

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE**  
**NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA SOBRE LA CINÉTICA DE  
SECADO DE FRIJOL (*Vigna Unguiculata*), UTILIZANDO UN SECADOR  
DISCONTINUO DE BANDEJAS**

**REALIZADO POR:**

**Br. HENDALYS LOURDES BRITO SOSA**

**Br. KARLA PAOLA MARÍN CAMPOS**

**Trabajo de Grado presentado ante la Ilustre Universidad de Oriente como  
Requisito Parcial para optar al Título de Ingeniero Químico**

Barcelona, abril de 2010

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE**  
**NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA SOBRE LA CINÉTICA DE  
SECADO DE FRIJOL (*Vigna Unguiculata*), UTILIZANDO UN SECADOR  
DISCONTINUO DE BANDEJAS**

**ASESOR**

---

**Ing. Químico Petra Martínez (M.Sc.)**

Asesor Académico

Barcelona, abril de 2010

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE**  
**NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA SOBRE LA CINÉTICA DE  
SECADO DE FRIJOL (*Vigna Unguiculata*), UTILIZANDO UN SECADOR  
DISCONTINUO DE BANDEJAS**

**JURADO CALIFICADOR**

---

**Ing. Químico Petra Martínez (M.Sc)**

Asesor Académico

---

**Ing. Químico Héctor Silva (M.Sc)**

Jurado Principal

---

**Ing. Químico Yaneis Obando (M.Sc)**

Jurado Principal

Barcelona, abril de 2010

## **RESOLUCIÓN**

De acuerdo al artículo 41 del Reglamento de Trabajos de Grado de la Universidad de Oriente: “Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien le participara al Consejo Universitario”

## **DEDICATORIA**

A Dios padre todo poderoso y a la Virgen del Amparo por iluminarme durante el recorrido de este camino para alcanzar esta meta.

A mis padres Damelis Sosa y Henry Brito por siempre estar presentes en mi vida, ser mi más grande motivación y apoyo.

A la memoria de mi abuela Benicia “*mi santica*” por ser una persona especial conmigo y llenarme siempre de su cariño incondicional.

***Hendalys Lourdes Brito Sosa***

## **DEDICATORIA**

A Dios todopoderoso y a la Virgen del Valle, por guiarme siempre por el buen camino, por ser mi fuente generadora de luz y mi motivo de inspiración, por darme fortaleza para seguir siempre adelante después de cualquier tropiezo para poder cristalizar hoy este anhelado sueño.

A mis padres Carlos Marín e Iraida Campos, primeramente por darme la oportunidad de vivir, por ser unos seres maravillosos, luchadores, capaces de llevarme por el camino del bien, a través de sus enseñanzas y consejos. Gracias por toda su dedicación, paciencia, ayuda incondicional, por ser simplemente los ángeles de mi vida, sin ustedes nada de esto sería posible. Los Amo.

A la memoria de mis abuelos Santos, Anselma y Ricardo estén donde estén hoy en día este triunfo también es suyo.

A mi abuela Luisa Campos por ser mi mayor admiración. Te amo.

A mis hermanos por confiar en mí, apoyarme siempre y estar allí cuando más los he necesitado, gracias a ustedes todos y cada uno de los días de mi vida han sido maravillosos. Los amo.

A mi familia en general por ayudarme en todo momento.

A Víctor Marín por su apoyo incondicional, por acompañarme día a día a lo largo de mi carrera y que con todo su amor y paciencia me enseñó a seguir adelante a pesar de los obstáculos para poder realizar esta meta. Te Amo.

***Karla Paola Marín Campos***

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres Henry y Damelis por creer en mí, no tengo palabras para agradecerles tanto amor y buenos consejos en momentos de desesperanzas y recordarme siempre que la humildad es la credencial de la inteligencia, les agradezco de corazón todo lo que han hecho, estuvieron siempre presentes en alcanzar esta meta, le doy gracias a Dios por tenerlos como padres, los amo.

A mis Hermanos Hendrina y Hender, por siempre estar ahí, escucharme y abrazar cuando siempre lo necesite, son mis mejores amigos, los adoro.

A la Profesora Petra Martínez, por brindarme la oportunidad de trabajar con usted, por ser una excelente asesora, por darnos siempre su apoyo y colaboración incondicional.

Al Profesor Lucas Álvarez por ser un docente excepcional y por darnos todo el apoyo en este proyecto, además de dedicar su tiempo en brindar conocimientos y estar presente cuando lo necesitamos.

Al Profesor Hernán Raven, Alexis Cova y Lubhetxis Santaella por ser unos excelentes profesores y darme las razones que necesite para amar a mi carrera.

A mis Amigos los de la Aldea Cumanesa, muchachos hicieron de mis días en la UDO días de diversión y anécdotas inolvidables los quiero mucho.

A mi Amiga de siempre Giamer Luces, por su apoyo incondicional y desinteresado, eres una excelente persona y como amiga eres lo máximo, no habrá obstáculos ni distancia que pueda contra nuestra amistad te quiero y admiro mucho.

A mis amigas Marcelys Adriana y Adriber, por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas brindándome su apoyo, las quiero mucho.

A mis amigos incondicionales Leo, Rafa y Gra, porque aparte de ser un grupo de estudio excelente jamás pensé que podrían ser tan buenos amigos, hemos compartidos tantas cosas que jamás olvidare; serán de esas anécdotas de contarles a tus hijos y nietos, los quiero muchísimo.

A mis amigos Andrés, Roberto, José Carlos, Carlitos, Chaqui, Macadams, Rosio, Maria Gabriela, Daniel Barreiro, Pedro Alcalá y en especial a Carlos Marín y Víctor Marín “mi compadre” por siempre estar ahí brindándome su apoyo y colaboración incondicional, son lo máximo.

A mi compañera de tesis y amiga Karla Marín por asumir este proyecto de investigación conmigo, además de a la Familia Marín Campos por ayudarme incondicionalmente.

A la Universidad de Oriente, profesores y compañeros de estudio.

*Hendalys Lourdes Brito Sosa*

## **AGRADECIMIENTOS**

A todas las personas que de una u otra manera me ayudaron a realizar este sueño, especialmente:

A mis padres por brindarme su apoyo incondicional y darme la oportunidad de realizarme a nivel profesional.

A la Profesora Petra Martínez, quien me dio la oportunidad de desarrollar este trabajo bajo su asesoría, gracias por la confianza y por brindarme de manera incondicional todo su apoyo.

Al profesor Lucas Álvarez una excelente persona que tuve el privilegio de conocer en las entrañas de la universidad, gracias por su apoyo incondicional y por ser un ejemplo a seguir.

A los profesores que de una u otra manera hicieron un aporte en mi formación profesional, especialmente: Alexis Cova, Hernán Raven, Ronald Arias, Alicia Ríos, Sórída Durán, Lubhexis Santaella y Luís Moreno.

A la T.S.U. Gladys Peña por su valiosa colaboración y apoyo.

A mi novio Víctor Marín que siempre me ha apoyado y ayudado en todos los aspectos de mi vida sin interés alguno. Te Amo.

A las familias Marín Romero y Chacón Camacho por abrirme las puertas de su hogar y tratarme como una hija más. Gracias.

A mis amigos y hermanos Rosío Chacón (la gocha) y José Rodríguez (el cubano) por ser un pilar fundamental a lo largo de mi carrera, gracias porque con ustedes pase momentos increíbles en este camino, siempre tendrán un lugar muy especial en mi corazón. Los adoro.

A mis amigos y compañeros con los que viví momentos inolvidables: Carlos Álvarez, Grace, Leo, Yoscary, Angélica, María Graciela Freddy, Zoraida, Yohana, Mary, Leonor, guille, José Ángel, María Gabriela, César, Liliana, José Antonio, Aleixa, Daniel Barreiro, José César, Desiree, Manuel Martínez, Orviannys, Adriannys y Getsay.

A toda mi familia, de manera especial a mis tíos: Ysaura, Estilita, Ricardo y Pedro y a mis primos Yraly, Andrea y Nathaly.

A mi amiga y compañera de tesis Hendarlys Brito por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto, a sus padres y familiares por todo el apoyo brindado.

A la Universidad de Oriente por darme la formación profesional, en la que viví las mejores experiencias de mi vida.

Karla Paola Marín Campo

## RESUMEN

En el presente trabajo se estudió la influencia de la temperatura sobre la cinética de secado del frijol (*Vigna Unguiculata*), utilizando un secador discontinuo de bandeja, en el Laboratorio de Alimentos de la Universidad de Oriente, núcleo Anzoátegui. Para cumplir con el objetivo planteado, se efectuaron corridas experimentales utilizando frijol con una humedad establecida de 14,45% y en un rango de temperatura de 30 °C a 60 °C. Se construyeron curvas de secado, que se ajustaron por medio del programa Statgraphics Plus 5.1, identificándose sólo el período de velocidad decreciente y observándose que al aumentar la temperatura cada 10 °C, se redujo considerablemente el tiempo de secado del frijol, obteniéndose menores tiempos a 60 °C. Esto es indicativo de que al aumentar la temperatura, se incrementa la velocidad de secado y por lo tanto la cantidad de agua evaporada. Con base a la obtención de un solo período de secado, se aplicó la segunda Ley de Fick en el intervalo de temperatura de 30 °C a 60 °C, y se concluyó que el mecanismo que predomina en el secado del frijol, es la difusión de la humedad del interior del sólido. La difusividad efectiva aumentó con la temperatura, mostrando valores de  $2,19 \cdot 10^{-09}$  m<sup>2</sup>/s para 30 °C y  $4,17 \cdot 10^{-09}$  m<sup>2</sup>/s para 60 °C. La variación de la difusividad con respecto a la temperatura fue descrita por la Ecuación de Arrhenius, ajustada por regresión lineal y dando como resultado una Energía de Activación en promedio de 17,15 kJ/mol. Con respecto a la caracterización fisicoquímica y funcional del frijol seco, se observó que no hubo efecto significativo en su calidad, dentro del rango de temperatura estudiado.

## CONTENIDO

|  |       |
|--|-------|
| RESOLUCIÓN .....   | iv    |
| DEDICATORIA .....  | v     |
| DEDICATORIA .....  | vi    |
| AGRADECIMIENTOS .....  | vii   |
| AGRADECIMIENTOS .....  | ix    |
| RESUMEN .....  | xi    |
| CONTENIDO .....  | xii   |
| LISTA DE FIGURA .....  | xvii  |
| INDICE DE TABLAS .....   | xviii |
| CAPITULO I .....   | 23    |
| INTRODUCCIÓN .....   | 23    |
| 1.1 Planteamiento del problema .....                                       | 25    |
| 1.2 Objetivos .....  | 27    |
| 1.2.1 Objetivo general .....   | 27    |
| 1.2.2 Objetivos específicos .....  | 28    |
| CAPITULO II .....  | 29    |
| MARCO TEÓRICO .....  | 29    |
| 2.1 Antecedentes .....   | 29    |
| 2.2 Origen y características del frijol ( <i>VIGNA UNGUICULATA</i> ) ..... | 31    |
| 2.2.1 Estructura básica del frijol .....                                   | 32    |
| 2.2.2 Composición nutricional .....  | 34    |
| 2.2.3 Características fisicoquímicas .....                                 | 36    |
| 2.2.3.1 Humedad .....  | 36    |
| 2.2.3.2 Cenizas .....  | 36    |
| 2.2.3.3 Grasa .....  | 37    |
| 2.2.3.4 Proteínas (Nitrógeno de Kjeldahl) .....                            | 37    |

|  |    |
|--|----|
| 2.2.4 Características funcionales .....  | 39 |
| 2.2.4.1 Índice de absorción de agua.....   | 40 |
| 2.2.4.2 Índice de solubilidad del agua .....   | 40 |
| 2.3 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DEL SECADO.....   | 41 |
| 2.3.1 Definición de Secado .....   | 41 |
| 2.3.2 Mecanismos de secado.....  | 41 |
| 2.4 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS ASOCIADOS AL SECADO .....   | 43 |
| 2.4.1 Contenido de Humedad .....   | 43 |
| 2.4.2 Humedad ligada .....   | 44 |
| 2.4.3 Humedad no ligada.....   | 45 |
| 2.4.4 Humedad de equilibrio $X^*$ .....  | 45 |
| 2.4.5 Humedad libre .....  | 45 |
| 2.5 CURVAS DE SECADO.....  | 46 |
| 2.6 CLASIFICACIÓN DE LOS SECADORES.....  | 50 |
| 2.6.1 Tipos de secadores directos .....  | 50 |
| 2.6.2 Contacto del sólido y gas dentro del secador.....                                      | 52 |
| 2.7 DESCRIPCIÓN DEL SECADOR DISCONTINUO DE BANDEJA O<br>COMPARTIMIENTOS .....                | 54 |
| 2.8 TEORÍA DE LA DIFUSIÓN DE LIQUIDOS EN EL SECADO.....                                      | 56 |
| 2.8.1 Proceso de difusión en el secado de sólidos .....                                      | 56 |
| 2.8.2 La difusión en la transferencia de materia .....                                       | 57 |
| 2.8.3 Comparación entre la difusión y la transferencia de calor.....                         | 58 |
| 2.8.4 Difusión del líquido en el proceso de secado.....                                      | 59 |
| 2.8.5 Ecuación de Arrhenius.....   | 61 |
| CAPITULO III .....   | 63 |
| DESARROLLO DEL PROYECTO .....  | 63 |
| 3.1 ESCOGENCIA DE LA HUMEDAD INICIAL A UTILIZARSE EN EL<br>PROCESO DE SECADO DE FRIJOL ..... | 63 |
| 3.1.1. Acondicionamiento del secador .....   | 63 |

