333	0,0408258	X
180	9	0,105533	0,0408258	XX
150	9	0,131311	0,0408258	XX
120	9	0,196722	0,0408258	XX
90	9	0,285222	0,0408258	XX
60	9	0,396678	0,0408258	X
30	9	0,888033	0,0408258	X
0	9	3,0449	0,0408258	X

Pruebas de Múltiple Rangos para humedad (BS) por tiempo (s) a presión 50 Kpa

Método: 95,0 porcentaje LSD

Col_14	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
300	9	0,0327889	0,050167	X
270	9	0,0593	0,050167	X
240	9	0,0640778	0,050167	X
210	9	0,0726111	0,050167	X
180	9	0,102544	0,050167	XX
150	9	0,118022	0,050167	XX
120	9	0,146044	0,050167	XX
90	9	0,231578	0,050167	XX
60	9	0,335722	0,050167	X
30	9	0,811444	0,050167	X
0	9	3,0449	0,050167	X

Pruebas de Múltiple Rangos para humedad (BS) por tiempo (s) a presión 81 Kpa

Método: 95,0 porcentaje LSD

Col_8	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
300	9	0,148311	0,049252	X
240	9	0,161556	0,049252	X
270	9	0,1616	0,049252	X
210	9	0,179233	0,049252	X
180	9	0,231578	0,049252	XX
150	9	0,333667	0,049252	XX
120	9	0,428544	0,049252	X
90	9	0,567833	0,049252	X
60	9	0,802789	0,049252	X
30	9	1,46401	0,049252	X
0	9	3,0449	0,049252	X

ANEXO 8 DATOS ESTADÍSTICOS DEL CONTENIDO DE ACEITE

Análisis de Varianza para Aceite Bs - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Presión (Kpa)	15,77	2	7,885	307,12	0,0000
B: tiempo (s)	4,48905	9	0,498784	19,43	0,0000
C: Temperatura (°C)	4,03449	2	2,01725	78,57	0,0000
RESIDUOS	1,95123	76	0,0256741		
TOTAL (CORREGIDO)	26,2448	89			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para Aceite Bs por tiempo (s) a presión de 20 Kpa

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>tiempo (s)</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
30	3	0,860333	0,0261199	x
60	3	1,26767	0,0261199	x
90	3	1,39067	0,0261199	x
120	3	1,40667	0,0261199	x
150	3	1,43567	0,0261199	xx
180	3	1,468	0,0261199	xxx
300	3	1,51267	0,0261199	xx
210	3	1,51667	0,0261199	x
240	3	1,53	0,0261199	x
270	3	1,53567	0,0261199	x

Pruebas de Múltiple Rangos para BSP2 por tiempo (s) a presión de 50 Kpa

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>tiempo (s)</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
30	3	1,36567	0,0219868	x
60	3	1,68533	0,0219868	x
90	3	1,76367	0,0219868	x
120	3	1,8	0,0219868	xx
150	3	1,83033	0,0219868	xx
180	3	1,88	0,0219868	xx
210	3	1,913	0,0219868	xx
300	3	1,91833	0,0219868	xx
240	3	1,952	0,0219868	x
270	3	1,96633	0,0219868	x

Pruebas de Múltiple Rangos para BSP3 por tiempo (s) a presión de 81 Kpa

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>tiempo (s)</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
30	3	1,62433	0,0872888	x
60	3	2,075	0,0872888	x
90	3	2,329	0,0872888	xx
150	3	2,51633	0,0872888	xx
300	3	2,51767	0,0872888	xx
120	3	2,534	0,0872888	xx
180	3	2,59267	0,0872888	x
240	3	2,617	0,0872888	x
210	3	2,654	0,0872888	x
270	3	2,659	0,0872888	x

ANEXO 9 DATOS ESTADÍSTICOS DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA

Análisis de Varianza para Deff - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Temperatura (°C)	0,115088	2	0,057544	72,86	0,0007
B: Presión (Kpa)	0,703805	2	0,351903	445,59	0,0000
RESIDUOS	0,00315901	4	0,000789753		
TOTAL (CORREGIDO)	0,822052	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para Deff por Presión (Kpa)