|   |     |
|---|-----|
| 3.1.2. Selección de la carga .....  | 64  |
| 3.1.3. Determinación de la humedad en base húmeda del sólido  | 65  |
| 3.2 REPRODUCCIÓN DE LAS CURVAS DE VELOCIDAD DE SECADO<br>DE FRIJOL, A DIFERENTES TEMPERATURAS.....                        | 65  |
| 3.2.1 Método de la estufa para la determinación de la masa del<br>sólido totalmente seco .....                            | 65  |
| 3.2.2 Proceso de secado de frijol en secador discontinuo de<br>bandejas .....   | 66  |
| 3.2.3 Curvas de velocidad de secado de frijol .....   | 67  |
| 3.3 OBTENCIÓN DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA DEL AGUA<br>APLICANDO LA SEGUNDA LEY DE FICK, A DIFERENTES<br>TEMPERATURAS ..... | 68  |
| 3.4 CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA Y FUNCIONAL DEL<br>PRODUCTO A LAS CONDICIONES OBTENIDAS .....                            | 68  |
| 3.4.1 Preparación de las harinas .....  | 68  |
| 3.4.2 Caracterización fisicoquímica y funcional de la harina de frijol<br>.....   | 69  |
| 3.4.2.1 Determinación de la humedad empleando la balanza automática<br>Ohaus .....  | 69  |
| 3.4.2.2. Determinación de proteína empleando el Método de Kjeldahl.<br>Norma COVENIN 1195-80. ....                        | 69  |
| 3.4.2.3 Determinación de ceniza. Norma COVENIN 1783-81. ....  | 70  |
| 3.4.2.4 Determinación de grasa. Norma COVENIN 1785-81. ....   | 70  |
| 3.4.2.5 Obtención del índice de absorción de agua (IAA).....  | 71  |
| 3.4.2.6 Obtención del índice de solubilidad en agua (ISA).....  | 71  |
| 3.5 EQUIPOS, MATERIALES, SUSTANCIAS .....   | 72  |
| 3.6 TABLAS DE DATOS .....   | 74  |
| 3.7 MUESTRA DE CÁLCULO .....  | 102 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.7.1 Determinación del contenido de humedad inicial en base húmeda del sólido a secar, para llevar el frijol a la condición de cosecha .....                                  | 102 |
| 3.7.2 Reproducción de la curva de velocidad de secado de frijol ( <i>Vigna Unguiculata</i> ) a diferentes temperaturas.....  | 104 |
| 3.7.3 Cálculo del coeficiente de difusión efectivo del agua a diferentes temperaturas de secado por la ecuación de Fick.....   | 108 |
| 3.7.4 Efecto de la temperatura sobre el coeficiente de difusión efectivo del agua mediante la ecuación de Arrhenius y determinación de la energía de activación ( $E_a$ )..... | 111 |
| 3.7.5. Caracterizaciones fisicoquímicas y funcionales del producto a las condiciones obtenidas.....  | 113 |
| CAPITULO IV .....  | 116 |
| DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....   | 116 |
| 4.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....   | 116 |
| 4.1.1 Escogencia de la humedad inicial a utilizarse en el proceso de secado de frijol.....   | 116 |
| 4.1.2 Reproducción de las curvas de velocidad de secado de frijol, a diferentes temperaturas .....   | 117 |
| 4.1.2.1 Curva de humedad en función del tiempo .....   | 117 |
| 4.1.2.2 Velocidad de secado .....  | 120 |
| 4.1.3 Obtención la difusividad efectiva del agua aplicando la Segunda Ley de Fick, a diferentes temperaturas.....  | 122 |
| 4.1.4 Cálculo de la energía de activación requerida para la difusión de la humedad a través del sólido, utilizando la Ecuación de Arrhenius .....                              | 126 |
| 4.1.5 Caracterizaciones fisicoquímicas y funcionales del producto a las condiciones obtenidas.....   | 128 |
| 4.1.5.1 Propiedades Fisicoquímicas .....   | 129 |
| 4.1.5.2. Propiedades funcionales .....   | 131 |
| 4.2 CONCLUSIONES.....  | 135 |

|   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| 4.3 RECOMENDACIONES .....                               | 136                                  |
| BIBLIOGRAFÍA .....                                      | 137                                  |
| ANEXOS .....  | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO: .... | 144                                  |

## LISTA DE FIGURA

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura 2.3.</b> Estructura del grano de frijol <sup>[23]</sup> .....   | 33  |
| <b>Figura 2.4.</b> Producción de leguminosas de grano (caraota, frijol y quinchoncho) en Venezuela durante el periodo 1997-2006 <sup>[24]</sup> .....   | 35  |
| <b>Figura 2.5</b> Relaciones existentes entre los diferentes tipos de humedades <sup>[38]</sup> ..  | 46  |
| <b>Figura 2.6</b> Contenido de humedad en función del tiempo.....   | 47  |
| <b>Figura 2.7</b> Velocidad de secado en función de la humedad. ....  | 47  |
| <b>Figura 2.8</b> Modelos de interacción gas-sólido en secaderos: (a) flujo de gas sobre un lecho estático de sólidos; (b) flujo de gas a través de un lecho de sólidos; (c) acción en un secadero rotatorio; (d) lecho fluidizado de sólidos; (e) flujo en paralelo gas-sólido en un secadero flash de transporte neumático <sup>[2]</sup> ..... | 54  |
| <b>Figura 2.9</b> Secador de bandejas o anaqueles <sup>[4]</sup> .....  | 55  |
| <b>Figura 4.1.</b> Curvas de humedad libre en función del tiempo de secado del frijol ( <i>Vigna Unguiculata</i> ) a diferentes temperaturas. ....  | 119 |
| <b>Figura 4.2.</b> Curvas de velocidad de secado del frijol ( <i>Vigna Unguiculata</i> ) a diferentes temperaturas. ....  | 122 |
| <b>Figura 4.3.</b> Correlación logarítmica de la segunda Ley de Fick, para el cálculo de la difusividad efectiva a las temperaturas evaluadas.....  | 123 |
| <b>Figura 4.4.</b> Logaritmo natural de la difusividad en función del inverso de la temperatura para las diferentes corridas.....   | 127 |
| <b>Figura 4.5.</b> Índice de absorción de agua en función de las temperaturas evaluadas .....   | 132 |

## INDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 2.1.</b> Composición nutricional promedio de una semilla de frijol <sup>[25]</sup> .....   | 34 |
| <b>Tabla 2.2.</b> Factores de conversión. Nitrógeno - Proteínas <sup>[32]</sup> . .....   | 38 |
| <b>Tabla 2.2.</b> Factores de conversión. Nitrógeno – Proteínas (Continuación) <sup>[32]</sup> ..   | 38 |
| <b>Tabla 2.3.</b> Modelos matemáticos para el estudio de difusividad <sup>[16]</sup> .....  | 60 |
| <b>Tabla 3.1.</b> Volumen de agua agregada y recogida por el sólido para una carga de 460 g, para la determinación de la humedad en base húmeda entre el 14% y 15%. ..... | 75 |
| <b>Tabla 3.2.</b> Datos obtenidos para determinar la humedad en base húmeda y en base seca por el método de la estufa para la experiencia a 30 °C. ....                   | 75 |
| <b>Tabla 3.3.</b> Datos obtenidos para determinar la humedad en base húmeda y en base seca por el método de la estufa para la experiencia a 40 °C. ....                   | 76 |
| <b>Tabla 3.4.</b> Datos obtenidos para determinar la humedad en base húmeda y en base seca por el método de la estufa para la experiencia a 50 °C. ....                   | 76 |
| <b>Tabla 3.5.</b> Datos obtenidos para determinar la humedad en base húmeda y en base seca por el método de la estufa para la experiencia a 60 °C. ....                   | 77 |
| <b>Tabla 3.6.</b> Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 30 °C .....   | 78 |
| <b>Tabla 3.7.</b> Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 30 °C .....   | 79 |
| <b>Tabla 3.8.</b> Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 30 °C .....   | 80 |
| <b>Tabla 3.9.</b> Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 40 °C .....   | 81 |
| <b>Tabla 3.10.</b> Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 40 °C .....  | 82 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 3.11.</b> Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 40 °C .....  | 83 |
| <b>Tabla 3.12.</b> Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 50 °C .....  | 84 |
| <b>Tabla 3.13.</b> Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 50 °C .....  | 85 |
| <b>Tabla 3.14.</b> Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 50 °C .....  | 86 |
| <b>Tabla 3.15.</b> Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 60 °C .....  | 87 |
| <b>Tabla 3.16.</b> Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 60 °C .....  | 88 |
| <b>Tabla 3.17.</b> Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 60 °C .....  | 89 |
| <b>Tabla 3.18.</b> Humedad en base húmeda de la harina del sólido antes del proceso de secado utilizando la Balanza Ohaus a 70 °C. ....   | 90 |
| <b>Tabla 3.19.</b> Humedad en base húmeda de la harina del sólido secado a 30 °C, utilizando la Balanza Ohaus a 70 °C. ....   | 91 |
| <b>Tabla 3.20.</b> Humedad en base húmeda de la harina del sólido secado a 40 °C, utilizando la Balanza Ohaus a 70 °C. ....   | 92 |
| <b>Tabla 3.21.</b> Humedad en base húmeda de la harina del sólido secado a 50 °C, utilizando la Balanza Ohaus a 70 °C. ....   | 93 |
| <b>Tabla 3.22.</b> Humedad en base húmeda de la harina del sólido secado a 60 °C, utilizando la Balanza Ohaus a 70 °C. ....   | 94 |
| <b>Tabla 3.23.</b> Valores obtenidos para determinar el porcentaje de grasa cruda en la muestra de harina del sólido, antes del proceso de secado según Norma COVENIN 1785-81. .... | 95 |
| <b>Tabla 3.24.</b> Valores obtenidos para determinar el porcentaje de grasa cruda en la muestra de harina del sólido, secado a 30 °C según Norma COVENIN 1785-81. .                 | 95 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 3.25.</b> Valores obtenidos para determinar el porcentaje de grasa cruda en la muestra de harina del sólido, secado a 40 °C según Norma COVENIN 1785-81. .                   | 95 |
| <b>Tabla 3.26.</b> Valores obtenidos para determinar el porcentaje de grasa cruda en la muestra de harina del sólido, secado a 50 °C según Norma COVENIN 1785-81. .                   | 96 |
| <b>Tabla 3.27.</b> Valores obtenidos para determinar el porcentaje de grasa cruda en la muestra de harina del sólido, secado a 60 °C según Norma COVENIN 1785-81. .                   | 96 |
| <b>Tabla 3.28.</b> Datos utilizados para obtener el porcentaje de ceniza presente en la muestra de harina del sólido, antes del proceso de secado según Norma COVENIN 1783-81. ....   | 96 |
| <b>Tabla 3.29.</b> Datos utilizados para obtener el porcentaje de ceniza presente en la muestra de harina del sólido, secado a 30 °C según Norma COVENIN 1783-81. ....                | 97 |
| <b>Tabla 3.30.</b> Datos utilizados para obtener el porcentaje de ceniza presente en la muestra de harina del sólido, secado a 40 °C según Norma COVENIN 1783-81. ....                | 97 |
| <b>Tabla 3.31.</b> Datos utilizados para obtener el porcentaje de ceniza presente en la muestra de harina del sólido, secado a 50 °C según Norma COVENIN 1783-81. ....                | 97 |
| <b>Tabla 3.32.</b> Datos utilizados para obtener el porcentaje de ceniza presente en la muestra de harina del sólido, secado a 60 °C según Norma COVENIN 1783-81. ....                | 98 |
| <b>Tabla 3.33.</b> Datos obtenidos para determinar el porcentaje de Nitrógeno presente en la harina del sólido antes del secado, según Norma COVENIN 1195-80, con HCl (0,1037 N)..... | 98 |
| <b>Tabla 3.34.</b> Datos obtenidos para determinar el porcentaje de Nitrógeno presente en la harina del sólido secado a 30 °C, según Norma COVENIN 1195-80, con HCl (0,1037 N).....   | 98 |
| <b>Tabla 3.35.</b> Datos obtenidos para determinar el porcentaje de Nitrógeno presente en la harina del sólido secado a 40 °C, según Norma COVENIN 1195-80, con HCl (0,1037 N).....   | 99 |
| <b>Tabla 3.36.</b> Datos obtenidos para determinar el porcentaje de Nitrógeno presente en la harina del sólido secado a 50 °C, según Norma COVENIN 1195-80, con HCl (0,1003 N).....   | 99 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabla 3.37.</b> Datos obtenidos para determinar el porcentaje de Nitrógeno presente en la harina del sólido secado a 60 °C, según Norma COVENIN 1195-80, con HCl (0,1003 N)..... | 99  |
| <b>Tabla 3.38.</b> Determinación del índice de absorción y de solubilidad en agua para la harina del sólido antes del proceso de secado, según la metodología de Anderson. ....     | 100 |
| <b>Tabla 3.39.</b> Determinación del índice de absorción y de solubilidad en agua para la harina del sólido secado a 30 °C, según la metodología de Anderson. ....                  | 100 |
| <b>Tabla 3.40.</b> Determinación del índice de absorción y de solubilidad en agua para la harina del sólido secado a 40 °C, según la metodología de Anderson. ....                  | 101 |
| <b>Tabla 3.41.</b> Determinación del índice de absorción y de solubilidad en agua para la harina del sólido secado a 50 °C, según la metodología de Anderson. ....                  | 101 |
| <b>Tabla 3.42.</b> Determinación del índice de absorción y de solubilidad en agua para la harina del sólido secado a 60 °C, según la metodología de Anderson. ....                  | 102 |
| <b>Tabla 4.1.</b> Volumen de agua absorbido por el frijol, humedad con base seca y porcentaje de humedad en base húmeda.....  | 117 |
| <b>Tabla 4.2</b> Coeficientes de correlación de las curvas de humedad en base seca ajustada en función del tiempo para las diferentes temperaturas.....                             | 118 |
| <b>Tabla 4.3.</b> Coeficiente de correlación para la regresión lineal realizada para las temperaturas de 30, 40, 50 y 60 °C. ....   | 124 |
| <b>Tabla 4.4.</b> Coeficientes de difusividad efectiva del agua en el frijol a diferentes temperaturas de secado. ....  | 125 |
| <b>Tabla 4.5.</b> Coeficiente de correlación para la regresión lineal aplicada a la ecuación de Arrhenius, para las diferentes corridas.....  | 127 |
| <b>Tabla 4.6.</b> Valores de la energía de activación y factor de Arrhenius para el frijol a las diferentes temperaturas de estudio.....  | 128 |
| <b>Tabla 4.7.</b> Valores promedios de las propiedades fisicoquímicas de la harina de frijol cruda y secada a las diferentes temperaturas.....                                      | 129 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabla 4.8.</b> Valores promedios de las propiedades funcionales de la harina de frijol cruda y secada a las diferentes temperaturas..... | 133 |
|---|-----|

# CAPITULO I

## INTRODUCCIÓN

El frijol (*Vigna Unguiculata*), después de la caraota es la leguminosa de mayor consumo humano tanto a nivel mundial como nacional, es cultivado mayormente en pequeños fundos con pocos insumos. Después de cosechados son propensos al endurecimiento, particularmente si se reduce su humedad rápidamente y en condiciones de altas temperaturas, lo que provoca aumentos del tiempo de cocción y reducen la calidad y el precio de los granos<sup>[1]</sup>, por consiguiente, períodos cortos de almacenamiento bajo condiciones inadecuadas, pueden conducir a su rápido deterioro antes de que éstos alcancen las redes de conservación y distribución de alimentos.

En la actualidad, el método empleado para preservar estos granos es en forma artesanal, utilizando la energía solar, logrando en muchas ocasiones un grado suficiente de seguridad para su conservación, sin embargo cuando el secado es realizado a gran escala se emplean métodos artificiales más eficientes que garanticen su calidad, entre ellos se encuentra el secado con aire caliente, el cual es una operación unitaria muy utilizada en las industrias agrícola y alimentaria, tanto por la cantidad como por la diversidad de productos tratados, siendo los más utilizados aquellos donde el aire caliente fluye a través de los sólidos, mediante calentamiento directo y funcionamiento discontinuo, como el secador de bandejas también denominado de gabinete o anaqueles.

El secado de sólidos referido generalmente a la separación de un líquido de un sólido por evaporación<sup>[2]</sup>, es una operación que tiene la ventaja de ser utilizada como una técnica de preservación, puesto que los microorganismos que provocan la descomposición de los alimentos no pueden crecer y multiplicarse en ausencia de agua, además, muchas de las enzimas que causan los cambios químicos en alimentos y otros materiales biológicos no pueden funcionar sin agua<sup>[3]</sup>. Estos microorganismos

dejan de ser activos cuando el contenido de humedad se reduce por debajo del 10% de su peso, sin embargo, generalmente es necesario reducirlo por debajo del 5% en peso de los alimentos, para preservar su sabor y valor nutritivo<sup>[4]</sup>.

Al ser privados estos microorganismos, de la humedad que necesitan para su actividad al ser expuestos a una corriente de aire constante mediante el secado, se deben considerar factores internos como: el espesor y la geometría del producto, así como ciertas condiciones del aire de secado, tales como la temperatura, humedad relativa y velocidad, sin dejar de considerar las características del equipo de secado empleado<sup>[5]</sup>.

En el caso del frijol (*Vigna Unguiculata*) sólido utilizado para este estudio, es común cosecharlo con un contenido de humedad alrededor del 20%<sup>[6]</sup>, lo que hace necesario someterlo a proceso de secado para alcanzar una humedad en base húmeda, dadas las condiciones medias de temperatura y humedad relativa en América Latina, por debajo del 13%<sup>[7]</sup>, contribuyendo así a su conservación, sin embargo si esta operación unitaria se realiza sin control adecuado de temperatura, se pueden producir una serie de cambios en sus componentes originales, los cuales afectan la calidad del producto final, es por ello que cuando se realiza el secado con aire caliente es de vital importancia considerar esta variable, pues no sólo influye en el tiempo de secado sino en las reacciones degradativas que afectan las propiedades de los alimentos.

Durante el secado tiene lugar simultáneamente una transferencia de calor hacia el sólido y una transferencia de materia (agua) desde el sólido al fluido desecante<sup>[8]</sup>, por lo tanto la operación de secado en general está controlada por los dos fenómenos, porque ambas resistencias, tanto la de transferencia de calor como la de materia, son significativas. Este proceso simultáneo de transferencia de masa y energía, en el cual se emplea calor para evaporar la humedad, la cual a su vez se remueve de la superficie del sólido, por medio de un agente externo (aire), involucra la transferencia de diferentes componentes dentro de la misma fase y entre fases diferentes por difusión molecular y convección natural o forzada. El mismo, ha sido estudiado en diferentes investigaciones para el secado de granos<sup>[9,10]</sup>, concluyéndose

que el mecanismo que domina este proceso está relacionado con los fenómenos internos de transferencia de calor y masa.

De estas investigaciones se deduce la importancia de evaluar la difusividad de estos materiales, pues al estudiar la difusión en formas geométricas homogéneas, ésta puede ser cuantificada por la integración de la Ley de Fick, pero cuando la experiencia se realiza para materiales biológicos heterogéneos, como el frijol, la situación se hace más compleja, sin embargo, pueden ser estudiados mediante esta teoría compensando la heterogeneidad de los granos con el coeficiente de difusividad efectiva. Por consiguiente, considerando la importancia del frijol para la alimentación del venezolano, así como la escasez de información con respecto a los fenómenos que ocurren durante el secado de esta leguminosa, se realizó la presente investigación con el objetivo de evaluar la influencia de la temperatura sobre la cinética del secado de frijol (*Vigna Unguiculata*) utilizando un secador discontinuo de bandeja.

### **1.1 Planteamiento del problema**

A nivel internacional, la importancia del frijol (*Vigna Unguiculata*) trasciende como fuente de alimento y sustituto de otros nutrimentos en la sociedad, sobre todo en países donde el ingreso *per cápita* limita la adquisición de bienes de alto valor proteico pero de mayor valor económico.

En Venezuela, el frijol es un cultivo tradicionalmente sembrado por muchas comunidades rurales que encuentran en esta leguminosa, una forma de completar los requerimientos de proteína en la dieta diaria. Esta especie, posee un significativo contenido de proteína (23%), carbohidrato (56%), grasa (1,3%), fibra (4%), ceniza (hierro, fósforo, calcio, potasio) (3,5%), vitaminas B1 y B2, por lo que es considerada como fuente alimenticia primordial en países y sectores sociales de bajos recursos<sup>[11]</sup>.

Es frecuente cosechar el frijol, con un contenido de humedad de alrededor del 20%, por lo que se requiere que se someta a procesos de secado con la finalidad de inhibir la germinación de las semillas, reducir el contenido de humedad de los granos hasta un nivel que impida el crecimiento de los hongos, y evitar las reacciones de deterioración<sup>[12]</sup>.

Estas leguminosas al llegar a la madurez fisiológica, presentan en la mayoría de los casos un contenido de materia seca, por lo que es recomendable desde el punto de vista del rendimiento máximo de la producción, cosecharlas en ese punto de desarrollo, no obstante varios factores limitan esa posibilidad, siendo el contenido de humedad el más destacado, por lo que resulta necesario reducirlo a niveles seguros para su almacenamiento, el cual oscila entre 10 y 13%<sup>[13]</sup>.

Al igual que otras leguminosas, los granos de frijol son materiales higroscópicos en los que cambia el contenido de humedad en relación con la temperatura y la humedad relativa del aire circundante<sup>[14]</sup>; en consecuencia, al no ser secados adecuadamente, este contenido de agua interviene en procesos bioquímicos degradando y envejeciendo a los granos, y al almacenarlos en tales condiciones, se producen pérdidas económicas y nutricionales significativas, siendo necesario para reducir este contenido de humedad a niveles seguros, recurrir al secado con aire natural, utilizando la energía solar, o el secado artificial, empleando aire calentado con vapor de agua o por resistencias eléctricas, por lo que este proceso resulta de gran importancia en la cadena de producción de alimentos.

Al utilizar un proceso de secado se requiere de un estudio previo que permita determinar las condiciones y parámetros a tener en cuenta para garantizarlo, es por ello que para su diseño, resulta esencial el estudio de la cinética de secado, el cual permita además, obtener un producto de calidad, pues al someterlo a altas temperaturas se corre el riesgo de que se puedan alterar sus propiedades organolépticas y su valor nutricional.

Razón por la cual, la temperatura de secado es una variable a tener en cuenta en los estudios cinéticos, pues si bien altas temperaturas pudieran acelerar el proceso, la pérdida de calidad del producto no compensaría esta reducción de tiempo.

Con base a lo expuesto anteriormente, surgió la necesidad de evaluar la influencia de la temperatura sobre la cinética de secado de frijol (*Vigna Unguiculata*), utilizando un secador artificial discontinuo de bandejas con resistencia eléctrica para el calentamiento del aire, donde se sometieron a la operación de secado diferentes cargas de frijol a temperaturas de 30°C, 40°C, 50°C y 60°C; y se estudió el efecto que tienen las diferentes temperaturas sobre la cinética del secado de frijol aplicando la segunda Ley de Fick, puesto que en el secado de sólidos granulares predomina la difusión del agua a través del grano, lo cual se comprobó con la aparición del período de velocidad decreciente, durante el proceso de secado.

A partir de la Ley de Fick se determinó el coeficiente de difusión efectivo a las diferentes temperaturas y se utilizó la ecuación de Arrhenius, para obtener la energía de activación y así poder verificar si los resultados del secado de frijol, presentaron una tendencia de línea recta característicos de estas ecuaciones. Posteriormente se empleó para el ajuste de los datos experimentales el programa estadístico Statgrafics Plus Versión 5.1.

Finalmente se realizó la caracterización fisicoquímica y funcional, para comprobar que el producto no sufriera degradación en sus propiedades en el rango de temperatura estudiado.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Evaluar la influencia de la temperatura sobre la cinética de secado de frijol (*Vigna Unguiculata*), utilizando un secador discontinuo de bandejas.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

1. Escoger la humedad inicial a utilizarse en el proceso de secado de frijol.
2. Reproducir las curvas de velocidad de secado de frijol, a diferentes temperaturas.
3. Obtener la difusividad efectiva del agua aplicando la segunda Ley de Fick, a diferentes temperaturas.
4. Calcular la energía de activación requerida para la difusión de la humedad a través del sólido, utilizando la ecuación de Arrhenius.
5. Realizar la caracterización fisicoquímica y funcional del producto a las condiciones obtenidas.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes

En el año 2008, Chaves y Avanza<sup>[15]</sup> estudiaron la cinética de secado de láminas de berenjena, en un rango de temperatura de 50°C a 90°C, con velocidad de aire de secado de 1,5 a 2,5 ± 0,01 m/s y humedad relativa ambiente de 50% a 60%, en un secador de bandejas. Los valores de humedad relativa del aire que alimenta al secador fueron obtenidos a través de la medida de la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo, y la carta psicométrica. La velocidad de secado del producto fue determinada con base a la pérdida de masa durante el proceso, obteniéndose como conclusiones de la investigación que: el proceso de secado ocurre durante el período de velocidad decreciente, no presentándose influencia de la velocidad de aire de secado sobre el mismo, en el rango estudiado. Se observa la marcada influencia de la temperatura en el tiempo de secado, a 80 °C fue de 210 minutos mientras que a 50 °C fue de 400 minutos. El ajuste de los datos experimentales a modelos empíricos frecuentemente usados (Newton, Page, Page modificado, Henderson y Pabis, y Midilli) mediante regresión no lineal, presentaron valores de R<sup>2</sup> mayor a 0,97; lo que indica que tienen un buen grado de ajuste a los datos experimentales, sin embargo los modelos de Newton y Page modificado serían los más adecuados para describir el secado de rodajas de berenjena en bandejas dada la simplicidad de los mismos.

Montes y colaboradores<sup>[16]</sup> evaluaron en el año 2008, el efecto de la temperatura, variedad y geometría en el tiempo de secado del ñame (*Dioscorea rotundata*), utilizando un secador tipo bandeja, empleando un diseño completamente al azar en arreglo factorial con tres factores: temperatura (45, 55 y 70 °C), geometría (rodajas y láminas) y variedad (9811-089 y 9811-091). Alcanzando como resultado una

disminución en el tiempo de secado del 28,15% para la temperatura de 70 °C. Con los resultados obtenidos se construyeron curvas de secado las cuales fueron ajustadas a los modelos matemáticos de Page, difusión, Thompsom, Newton, Page modificado, Henderson y Pabis y el modelo logarítmico; comprobando mediante el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), error medio estimado (SE) y desvío medio relativo (%P), que el modelo logarítmico es el que mejor describe el proceso de secado (R<sup>2</sup> ≥ 99,17 y SE ≤ 0,0299).

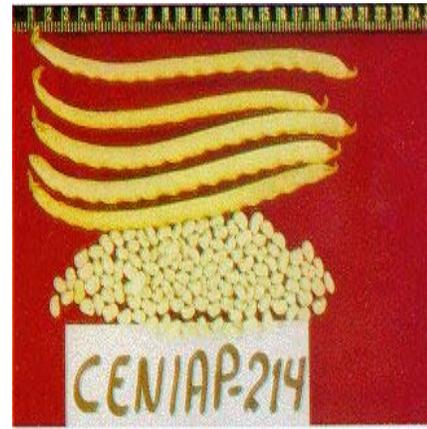
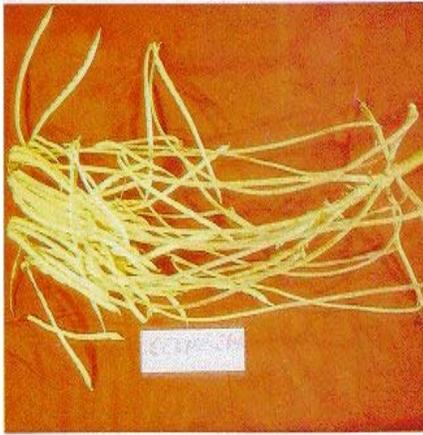
Vega y colaboradores<sup>[17]</sup> en el 2006, estudiaron y modelaron la cinética del secado del pimiento (*cv Lamuyo*) a diferentes temperaturas de trabajo (50, 60, 70 y 80 °C), mediante aire caliente. La velocidad de aire se mantuvo constante a 2,5 m·s<sup>-1</sup> igual que la densidad de carga en 7 kg·m<sup>-2</sup>. Las experiencias se llevaron a cabo en un secador de laboratorio que permitió registrar la masa de la muestra en tiempo real. Obteniendo como una de las conclusiones más significativas de su estudio que durante el proceso de secado pueden distinguirse tres etapas; una corta etapa de inducción; una segunda etapa hasta humedades de producto cercana a 1 gramo de agua por gramo de materia seca y en la que la velocidad de secado disminuye linealmente con la humedad libre del producto; y una tercera etapa de secado más lenta, donde la velocidad de secado se modela con las ecuaciones difusionales de Fick.