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>Presión (Kpa)</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
20	3	2,0102	0,016225	x
50	3	2,05883	0,016225	x
81	3	2,62623	0,016225	x

ANEXO 10 DATOS ESTADÍSTICOS DE COLOR

i. Parámetro L*

Análisis de Varianza para L - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Presion (Kpa)	458,991	2	229,496	18,14	0,0000
B: Temperatura (°C)	22,1126	2	11,0563	0,87	0,4211
C: tiempo (s)	1314,83	10	131,483	10,39	0,0000
RESIDUOS	1062,71	84	12,6513		
TOTAL (CORREGIDO)	2858,65	98			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para L por tiempo (s)

Método: 95,0 porcentaje LSD

tiempo (s)	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
0	9	52,077	1,18562	X
90	9	61,3516	1,18562	X
30	9	61,9111	1,18562	XX
60	9	62,1249	1,18562	XX
120	9	62,2171	1,18562	XX
180	9	64,023	1,18562	XXX
240	9	64,7081	1,18562	XX
270	9	64,7586	1,18562	XX
150	9	64,817	1,18562	XX
210	9	65,1841	1,18562	XX
300	9	65,8008	1,18562	X

ii. Parámetro a

Análisis de Varianza para a - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Presión (Kpa)	14,7734	2	7,3867	11,06	0,0001
B: Temperatura (°C)	10,4955	2	5,24775	7,86	0,0007
C: tiempo (s)	35,2696	10	3,52696	5,28	0,0000
RESIDUOS	56,1061	84	0,66793		
TOTAL (CORREGIDO)	116,645	98			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para a por tiempo (s)

Método: 95,0 porcentaje LSD

tiempo (s)	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
30	9	-1,25067	0,272423	X
0	9	-0,763	0,272423	XX
60	9	-0,752667	0,272423	XX
90	9	-0,344667	0,272423	XX
120	9	-0,101444	0,272423	XXX
150	9	0,0154444	0,272423	XX
210	9	0,254111	0,272423	XXX
240	9	0,298111	0,272423	XXX
180	9	0,345111	0,272423	XXX
270	9	0,473111	0,272423	XX
300	9	0,82	0,272423	X

iii. **Parámetro b**

Análisis de Varianza para b - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Presión (Kpa)	52,1286	2	26,0643	4,22	0,0180
B: Temperatura (°C)	7,54964	2	3,77482	0,61	0,5453
C: tiempo (s)	74,7507	10	7,47507	1,21	0,2969
RESIDUOS	519,135	84	6,18018		
TOTAL (CORREGIDO)	653,564	98			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para b por tiempo (s)

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>tiempo (s)</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
150	9	4,73967	0,828666	X
180	9	4,94411	0,828666	X
210	9	5,43622	0,828666	X
240	9	5,65589	0,828666	X
120	9	5,88033	0,828666	X
60	9	5,89844	0,828666	X
300	9	6,04633	0,828666	XX
30	9	6,05244	0,828666	XX
270	9	6,07422	0,828666	XX
90	9	6,12378	0,828666	XX
0	9	8,277	0,828666	X

ANEXO 11 DATOS ESTADÍSTICOS DE TEXTURA

Análisis de Varianza para Textura (N) - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: tiempo (s)	286,154	10	28,6154	7,95	0,0000
B: Temperatura (°C)	34,6087	2	17,3044	4,81	0,0106
C: Presión (Kpa)	100,658	2	50,3291	13,98	0,0000
RESIDUOS	302,455	84	3,60066		
TOTAL (CORREGIDO)	723,877	98			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para Textura (N) por tiempo (s)

Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>tiempo (s)</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
60	9	1,87067	0,632514	x
30	9	2,13344	0,632514	x
90	9	2,62256	0,632514	xx
120	9	3,92011	0,632514	xx
180	9	4,26644	0,632514	xx
240	9	4,57144	0,632514	x
300	9	4,666	0,632514	x
210	9	4,81178	0,632514	x
150	9	4,84511	0,632514	x
270	9	5,09967	0,632514	x
0	9	8,403	0,632514	x