En el año 2006, Vásquez y Pereira<sup>[18]</sup> determinaron el coeficiente de difusión efectivo del agua en el secado por convección en láminas de coroba (*Attalea maripa*) para nueve combinaciones de temperaturas y velocidades del aire en un secador de túnel con bandejas ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de Oriente. Se sometió a la operación de secado una libra de láminas de coroba en cada corrida, lográndose el menor tiempo de secado bajo las condiciones de 93,3 °C y 1,1798 m/s. El coeficiente de difusión efectivo fue determinado utilizando la ecuación de difusión de Fick con tres términos de la sumatoria, encontrándose en un rango de 2,52x10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s a 4,76x10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s. Concluyéndose en este estudio que el valor del coeficiente de difusión depende de la temperatura y la

velocidad del aire de secado. La dependencia con la temperatura se pudo expresar mediante la ecuación de Arrhenius y se observó que la energía de activación disminuye al aumentar la velocidad del aire de secado.

## **2.2 Origen y características del frijol (*VIGNA UNGUICULATA*)**

El género *Vigna*, perteneciente a la familia *Fabaceae* es una leguminosa de grano cultivada desde épocas remotas con fines alimenticios en el trópico occidental africano y en varios países americanos<sup>[19]</sup>, tiene entre sus especies más conocidas el frijol común (*Vigna Unguiculata* (L.) Walp)<sup>[20]</sup>, el cual posee hábito de crecimiento erecto, ausencia de ramas laterales vegetativas, las vainas son arqueadas o recurvadas con una longitud variable de 17 a 19 centímetros, de color crema pálido al madurar, y se encuentran ubicadas en el tercio superior de la planta; presenta flor blanca, maduración uniforme y ciclo vegetativo de 72 a 88 días<sup>[21]</sup>, adaptándose bien a diferentes tipos de suelos, desde arenosos hasta franco-arcillosos con buen drenaje, los suelos arcillosos no son recomendables. El pH óptimo está entre 5,6 y 6,4; aunque este cultivo tolera condiciones de acidez muy variadas. Se puede encontrar desde los 50 hasta 1.200 metros sobre el nivel del mar, con requerimientos hídricos de 350 a 400mm bien distribuidos durante su ciclo y temperatura que oscilan entre 24 °C y 28 °C. Esta leguminosa, al igual que otras especies de *Vigna* como el frijol mungo y el bucarito, se caracterizan por su adaptación a condiciones secas, lo que les confiere ventajas comparativas en relación con otros cultivos<sup>[22]</sup>. En las figuras 2.1 y 2.2 se puede observar la planta, tamaño y forma del frijol respectivamente.



**Figura 2.1.** Planta de frijol *Vigna Unguiculata*<sup>[21]</sup> **Figura 2.2** Tamaño y forma de vainas y semillas<sup>[21]</sup>.

### 2.2.1 Estructura básica del frijol

La fruta es una vaina que consiste en varias semillas dentro de una cubierta exterior. Tal como se muestra en la Figura 2.3.

#### ✓ Vaina. Pericarpio

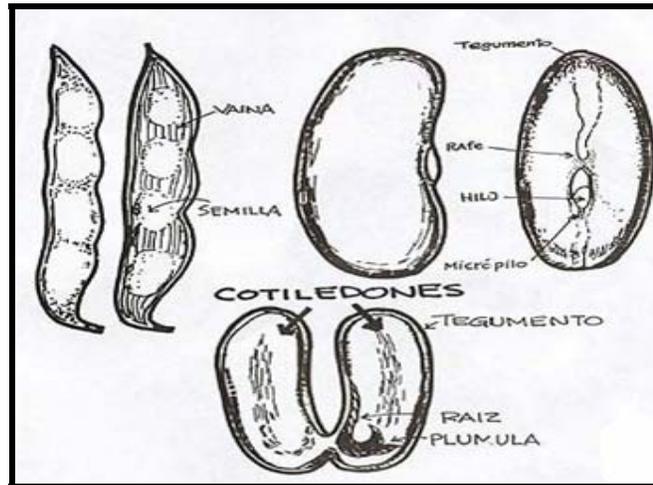
Durante el crecimiento de la planta, las capas del pericarpio, exocarpio, mesocarpio y endocarpio son gruesas. Secándose en la maduración y pueden abrirse una vez que están secas.

#### ✓ Semilla

Está formada por:

1. Tegumento
2. Embrión
3. Dos cotiledones

4. Células para el desarrollo de una nueva planta
5. No hay endosperma como en los cereales.



**Figura 2.3.** Estructura del grano de frijol<sup>[23]</sup>.

La siembra de esta leguminosa debe efectuarse a la salida de las lluvias, durante los meses de Octubre y Noviembre. La densidad de plantas varía entre 250.000 plantas/ha y 300.000 plantas/ha, de acuerdo a la distancia que se utilice entre hilera (0,45 a 0,60 cm.) y entre plantas (7 a 9 cm.)<sup>[23]</sup>. Para obtener las densidades de plantas antes mencionadas se requiere de 35 kg/ha de semillas.

Las plantas de frijol se encuentran aptas para ser arrancadas en el momento en que las vainas comienzan a cambiar de color a un color natural café amarillento. Este momento se conoce como madurez fisiológica. De ahí en adelante la planta entra en el proceso de secado, sin embargo, el momento óptimo para efectuar la arrancada se debe decidir teniendo presente los siguientes aspectos:

1. Las plantas deben permanecer el mayor tiempo posible en el campo antes de arrancarlas de tal modo que se produzca un secado natural del grano.

2. La cosecha debe efectuarse antes que las vainas se sequen demasiado para poder reducir las pérdidas por desgrane.

La cosecha se debe realizar con una humedad del grano comprendida entre 14% y 15%, de lo contrario se produce una pérdida de humedad muy rápida apareciendo los granos chupados o arrugados. Cuando todos los materiales inertes y semillas de malezas u otros cultivos han sido removidos es envasada en sacos y posteriormente enviada al almacén, el cual debe estar bajo condiciones ideales para asegurar la calidad de la semilla, preferiblemente refrigerado en cavas a una temperatura que oscila, entre 10 y 12°C<sup>[12]</sup>.

### 2.2.2 Composición nutricional

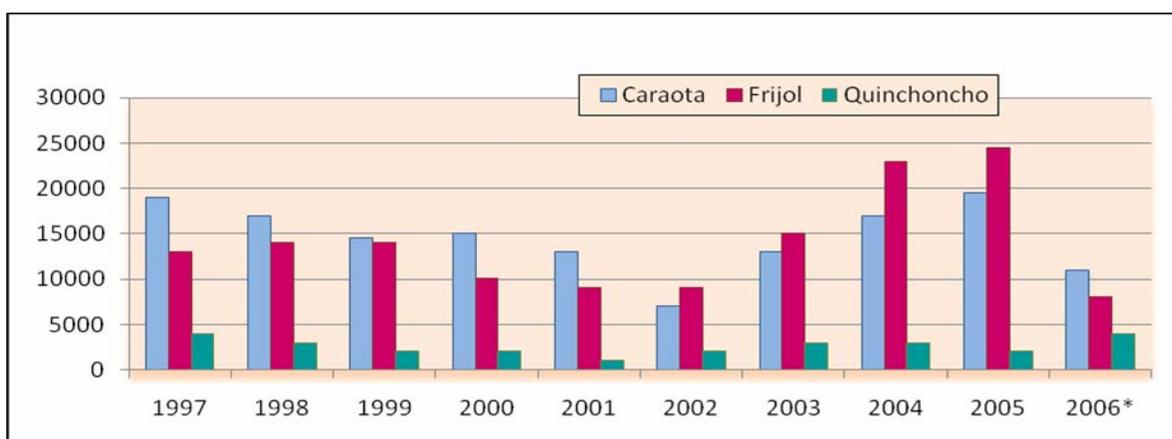
El frijol es una leguminosa alimenticia de gran valor nutritivo<sup>[20]</sup>, es rica fuente de proteínas e hidratos de carbono, además de poseer gran cantidad de vitaminas del complejo B como son la niacina, la riboflavina, el ácido fólico y la tiamina. Igualmente proporciona principalmente hierro y zinc, además de cobre, fósforo, potasio, magnesio, calcio y un alto contenido en fibra. También es una excelente fuente de ácidos grasos poli-insaturados<sup>[24]</sup>. En la tabla 2.1 se muestran la composición nutricional promedio de sus componentes.

**Tabla 2.1.** Composición nutricional promedio de una semilla de frijol<sup>[25]</sup>.

| Componentes   | Porcentajes (%) |
|---------------|-----------------|
| Humedad       | 10,0 - 12,0     |
| Carbohidratos | 58,0 - 60,0     |
| Proteína      | 21,0 - 23,0     |
| Grasa         | 1,5 - 2,0       |
| Fibra         | 4,0 - 5,0       |
| Ceniza        | 3,0 - 3,5       |

Su alto contenido de proteína le confiere un papel importante en la dieta del venezolano, al igual que la caraota y el quinchoncho, lo que los ha convertido en los granos de mayor arraigo en la población, especialmente de los sectores de menos ingresos y en consecuencia con pocas posibilidades de consumir las tradicionales fuentes proteicas, como son las carnes rojas y el pescado<sup>[24]</sup>.

La producción nacional de frijol para la fecha sólo cubre el 30% de la demanda, a pesar de que los rendimientos han progresado desde los 600 kg/ha a principios de 1990, hasta los 900 kg/ha en el 2006. En la figura 2.4 puede observarse que el fríjol (*Vigna Unguiculata*) lidera este grupo de leguminosas, particularmente por la influencia del incremento productivo durante los últimos tres años del período. Este rubro logró mantener la producción promedio alrededor de las 13.000 toneladas durante la década de 1990 con pocas variaciones. Sin embargo, a partir del 2003 comenzó una recuperación que elevó la producción hasta las 24.000 toneladas en el 2005. Las condiciones climáticas adversas prevalecientes en las principales zonas productoras durante el año 2006 influyeron en la caída de la producción para ese año <sup>[26]</sup>.



**Figura 2.4.** Producción de leguminosas de grano (caraota, frijol y quinchoncho) en Venezuela durante el periodo 1997-2006<sup>[24]</sup>.

### 2.2.3 Características fisicoquímicas

Los análisis fisicoquímicos y funcionales de los alimentos se realizan para harinas. Como definición general se puede decir que una harina es un polvo más o menos blanco o fino, que se obtienen de la molienda de las semillas de ciertas plantas alimenticias, ya sea cereal o leguminosa. La molienda tiene como fin liberar los granos de almidón y las capas proteicas de las células vegetales<sup>[27]</sup>.

El análisis fisicoquímico de rutina de cualquier clase de harina debe incluir la determinación de los siguientes parámetros:

#### 2.2.3.1 Humedad

Es la pérdida de peso que experimenta el producto al ser secado mediante calentamiento en estufa a temperatura constante y a presión atmosférica normal, bajo condiciones tales que eviten cualquier cambio químico que puede ocurrir en la muestra<sup>[28]</sup>.

#### 2.2.3.2 Cenizas

Representa el contenido en sales minerales, tales como: Fe, Ca, Mg, P, Zn, K, Na. Aunque sin especificar cuánto de cada uno de los elementos en particulares se obtiene. Éstas se determinan incinerando una muestra del alimento en un horno de mufla entre 600 °C a 700 °C la muestra pesada se pone en un crisol y se carboniza. Es útil conocer el tiempo de incineración que requiere la muestra en un ensayo previo, ya que es particularmente difícil de pesar a elevada temperatura<sup>[29]</sup>.

El contenido de ceniza se expresa como porcentaje, y se calcula mediante la siguiente ecuación<sup>[30]</sup>:

$$\%Ceniza = \frac{(M_2 - M_0)}{(M_1 - M_0)} \cdot 100$$

**(Ec. 2.1)**

donde:

M<sub>0</sub>: masa del crisol vacío (g).

M<sub>1</sub>: masa del crisol con la muestra (g).

M<sub>2</sub>: masa del crisol con las cenizas (g).

Durante la prueba, la materia orgánica se seca, luego se carboniza y se oxida desprendiendo CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O, NO y SO<sub>2</sub>.

Los elementos minerales quedan como ceniza blanca que es una mezcla de cationes y aniones de los elementos mencionados. Estos últimos pueden dividirse en dos clases; alcalinos y no alcalinos. La relación entre cenizas alcalinas/no-alcalinas es característica de muchos alimentos y puede utilizarse por ejemplo para determinar el contenido de calcio en la leche<sup>[29]</sup>.

### 2.2.3.3 Grasa

Es la fracción de los alimentos solubles en disolventes orgánicos.

Se determina por extracción repetida en un extractor tipo Soxhlet, utilizando éter como disolvente o mezclas hexano- heptano.

La extracción se lleva a cabo en caliente bajo reflujo de disolvente y debe prolongarse hasta que no pueda extraerse más. En este momento, se evapora el disolvente, y se determina la grasa extraída por pesada<sup>[29]</sup>.

El contenido de grasa se expresa como porcentaje, y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\%Grasa = \frac{(M_2 - M_1)}{M} \cdot 100$$

(Ec. 2.2)

donde:

M: masa de la muestra (g).

M<sub>1</sub>: masa del beacker seco (g).

M<sub>2</sub>: masa del beacker con la grasa obtenida (g).

La fracción de grasa así obtenida puede contener una extraordinaria variedad de compuestos<sup>[31]</sup>.

### 2.2.3.4 Proteínas (Nitrógeno de Kjeldahl)

El método más equilibrado para determinar el contenido en proteínas totales es medir el contenido de nitrógeno y establecer una proporcionalidad entre esta medida y el contenido en nitrógeno de las proteínas.

**Tabla 2.2.** Factores de conversión. Nitrógeno - Proteínas<sup>[32]</sup>.

| Alimento                 | Factor de conversión |
|--------------------------|----------------------|
| <b>Origen Animal</b>     |                      |
| Huevos                   | 6,25                 |
| Gelatina                 | 5,55                 |
| Carnes                   | 6,25                 |
| Leche                    | 6,38                 |
| <b>Origen Vegetal</b>    |                      |
| <b>Granos y Cereales</b> |                      |
| Arroz                    | 5,95                 |

**Tabla 2.2.** Factores de conversión. Nitrógeno – Proteínas (Continuación)<sup>[32]</sup>.

| Alimento                         | Factor de conversión |
|----------------------------------|----------------------|
| <b>Origen Vegetal</b>            |                      |
| <b>Granos y Cereales</b>         |                      |
| Avena, Cebada, Centeno           | 5,83                 |
| Maíz, Sorgo                      | 6,25                 |
| Trigo (grano entero)             | 5,83                 |
| Trigo (harina refinada)          | 5,70                 |
| <b>Nueces</b>                    |                      |
| Almendras                        | 5,18                 |
| Cacao                            | 6,25                 |
| Otras                            | 5,30                 |
| <b>Semillas Oleaginosas</b>      |                      |
| Algodón, Lino, Ajonjolí, Girasol | 5,30                 |
| Maní                             | 5,46                 |
| Soya                             | 5,71                 |

El valor general aceptado para convertir el contenido de nitrógeno a proteínas es 6,25, ya que se acepta que el contenido medio en nitrógeno de las proteínas de los alimentos es del 16% (proteína con una distribución estándar de aminoácidos). Si se conoce mejor el alimento es posible precisar más<sup>[29]</sup>.

El contenido de nitrógeno se expresa como porcentaje al igual que el de proteínas, y se calcula mediante las siguientes ecuaciones<sup>[32]</sup>:

$$\%Nitrogeno = \frac{V \cdot N \cdot 0,014}{M} \cdot 100$$

**(Ec. 2.3)**

$$\%Proteinas = \%Nitrogeno \cdot 6,25 \quad \text{(Ec. 2.4)}$$

donde:

V: volumen gastado de titulante (mL).

N: normalidad del titulante (eq-g/L).

M: masa de la muestra (g).

El método de Kjeldahl presenta la gran ventaja de ser inmune a muchas interferencias, ya que sólo da en su resultado el nitrógeno en las proteínas. Pese a ser un método largo y trabajoso se puede decir que el método de Kjeldahl sigue siendo el estándar de medida del contenido en proteínas más ampliamente aceptado<sup>[29]</sup>.

#### **2.2.4 Características funcionales**

Dentro de las propiedades importantes que permiten establecer los usos de una harina se encuentra la capacidad de absorber y retener el agua, la cual resulta de gran utilidad ya que permiten establecer y predecir el posible comportamiento durante el procesamiento al cual esté siendo sometida<sup>[33]</sup>.

Las harinas contienen gluten, albumina, almidón, materias grasas, entre otras: las cantidades relativas de estas sustancias varían según la naturaleza de la semilla de donde procede la harina. El almidón sufre una serie de modificaciones que afectan su estructura. El engrudo formado durante este tratamiento es una mezcla de gránulos

hinchados y de macromoléculas dispersadas, lo que influye sobre la viscosidad de la suspensión de almidón. Este comportamiento específico para cada tipo de almidón, se denomina propiedad funcional. La mayor parte de las propiedades funcionales muestran su influencia sobre las características sensoriales de los alimentos, en particular la textura. Ellas también pueden jugar un papel importante en el comportamiento de los alimentos o de los ingredientes alimenticios durante su transformación o su almacenamiento. El índice de absorción de agua (IAA) y el índice de solubilidad en agua (ISA), se pueden utilizar como un indicativo del grado de modificación de los almidones por tratamiento termomecánico<sup>[34]</sup>. Los granos de almidón al ser sometidos a elevadas temperaturas sufren un proceso denominado gelatinización, que es la ruptura de la ordenación de las moléculas en los gránulos. Durante la gelatinización se produce la lixiviación de la amilosa, la gelatinización total se produce normalmente dentro de un intervalo más o menos amplio de temperatura, siendo los gránulos más grandes los que primero gelatinizan<sup>[35]</sup>.

#### 2.2.4.1 Índice de absorción de agua

Es expresado como el peso del gel obtenido por gramo de muestra seca; fue originalmente desarrollado como una medida de la energía de esponjamiento o hinchamiento del almidón<sup>[36]</sup>.

Se expresa<sup>[37]</sup>:

$$IAA = \frac{(tubo + gel(g)) - (tubovacio(g))}{(tubo + muestra(g)) - (tubovacio(g))} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

#### 2.2.4.2 Índice de solubilidad del agua

Es expresado como un porcentaje de los sólidos secos originales, es la cantidad de materia seca recuperada después de evaporar el supernadante de la determinación de la absorción de agua<sup>[36]</sup>. Se expresa<sup>[37]</sup>:

$$\%ISA = (capsula + solido(g)) - (capsula(g)) \cdot 100$$

(Ec.2.6)

## 2.3 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DEL SECADO

### 2.3.1 Definición de Secado

El secado es el procedimiento más antiguo utilizado para la preservación de alimentos, y se puede definir de distintas maneras, según el enfoque que se desee adoptar. Usualmente, el término se refiere a la eliminación de humedad en una sustancia<sup>[38]</sup> y consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo<sup>[39]</sup>.

El secado de sólidos se refiere generalmente a la separación de un líquido de un sólido por evaporación. Los métodos mecánicos utilizados para separar un líquido de un sólido no se consideran por lo común como una operación de secado, aunque a menudo preceden a una operación de esta naturaleza, ya que es menos costoso y, muchas veces, es más fácil utilizar métodos mecánicos que térmicos<sup>[4]</sup>.

### 2.3.2 Mecanismos de secado

En los estudios más teóricos se pone énfasis en los mecanismos de transferencia de energía y de materia, por lo tanto en un proceso de secado hay intercambio simultáneo de calor y masa, entre el aire del ambiente caliente y el sólido a secar.

El secado es una operación de transferencia de masa de contacto gas-sólido, donde la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa, con base a la diferencia entre la presión de vapor ejercida por el sólido húmedo y la presión parcial de vapor de la fase gaseosa. En consecuencia, en este fenómeno complejo que involucra la transferencia de materia y calor cuando un

sólido húmedo es sometido a un secado térmico ocurren dos procesos simultáneamente:

- Hay transferencia de energía (calor) de los alrededores para evaporar la humedad de la superficie.(Condiciones Externas)
- Hay transferencia de la humedad (masa) interna hacia la superficie del sólido.(Condiciones internas)

**Condiciones externas.** Durante la transferencia de calor en la cual se pretende eliminar el agua en forma de vapor de la superficie de la partícula, algunas condiciones juegan un papel importante como son: la temperatura, flujo del aire y humedad, área de superficie expuesta al calor y presión. Puesto que estas condiciones durante la etapa inicial del secado son importantes para remover la humedad de la superficie. En algunos materiales el exceso de evaporación en la superficie puede causar encogimiento, esto después de que la humedad inicial ha sido removida dando lugar a altos porcentajes de humedad del interior hacia la superficie, formando tensiones dentro del material ocasionando deformaciones.

**Condiciones internas.** Los factores que pueden determinar la rapidez de secado son: la temperatura, su contenido de humedad y la naturaleza física dentro de la partícula. Durante la transferencia de calor hacia un material húmedo, un gradiente de temperatura se genera dentro del material mientras la evaporación de la humedad ocurre dentro de la superficie. La evaporación hace que la humedad del material vaya desde el interior hacia la superficie, lo cual sucede a través de mecanismos como son: difusión, flujo capilar, presión interna causada por el encogimiento durante el secado<sup>[2]</sup>.

En el proceso de secado cualquiera de los dos subproceso descritos puede ser el factor limitante que gobierne la velocidad de secado, a pesar de que ambos subprocesos ocurren simultáneamente durante este ciclo.

## 2.4 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS ASOCIADOS AL SECADO

### 2.4.1 Contenido de Humedad

El contenido de humedad de un material suele expresarse como porcentaje del peso del material seco. Si un material se expone al aire a una temperatura y humedad dadas, dicho material perderá o ganará agua hasta que se establezcan unas condiciones de equilibrio. La humedad correspondiente a dicho equilibrio varía ampliamente con la humedad y la temperatura del aire<sup>[40]</sup>, y se puede adsorber como una película superficial, o bien condensarse dentro de los capilares finos del sólido a presión reducida, variando su concentración con la temperatura y la humedad del aire que lo rodea<sup>[2]</sup>. Puede expresarse en base seca o húmeda:

- **Contenido de humedad en base húmeda (W).** Es la que expresa la humedad de un material como porcentaje del peso del sólido húmedo.

$$W = \frac{mh}{mSh} \quad (\text{Ec.2.7})$$

- **Contenido de humedad en base seca (X).** Es el contenido de humedad que tiene el sólido expresada en kilogramos de agua por kilogramos de sólidos completamente secos.

$$X = \frac{mh}{mSs} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Estos términos se definen matemáticamente de la siguiente manera:

mh = masa de agua (kg de agua).

mSh = masa del sólido húmedo (kg Sh).

mSs = masa del sólido seco. (kg Ss).

conociendo que:

$$mh = (mSh - mSs) \quad (\text{Ec. 2.9})$$

al sustituir la ecuación 2.9, en las dos anteriores se obtiene:

$$W = \frac{(mSh - mSs)}{mSh} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

$$X = \frac{(mSh - mSs)}{mSs} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Relacionando humedad en base húmeda y en base seca se obtiene:

$$W = \frac{X}{(1 + X)} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

$$X = \frac{W}{(1 - W)} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Resulta útil expresar el contenido de humedad en base seca, debido a que el denominador de su ecuación es un valor constante en todo el sistema<sup>[38]</sup>.

En un sólido puede encontrarse presente la humedad de las formas siguientes:

#### **2.4.2 Humedad ligada**

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

### 2.4.3 Humedad no ligada

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

### 2.4.4 Humedad de equilibrio $X^*$

Puede expresarse como el contenido de humedad de una sustancia que está en equilibrio con una presión parcial dada del vapor<sup>[38]</sup>. El contenido de humedad de equilibrio de un sólido es especialmente importante en el secado, porque representa el contenido de humedad limitante, en ciertas condiciones de humedad y temperatura<sup>[2]</sup>.

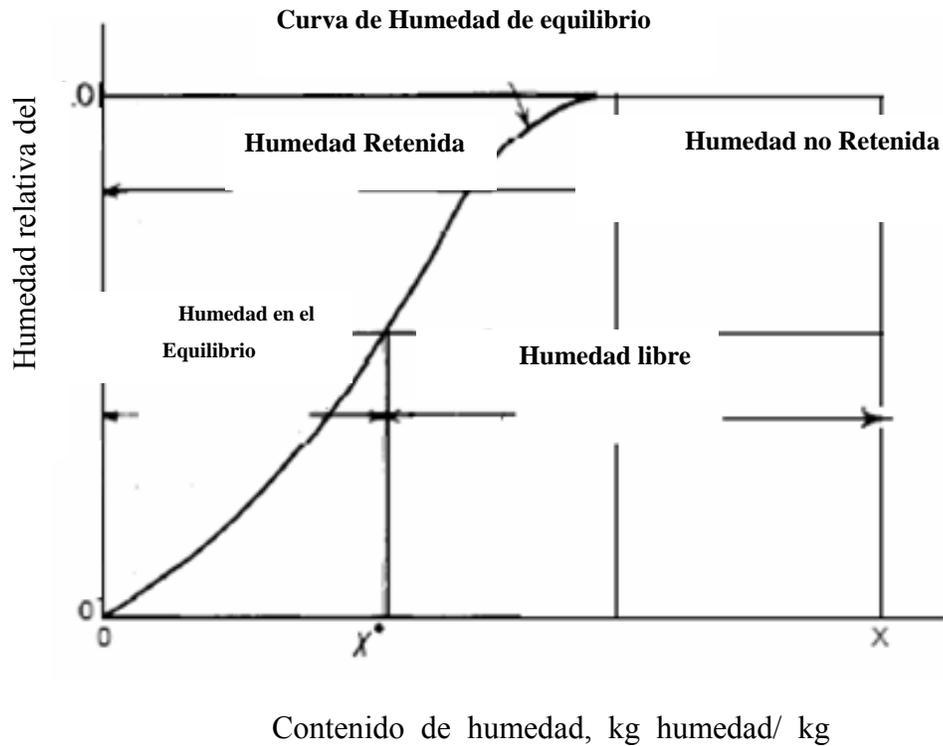
### 2.4.5 Humedad libre

La humedad libre es la humedad contenida por una sustancia en exceso de la humedad en equilibrio. Solo puede evaporarse la humedad libre; el contenido de humedad libre de un sólido depende de la concentración del vapor del gas y se define como:

$$X_{libre} = X - X^*$$

(Ec. 2.14)

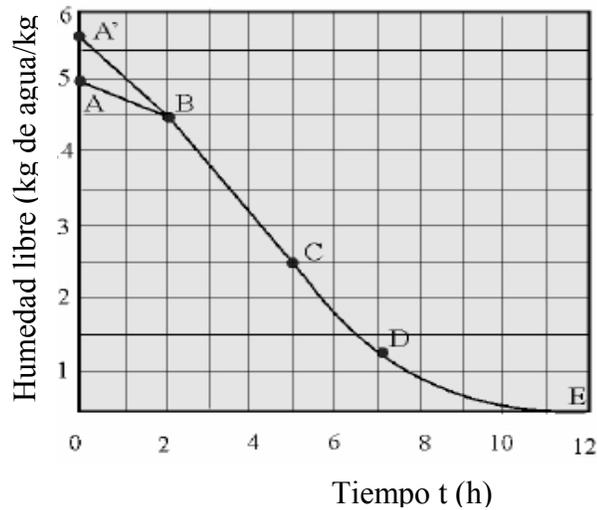
Todas estas relaciones se muestran esquemáticamente en la figura 2.5:



**Figura 2.5** Relaciones existentes entre los diferentes tipos de humedades<sup>[38]</sup>.

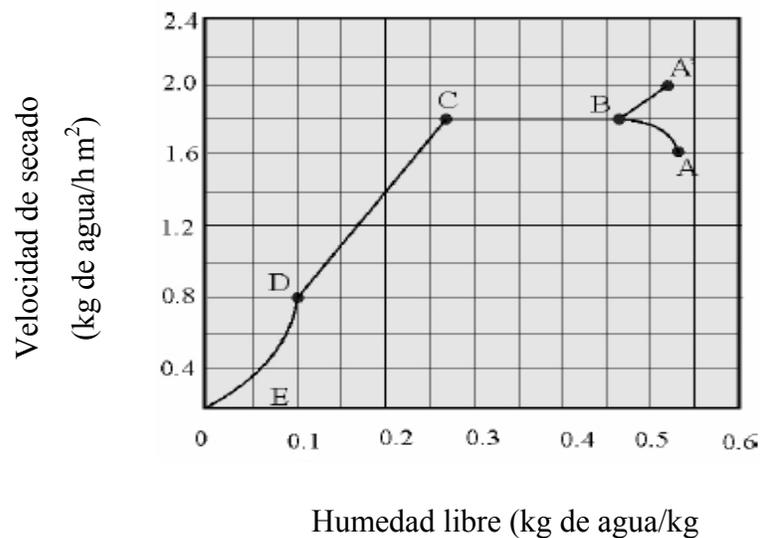
## 2.5 CURVAS DE SECADO

Cuando un sólido se seca experimentalmente, por lo general se obtienen datos que asocian el contenido de la humedad con el tiempo. La figura 2.6 representa el caso en que los sólidos pierden la humedad, primero por evaporación desde una superficie saturada del sólido, después sigue un período de evaporación de la superficie saturada que tiene un área que gradualmente va disminuyendo, y por último cuando el agua del interior del sólido se evapora.



**Figura 2.6** Contenido de humedad en función del tiempo

Esta curva indica que la velocidad de secado está sujeta a variar en función del tiempo o el contenido de humedad. Esta variación se ilustra con mayor claridad diferenciando gráfica o numéricamente la curva y haciendo una representación de la velocidad de secado en función del contenido de humedad en base seca, como se ilustra en la figura 2.7. Estas curvas de velocidad demuestran que el secado no es un proceso suave y continuo en el cual existe un sólo mecanismo que ejerza el control a lo largo de toda su duración<sup>[4]</sup>.



**Figura 2.7** velocidad de secado en función de la humedad.

Para determinar experimentalmente la velocidad de secado de un material se procede a colocar una muestra en una bandeja. Si se trata de un material sólido se debe llenar por completo la base de la bandeja, de manera que sólo quede expuesta a la corriente de aire de secado la superficie de dicho sólido. La pérdida de peso de humedad durante el secado puede determinarse a diferentes intervalos sin interrumpir la operación.

Los datos que se obtiene del secado, generalmente se expresan como peso total del sólido húmedo a diferentes tiempos en el período de secado. Estos valores se pueden convertir a datos de velocidad de secado por los siguientes procedimientos. Primero teniendo los datos de sólido húmedo en base seca, se determina el contenido de humedad en equilibrio. Con él se procede a calcular el contenido de humedad libre para cada valor de sólido húmedo en base seca, se traza una gráfica del contenido de humedad libre en función del tiempo. Para obtener una curva de velocidad de secado a partir de esta gráfica, se miden las pendientes de las tangentes a la curva lo cual proporciona valores de  $dX/dt$  para ciertos valores de  $t$ . se calcula entonces la velocidad  $N$  para cada punto con la expresión.

$$N = -\frac{Ls}{A} \cdot \frac{dX}{dt}$$

(Ec. 2.15)

donde:

$N$ : velocidad de secado ( $\text{kg agua} / \text{m}^2 \cdot \text{h}$ ).

$Ls$ : masa de sólido totalmente seco ( $\text{kg } S_{TS}$ ).

$A$ : área expuesta al secado ( $\text{m}^2$ )

$dX/dt$ : cambio de la humedad libre en función del tiempo ( $\text{kg agua} / \text{kg } S_{TS} \cdot \text{h}$ ).

Las curvas antes mostradas representan el proceso de secado a condiciones constantes. Empezando en el tiempo cero el contenido inicial de humedad libre

corresponde al punto A. Al principio el sólido suele estar a una temperatura inferior de la que tendrá al final y la velocidad de evaporación va en aumento, por el contrario cuando el material está a una temperatura más elevada A', la velocidad de evaporación disminuye hasta llegar al punto B, en el cual, la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio. Este período inicial de ajuste en estado estacionario suele ser bastante corto y por lo general se pasa por alto en el análisis de los tiempos de secado. La recta entre el punto BC tiene una pendiente y velocidad constante. Durante este período, la superficie del sólido está muy húmeda al principio y sobre ella hay una película de agua continua. Esta capa de agua, es agua libre y actúa como si el sólido no estuviera presente. La velocidad de evaporación con las condiciones establecidas para el proceso, es independiente del sólido y esencialmente igual a la velocidad que tendría una superficie líquida pura. Si el sólido es poroso, la mayor parte del agua que se evapora durante el período de velocidad constante proviene de su interior. Este período continúa mientras el agua siga llegando a la superficie con la misma rapidez que con la que se evapora.

Los períodos de velocidad decreciente inician en el punto crítico de humedad C, al concluir los procesos de velocidad constante. En este punto no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película continua. La superficie ya no está totalmente húmeda, y la porción húmeda comienza a disminuir durante el período de velocidad decreciente hasta que la superficie queda seca en su totalidad, punto D. El segundo período de velocidad decreciente empieza en el punto D, aquí, el plano de evaporación comienza a desplazarse con lentitud por debajo de la superficie. El agua evaporada atraviesa el sólido para llegar hasta la corriente de aire. Es posible que la cantidad de humedad que se elimine durante este período sea bastante pequeña, pero aún así, el tiempo requerido puede ser largo<sup>[4]</sup>.

## 2.6 CLASIFICACIÓN DE LOS SECADORES

Los equipos de secado basándose en el método de transmisión de calor a los sólidos húmedos, se pueden clasificar en<sup>[2]</sup>: secadores directos, infrarrojos e indirectos.

1. **Secadores directos o por convección:** la transferencia de calor para el secado se logra por contacto directo entre el sólido húmedo y el gas caliente, el líquido vaporizado se arrastra con el medio de secado.
2. **Secadores infrarrojos o de calor radiante y secadores de calor dieléctrico:** el funcionamiento de los secadores de calor radiante, depende de la generación, la transmisión y la absorción de rayos infrarrojos, mientras que los de calor dieléctrico operan sobre el principio de la generación de calor dentro de sólidos, colocándolos dentro de un campo eléctrico de alta frecuencia.
3. **Secadores indirectos o por conducción:** el calor de secado se transfiere al sólido húmedo a través de una pared de retención. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento. La velocidad de secado depende del contacto que se establezca entre el material húmedo y la superficie caliente.

### 2.6.1 Tipos de secadores directos

- a) **Secadores continuos:** la operación es continua, sin interrupciones, en tanto se suministre la alimentación húmeda. Es evidente que cualquier secador continuo puede funcionar en forma intermitente o por lotes, si así se desea. Se clasifican en:

- **Secadores de material dosificado en una capa:** se hace pasar por el secador una capa o lámina continúa de materia, ya sea como franjas o en una lámina tensa y distendida sobre un marco con clavijas.
- **Secadores con transportador neumático:** el secado se realiza a menudo en combinación con la trituración. La materia se transporta dentro de gases a alta temperatura y velocidades elevadas hasta un colector de ciclón.
- **Secadores rotatorios:** el material se transporta y rocía dentro de un cilindro rotatorio por el que circulan gases calientes.
- **Secadores por aspersión:** la alimentación del secador debe poderse atomizar, ya sea mediante un disco centrífugo o una boquilla.
- **Secadores de circulación directa:** el material se mantiene en un tamiz de transporte continuo, mientras se sopla aire caliente a través de él.
- **Secadores de túnel:** el material colocado en carretillas se desplaza a través de un túnel en contacto con gases calientes.
- **Lechos fluidizados:** los sólidos se fluidizan en un tanque estacionario al ponerse en contacto con gas caliente. También pueden tener superficies de calor indirecto.
- **Secadores de bandejas:** se utiliza comúnmente para materiales granulares o para artículos individuales. El material se coloca en una serie de bandejas, el secado se lleva a cabo mediante la circulación de aire sobre el material.

**b) Secadores discontinuos:** se diseñan para operar con un tamaño específico de carga de alimentación húmeda, para ciclos de tiempo dados. En los secadores discontinuos, las condiciones de contenido de humedad y temperatura varían continuamente en cualquier punto del equipo. Entre los más utilizados se encuentran:

1. **Secadores de circulación directa:** El material se coloca en bandejas con bases de tamices a través de las cuales se impulsa el aire caliente.

2. **Lechos fluidos:** Los lechos se fluidizan en un vagón sobre el cual va montado un filtro de polvo.
3. **Secadores de bandejas o compartimientos:** El material se coloca en bandejas que pueden o no montarse en vagones eliminables y el aire se impulsa sobre el material contenido en las bandejas.

### 2.6.2 Contacto del sólido y gas dentro del secador

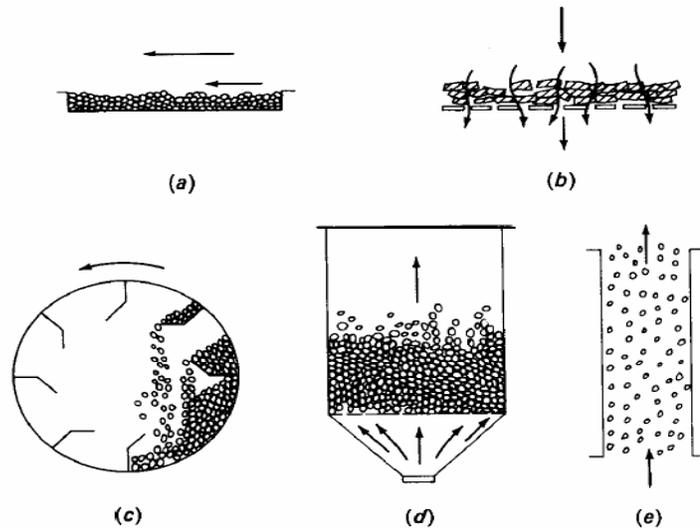
La mayor parte de los secadores industriales operan con partículas de sólidos durante todo o una parte del ciclo de secado, aunque, por supuesto, algunos secan grandes piezas individuales, tales como vasijas de cerámica o láminas de un polímero. En los secadores adiabáticos los sólidos están expuestos al gas de alguna de estas formas:

1. El gas circula sobre la superficie de un lecho o una lámina del sólido, o bien sobre una o ambas caras de una lámina o película continua. Este proceso se llama *secado con circulación superficial* (Fig. 2.8a.).
2. El gas circula a través de un lecho de sólidos granulares gruesos que están soportados sobre una rejilla. Recibe el nombre de *secado con circulación a través*. Como en el caso del secado con circulación superficial, la velocidad del gas se mantiene baja para evitar el arrastre de partículas sólidas (Fig. 2.8b).
3. Los sólidos descenden en forma de lluvia a través de una corriente gaseosa que se mueve lentamente, con frecuencia dando lugar a un arrastre no deseado de las partículas finas (Fig. 2.8c).
4. El gas pasa a través de los sólidos con una velocidad suficiente para fluidizar el lecho. Inevitablemente se produce arrastre de las partículas más finas (Fig. 2.8d).

5. Los sólidos son totalmente arrastrados por una corriente gaseosa de alta velocidad y neumáticamente transportados desde un dispositivo de mezcla hasta un separador mecánico (Fig. 2.8e) <sup>[39]</sup>.

En el equipo de contacto gas-sólido, los sólidos pueden encontrarse en cualquiera de las cuatro condiciones siguientes<sup>[2]</sup>:

- **Estático:** éste es un lecho denso en forma de láminas de sólidos en el cual cada partícula descansa sobre otras, debido a la densidad de la masa, aquí no existe movimiento relativo entre las partículas sólidas.
- **Móvil:** éste es un tipo de lecho de sólidos ligeramente restringido en el cual las partículas están separadas apenas lo suficiente para fluir o deslizarse unas sobre otras. Por lo común, el flujo es descendente por acción de la fuerza de gravedad; pero también se puede registrar un movimiento ascendente debido a la elevación mecánica o a la agitación, generada dentro del equipo del proceso. En algunos casos, la elevación de sólidos se lleva a cabo en equipos independientes y éstos fluyen en presencia de la fase gaseosa sólo en sentido descendente.
- **Fluidizado:** se trata de una condición menos restringida aún, en el cual las partículas sólidas se sostienen por medio de fuerzas de arrastre provocadas por la fase gaseosa que pasa por los intersticios de las partículas, con una velocidad crítica dada. Es una condición inestable, porque la velocidad superficial ascendente del gas es menor que la velocidad final de asentamiento o sedimentación de las partículas sólidas; la velocidad del gas no basta para arrastrar y transportar en forma continua todos los sólidos. Al mismo tiempo, dentro de la corriente de gas se registran turbulencias con velocidades bastante grandes para elevar transitoriamente las partículas. El movimiento de estas partículas es repetidamente ascendente y descendente. En realidad, la fase de los sólidos y la fase gaseosa están entremezcladas y se comportan juntas como un fluido de ebullición.
- **Diluido:** ésta es una condición de expansión total en la cual las partículas sólidas están tan separadas entre sí que prácticamente no ejercen ninguna influencia unas sobre otras. A decir verdad, la fase sólida está tan dispersa dentro del gas que la densidad de la suspensión es fundamentalmente la de la fase gaseosa individual. Por lo común, esta situación se presenta cuando la velocidad del gas en todos los puntos del sistema sobrepasa la velocidad final de asentamiento de los sólidos, y las partículas ascienden y son arrastradas continuamente por el gas; no obstante, no siempre será éste el caso.



**Figura 2.8** Modelos de interacción gas-sólido en secaderos: (a) flujo de gas sobre un lecho estático de sólidos; (b) flujo de gas a través de un lecho de sólidos; (c) acción en un secadero rotatorio; (d) lecho fluidizado de sólidos; (e) flujo en paralelo gas-sólido en un secadero flash de transporte neumático<sup>[2]</sup>.

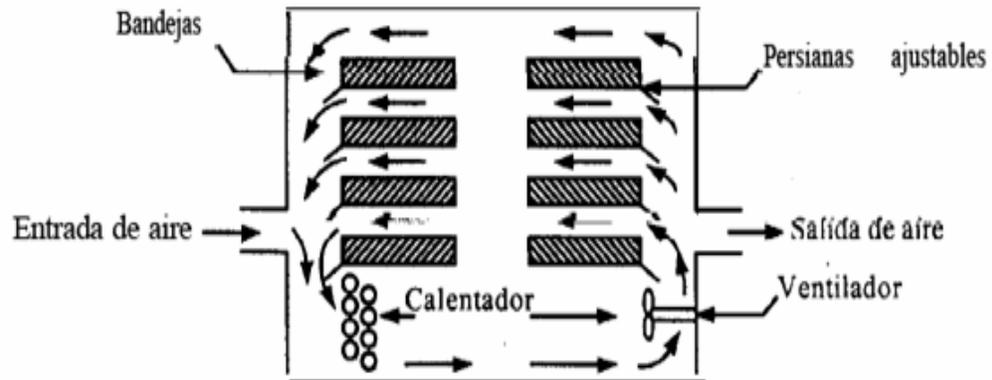
## 2.7 DESCRIPCIÓN DEL SECADOR DISCONTINUO DE BANDEJA O COMPARTIMIENTOS

Es un equipo totalmente cerrado y aislado en el cual los sólidos se colocan en grupos de bandejas. La transferencia de calor puede ser directa del gas a los sólidos, utilizando la circulación de grandes volúmenes de gas caliente, o indirecta, utilizando bases calentadas, serpentines de calefacción o paredes refractarias en el interior de la cubierta<sup>[19]</sup>.

En el secador de bandejas, también llamado secador de anaqueles, de gabinete, o de compartimientos, el material, que puede ser un sólido en forma de terrones o una pasta, se esparce uniformemente sobre una bandeja de metal de 10 mm a 100 mm de profundidad.

Un secador de bandejas típico, se muestra en la figura 2.9, tiene bandejas que se cargan y se descargan en un gabinete. Un ventilador hace recircular el aire calentando con vapor paralelamente con la superficie de las bandejas. También se usa calor eléctrico, en especial cuando el calentamiento es más bajo. Más o menos del 10% al 20% del aire que pasa sobre las bandejas es nuevo, y el resto es aire recirculado. Después del secado, se abre el gabinete y las bandejas se reemplazan por otras con más material para secado.

Una de las modificaciones de este tipo de secadores es el de las bandejas con carretillas, donde las bandejas se colocan en carretillas que se introducen al secador. Esto significa un considerable ahorro de tiempo, puesto que las carretillas pueden cargarse y descargarse fuera del secador. En el caso de materiales granulares, el material se puede colocar sobre bandejas cuyo fondo es un tamiz. Entonces, con este secador de circulación cruzada, el aire pasa por un lecho permeable y se obtienen tiempos de secado más cortos, debido a la mayor área superficial expuesta al aire<sup>[4]</sup>.



**Figura 2.9** Secador de bandejas o anaqueles<sup>[4]</sup>.

## **2.8 TEORÍA DE LA DIFUSIÓN DE LIQUIDOS EN EL SECADO**

La forma general de la curva de la velocidad de secado de un sólido granular ha puesto, de manifiesto que en ella suelen aparecer dos o a veces tres secciones distintas. Durante el periodo de velocidad constante, la humedad se vaporiza en la corriente de aire y el factor controlante es el coeficiente de transferencia para la difusión a través de la película de gas. Es importante comprender que la humedad se desplaza desde el interior del sólido hasta la superficie en el período de velocidad decreciente. Se han propuesto explicaciones para la naturaleza física de este proceso, una de ellas es la teoría de la difusión.

En ésta se supone que la velocidad del desplazamiento del agua hacia la interfase con el aire está gobernada por ecuaciones de la velocidad similares a las que existen para la transferencia de calor<sup>[40]</sup>.

### **2.8.1 Proceso de difusión en el secado de sólidos**

La difusión es el movimiento, bajo la influencia de un estímulo físico, de un componente individual a través de un medio. La causa más frecuente de la difusión es un gradiente de concentración del componente que difunde. Un gradiente de concentración tiende a mover el componente en una dirección tal que iguale las concentraciones y anule el gradiente. Cuando el gradiente se mantiene mediante el suministro continuo de los componentes de baja y alta concentración, el flujo del componente que se difunde es continuo. Este movimiento es aprovechado en las operaciones de transferencia de materia. Aunque la causa habitual de la difusión es un gradiente de concentración, la difusión también puede ser originada por un gradiente de presión, por un gradiente de temperatura o por la aplicación de una fuerza externa como en el caso de una centrífuga. La difusión molecular inducida por un gradiente de presión (no presión parcial) recibe el nombre de difusión de presión, la inducida por la temperatura es la difusión térmica, y la debida a un campo externo es la

difusión forzada. Las tres son muy poco frecuentes en ingeniería química, y aquí solamente se considerará la difusión bajo un gradiente de concentración.

La difusión no está restringida a la transferencia molecular a través de capas estacionarias de sólido o fluido. También tiene lugar en fases fluidas debido a la mezcla física o a los remolinos del flujo turbulento, de la misma forma que el calor puede fluir en un fluido por convección. Este hecho recibe el nombre de difusión en régimen turbulento. A veces el proceso de difusión va acompañado de flujo global de la mezcla en una dirección paralela a la dirección de difusión, y con frecuencia está relacionada con el flujo de calor <sup>[39]</sup>.

### **2.8.2 La difusión en la transferencia de materia**

En todas las operaciones de transferencia de materia la difusión ocurre por lo menos en una fase, y con frecuencia en dos fases. Para la operación de secado, el agua líquida difunde a través del sólido hacia la superficie del mismo, se evapora, y después se difunde como vapor en la fase gaseosa. La zona de evaporación puede estar bien en la superficie del sólido o en el interior del mismo. Cuando la zona de evaporación está en el sólido, la difusión tiene lugar en el sólido comprendido entre la zona de evaporación y la superficie, de forma que en el sólido hay difusión de líquido y de vapor <sup>[39]</sup>.

En todos los secadores en los que un gas circula sobre o a través de los sólidos, la materia tiene que transferirse desde la superficie del sólido hasta el gas, y a veces a través de los poros interiores de sólido. La resistencia a la transferencia de materia, y no la transmisión de calor, puede controlar la velocidad de secado. Esto ocurre con más frecuencia en el secado con circulación sobre tablas, láminas o lechos de sólidos. Desde el punto de vista del gas, este tipo de secado es muy parecido a la humidificación adiabática; desde el punto de vista del sólido es análogo a la evaporación cuando el sólido está muy húmedo, y como la desorción de disolvente desde un adsorbente cuando el sólido está prácticamente seco <sup>[2]</sup>.

### 2.8.3 Comparación entre la difusión y la transferencia de calor

Existe una analogía entre el flujo de calor y la difusión. En cada caso la causa del flujo es un gradiente. En transmisión de calor la fuerza impulsora es un gradiente de temperatura. En ambos casos la densidad del flujo es directamente proporcional al gradiente. Sin embargo la analogía no puede extenderse más allá, debido a que el calor no es una sustancia, sino energía en tránsito. Cuando el calor fluye de un punto a otro, no deja espacio detrás de sí ni requiere un espacio para una nueva localización. La difusión es un flujo físico de materia que transcurre con una velocidad definida. Un componente que se difunde deja detrás de él un espacio y es preciso disponer de un lugar para su nueva localización.

La naturaleza material de la difusión y el flujo que resulta conducen a tres tipos de situaciones:

1. Solamente se trasfiere un componente  $A$  de la mezcla hacia o desde la interfase y el flujo total es el correspondiente a  $A$ . La absorción de un sólo componente desde un gas hacia un líquido es un ejemplo de ese tipo.
2. La difusión de un componente  $A$  en una mezcla está equilibrada por un flujo molar igual y de sentido contrario al componente  $B$ , de tal forma que no hay flujo molar neto. Esto ocurre generalmente en destilación, lo cual da lugar a que no haya flujo neto de volumen en la fase gaseosa. Sin embargo, generalmente existe un flujo neto de volumen o de masa en la fase líquida debido a la diferencia de densidades molares.
3. La difusión de  $A$  y  $B$  tiene lugar en sentidos contrarios, pero las densidades molares de flujo son diferentes. Esta situación se presenta con frecuencia en la difusión de especies que reaccionan químicamente hacia o desde la superficie de un catalizador<sup>[39]</sup>.

### 2.8.4 Difusión del líquido en el proceso de secado

Se supone que la transferencia de masa está controlada por la difusión cuando el flujo de líquido o vapor está de acuerdo con la segunda Ley de Fick. Esta ecuación define la difusión en régimen no permanente, expresando la transferencia de masa como:

$$\partial C/\partial t = D_{AB}(\partial^2 C/\partial x^2) \quad (\text{Ec. 2.16})$$

donde:

C = concentración de un componente, en una fase de un componente de A y B (kg de agua/m<sup>3</sup> de sólido húmedo).

D<sub>AB</sub> = difusividad binaria de la fase AB (m<sup>2</sup>/s).

t = tiempo de difusión (s).

x = distancia en dirección de la difusión (m).

Esta ecuación aplica a la difusión en sólidos, líquidos y gases estacionarios.

La ecuación de difusión en el periodo de secado con velocidad decreciente para una placa se puede obtener de la ecuación de difusión, si se supone que la superficie está seca o tiene un contenido de humedad de equilibrio y la distribución inicial de humedad es uniforme.

El desplazamiento interno de la humedad hacia la superficie es un proceso de difusión que sigue las mismas leyes que la transmisión de calor <sup>[40]</sup>.

Entonces:

$$\frac{X_w - X_{we}}{X_{w0} - X_{we}} = \frac{\text{Contenido libre de líquido en un punto e instante}}{\text{cualquiera}} \frac{\text{Contenido libre de líquido inicial}}{\text{cualquiera}}$$

Sean:

$X_w$ = contenido de agua en un tiempo dado (kg de agua/kg de sólido seco).

$X_{we}$ = contenido de agua en el equilibrio (kg de agua/kg de sólido seco).

$X_{w_0}$ = contenido de agua inicialmente a un tiempo igual a cero (kg de agua/kg de sólido seco).

Dando solución a la ecuación 2.16 de la siguiente forma:

$$\frac{X_w - X_{we}}{X_{w_0} - X_{we}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ -\frac{(2n+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D \ell \cdot t}{4 \cdot d^2} \right] \quad (\text{Ec. 2.17})$$

donde:

$D\ell$  = difusividad efectiva. (m<sup>2</sup>/s).

t= tiempo de secado (s).

d= mitad del espesor de la capa de sólido a través de la que ocurre la difusión.  
(m).

Cuando la evaporación ocurre en una sola cara, d es igual al espesor total, en m. en la tabla 2.3 se muestran otras ecuaciones que se pueden utilizar para el estudio de la difusividad<sup>[16]</sup>.

**Tabla 2.3.** Modelos matemáticos para el estudio de difusividad<sup>[16]</sup>.

| <b>Nombre</b>      | <b>Ecuación</b>               |
|--------------------|-------------------------------|
| Newton             | $MR = \text{Exp} (-kt)$       |
| Page               | $MR = \text{Exp} (-kt)^n$     |
| Page<br>modificado | $MR = \text{Exp} [(-kt)^n]$   |
| Henderson y        | $MR = a [\text{Exp} (-kt^n)]$ |

|             |  |
|-------------|--|
| Pabis       |  |
| Logarítmico | $MR = a \left[ \text{Exp} \left( - kt^n \right) \right] + c$             |
| Thomson     | $MR = 1 + at + bt^2$<br>$t = a \ln( MR ) + b \left[ \ln( MR ) \right]^2$ |

### 2.8.5 Ecuación de Arrhenius

La difusividad efectiva se expresa habitualmente en función de la temperatura y del contenido en humedad. La dependencia de la difusividad con la temperatura se describe generalmente mediante la ecuación de Arrhenius y ésta permite estudiar el efecto de la temperatura en el coeficiente de difusión efectivo del agua durante el proceso de secado. Se expresa de la siguiente manera<sup>[42]</sup>:

$$D_l = D_o \exp \left( - \frac{E_a}{R.T} \right) \quad (\text{Ec. 2.18})$$

donde:

$D_l$ = coeficiente de difusión efectivo del agua ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

$D_o$ = es el factor de frecuencia ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

$E_a$ = energía de activación ( $\text{J}/\text{mol}$ ).

$R$ = constante universal de los gases ( $8,314 \text{ J}/\text{mol. K}$ ).

$T$ = temperatura absoluta ( $\text{K}$ ).

La determinación exacta de la energía de activación para la difusión de agua se considera muy importante para entender el fenómeno de la difusión. Se ha demostrado que el factor de Arrhenius  $D_o$  y la energía de activación para la difusión del agua  $E_a$ , son propiedades estrechamente relacionadas<sup>[43]</sup>.

Al linealizar las ecuación 2.18, se tiene:

$$\ln D_l = \ln D_o - \frac{E_a}{R.T}$$

(Ec. 2.19)

La representación gráfica de  $\ln D$  vs.  $1/T$  corresponde a una línea recta cuyo intercepto es igual a  $\ln D_0$  y la pendiente es igual a  $E_a/R$ .

## **CAPITULO III**

### **DESARROLLO DEL PROYECTO**

En esta investigación se efectuó un procedimiento experimental en dos etapas: en la primera de ellas, luego de seleccionado el sólido, fue sometido a proceso de secado a temperaturas de 30 °C, 40 °C, 50 °C y 60 °C, en un secador discontinuo de bandejas, en la segunda fase de la experiencia, este sólido fue sometido a la operación de molienda, y posteriormente fue tamizado, para obtener las harinas a las diferentes temperaturas utilizadas, con la finalidad de realizar las caracterizaciones fisicoquímicas y funcionales del producto y así verificar que sus propiedades no se alteraran en el rango de temperatura estudiado.

#### **3.1 ESCOGENCIA DE LA HUMEDAD INICIAL A UTILIZARSE EN EL PROCESO DE SECADO DE FRIJOL**

##### **3.1.1. Acondicionamiento del secador**

En vista de que el secador utilizado es de construcción convencional y no posee una balanza incorporada que permita determinar la pérdida de humedad a través del tiempo, se realizó un secado preliminar con el objetivo de definir el funcionamiento adecuado del secador de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Inicialmente se cambió el portafusible del equipo y se corrigieron las fugas incorporándole gomas para sellar los bordes.
- Se verificó que la resistencia térmica alcanzara las temperaturas a ser utilizadas en las experiencias (30 °C, 40 °C, 50 °C y 60 °C).

- El aire de secado se calentó a una temperatura de 50 °C.
- Se humedeció una muestra de frijol hasta alcanzar una humedad de aproximadamente 13%, distribuyéndola en 15 envases de aluminio, los cuales se colocaron en la primera de las cuatro bandejas de la que consta el secador.
- Se realizó el proceso de secado tomando lecturas de masa de sólido húmedo en intervalos de tiempo de 5 minutos, desechando cada envase utilizado hasta completar los 15.
- Este procedimiento se realizó por triplicado y se repitió para las otras tres bandejas del secador, utilizando la misma temperatura y humedad inicial del sólido, para un total de 12 corridas preliminares, estos resultados se reflejan en las tablas A1 a A4 del anexo A.
- Con los datos obtenidos se construyeron gráficas de humedad (base seca) en función del tiempo como se muestra en la figura A5-A9 del anexo A.
- A partir del comportamiento de las gráficas, se escogieron las bandejas dos y tres del secador para realizar las experiencias del estudio, puesto que ellas reprodujeron humedades finales similares, permitiendo así, trabajar con una mayor carga al secador para poder alcanzar el equilibrio que no se logró cuando se utilizaron los 15 envases de aluminio.

### **3.1.2. Selección de la carga**

- Buscando la uniformidad de los granos de frijol, se desecharon los deteriorados y de coloración oscura, cuidando de que los mismos mantuvieran una forma geométrica similar.
- Se escogieron 30 envases de aluminio de dimensiones: 7,5 cm x 4,0 cm, que tuvieran aproximadamente el mismo peso.
- En los 30 envases seleccionados se colocó una monocapa de sólidos, minimizando los espacios vacíos, y se pesaron, obteniéndose un valor de  $14,51 \pm 0,02$  gramos por envase.

- Para los 30 envases se obtuvo una carga de 435,3 gramos, pero se tomó como carga final 460,0 gramos, puesto que la diferencia de 24,7 gramos se utilizó en el método de la estufa.

### **3.1.3. Determinación de la humedad en base húmeda del sólido**

- Con la carga de 460,0 gramos de frijol se realizaron pruebas de ensayo y error, para determinar la cantidad de agua que se añadiría al frijol para alcanzar la humedad en base húmeda en un rango entre 14% y 15%, correspondiente a la maduración fisiológica o cosecha. Los resultados se muestran en la tabla 3.1.
- La cantidad de agua determinada de las pruebas de ensayo y error fue de 450 ml, y se colocó en un envase plástico junto con la masa de sólido seco (460 gramos), durante un tiempo de permanencia de 10 minutos.
- Transcurridos los 10 minutos se colaron y dispersaron sobre papel absorbente para eliminar el exceso de agua y luego calcular la cantidad de agua que recibió el sólido y así determinar la humedad ganada en base húmeda.

## **3.2 REPRODUCCIÓN DE LAS CURVAS DE VELOCIDAD DE SECADO DE FRIJOL, A DIFERENTES TEMPERATURAS**

### **3.2.1 Método de la estufa para la determinación de la masa del sólido totalmente seco**

Para determinar la humedad de las muestras de frijol húmedo, se utilizó una estufa con corriente de aire marca Memmert de 30-220 °C, con una apreciación de  $\pm 2$  °C, realizando la experiencia por triplicado para cada una de las corridas.

- Se expusieron, previamente pesadas, las muestras a una temperatura de 110 °C por un tiempo de 2 horas.

- Se retiraron y colocaron en un desecador con la finalidad de que alcanzaran su equilibrio térmico, finalmente se pesaron, y se calculó el contenido de humedad de las tres muestras.
- Conociendo el contenido de humedad de las muestras y el peso inicial de cada una de ellas, se determinó la masa del sólido totalmente seco.

### **3.2.2 Proceso de secado de frijol en secador discontinuo de bandejas**

Este proceso se efectuó en un secador discontinuo de bandejas en el que se realizaron tres pruebas experimentales, para un total de doce experiencias a temperaturas de 30 °C, 40 °C, 50 °C y 60 °C. Estas temperaturas fueron seleccionadas tomando como base referencias bibliográficas que especifican que para estas leguminosas, la temperatura de secado no debe exceder a 65 °C [45]. La temperatura en cada corrida experimental fue regulada a través de un sensor digital incorporado al equipo de secado, adicionalmente se utilizó un termómetro bimetálico que se colocó dentro del secador con una apreciación de  $\pm 2$  °C, para confirmar que la temperatura indicada por el sensor fuera la correcta. Este procedimiento se especifica a continuación:

- Se distribuyó en los 30 envases de aluminio la carga previamente humedecida para luego ser pesada.
- Se utilizaron dos balanzas marcas Denver y Ohaus, con la finalidad de minimizar el tiempo de exposición del sólido húmedo, a la corriente de aire del ambiente durante la pesada,
- Se introdujeron los envases de aluminio al secador retirándolos uno a uno a intervalos de tiempo de 10 minutos, utilizando un cronómetro de apreciación  $\pm 0,01$  segundos.
- Finalmente cada envase se colocó en el desecador y se pesó para determinar la masa de sólido húmedo retirada para ese instante de tiempo.

Las muestras de frijol se colocaron en bolsas de polietileno con cierre hermético, etiquetadas según la temperatura de secado y almacenadas en el laboratorio de análisis de Alimentos de la Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, en un lugar seco y fresco, a temperatura ambiente.

### 3.2.3 Curvas de velocidad de secado de frijol

- El peso del sólido húmedo que se obtuvo del secado incluye el peso del envase de aluminio, por lo tanto se le resta el peso del envase.
- Los datos obtenidos se expresan como peso total del sólido húmedo a diferentes intervalos de tiempo.
- Se calculó la humedad en base seca con la masa del sólido totalmente seco, obtenida en la sección 3.2.1 a través de la ecuación 2.11 y se graficó en función del tiempo.
- Se realizaron las correcciones a la curva de secado obtenidas, utilizando el software Statgraphics Plus 5.1, mediante la aplicación del método de ajuste de raíz cuadrada de X.
- De las gráficas se determinó el contenido de humedad de equilibrio.
- Se calculó el contenido de humedad libre, restando la humedad en base seca para cada instante de tiempo (intervalos de 10 minutos), menos la humedad de equilibrio
- Usando los datos calculados se trazaron las gráficas del contenido de humedad libre en función del tiempo.
- Con las pendientes de estas curvas, la masa del sólido totalmente seco y el área del envase de aluminio (determinada multiplicando el largo por el ancho), se calculó la velocidad de secado, utilizando la ecuación 2.15 y luego se procedió a graficar las curvas de velocidad de secado en función de la humedad libre.

### **3.3 OBTENCIÓN DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA DEL AGUA APLICANDO LA SEGUNDA LEY DE FICK, A DIFERENTES TEMPERATURAS**

Como el frijol no tiene una forma geométrica simple, regular y homogénea, se dificultó calcular su espesor, por lo que se hizo necesario determinar de manera empírica el espesor de una monocapa del sólido, como se explica a continuación:

- Se colocó entre dos listones de madera de 41,5 cm x 1,0 cm, una cantidad de granos repartidos uniformemente, fijándolos con cinta adhesiva transparente formando un rectángulo.
- Posteriormente se midió la altura del espacio ocupado por los granos de frijol en diferentes puntos del rectángulo, coincidiendo estas en un valor aproximado de 6 mm.
- Con los datos de humedad obtenidos de las curvas de secado, el espesor de la monocapa de frijol y el tiempo de secado, se calculó el coeficiente de difusividad efectivo, utilizando la ecuación 2.17.

### **3.4 CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA Y FUNCIONAL DEL PRODUCTO A LAS CONDICIONES OBTENIDAS.**

#### **3.4.1 Preparación de las harinas**

Una vez secados los granos de frijol a las diferentes temperaturas, se obtuvieron harinas con la finalidad de poder determinar sus características físicoquímicas y funcionales, de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Se tomaron las muestras de frijol almacenado y se sometieron a un proceso de molienda utilizando una licuadora marca Oster, por un tiempo de

cizallamiento de 3 minutos continuos a la máxima velocidad establecida por el equipo.

- Luego se pasó por una tamizadora marca Denver Equipment, localizada en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, empleando para ello un tamiz de 60 mallas por un tiempo de 5 minutos con la finalidad de normalizar el tamaño de la muestra.

### **3.4.2 Caracterización fisicoquímica y funcional de la harina de frijol**

La caracterización fisicoquímica y funcional de las muestras de harina de frijol se efectuó por triplicado a las temperaturas utilizadas, empleando diferentes métodos, tanto estandarizados como no estandarizados, los cuales se explican a continuación:

#### **3.4.2.1 Determinación de la humedad empleando la balanza automática Ohaus**

Para realizar la medición de la humedad en base húmeda mediante la balanza Ohaus, se procedió de la siguiente manera:

- Colocar el portamuestra de aluminio en la cabina de la balanza Ohaus y tarar.
- Pesar de 3 a 5 g de la muestra y colocarla en el portamuestra de aluminio.
- Fijar la relación tiempo/temperatura de ensayo en la balanza.
- Leer directamente el contenido de humedad en la pantalla, una vez finalizado el tiempo.

#### **3.4.2.2. Determinación de proteína empleando el Método de Kjeldahl. Norma COVENIN 1195-80.**

Para calcular la cantidad de proteínas se utilizó el método de Kjeldahl, siguiendo los pasos que se especifican a continuación:

- Pesar aproximadamente 1,5 g de muestra en un tubo para la digestión.
- Añadir aproximadamente 1 g de catalizador en el tubo de digestión y 3 ml de ácido sulfúrico concentrado.
- Comenzar la digestión con la temperatura baja.

- Digestar hasta que el extracto esté completamente claro y comience a aparecer humo blanco del ácido sulfúrico. Apagar el equipo y dejar enfriar.
- Agregar agua destilada en pequeñas porciones y agitar para evitar que se cristalice ir disolviendo la muestra poco a poco.
- Previamente tener preparada una fiola con 10 ml de solución receptora (ácido bórico) y colocarla en el extremo del condensador para recoger el destilado.
- Añadir muy lentamente 15 ml de solución de hidróxido de sodio al 18 N.
- Encender la resistencia de calentamiento, cuando comience el burbujeo en la solución, recoger 20 ml aproximadamente del destilado.
- Titular hasta el viraje del indicador y anotar el volumen gastado de titulante.

#### **3.4.2.3 Determinación de ceniza. Norma COVENIN 1783-81.**

El contenido de cenizas presente en la muestra de harina de frijol, se determinó de la siguiente manera:

- Pesar 3 g de la muestra en un crisol previamente secado y tarado.
- Colocar los crisoles con la muestra en una mufla a 550 °C durante 16 horas o hasta obtener cenizas de color gris claro.
- Retirar el crisol de la mufla, colocar en un desecador hasta que alcance la temperatura ambiente y pesar nuevamente.

#### **3.4.2.4 Determinación de grasa. Norma COVENIN 1785-81.**

Para determinar el contenido de grasa presente en las muestras de harinas de frijol, se procedió de la siguiente manera:

- Pesar de 1 a 2 gramos de la muestra seca y pulverizada en cada dedal de extracción, previamente tarado.
- Fijar los dedales en el equipo de extracción Soxhlet.
- Agregar de 60 a 80 ml de solvente en cada beacker para solvente (estos deben lavarse y secarse en una estufa, enfriarlos en un desecador a temperatura ambiente y luego pesarlos antes del análisis).
- Abrir la llave de agua que enfría el condensador y colocar los beacker con solvente sobre las placas calientes, bajo el condensador.

- Cerrar herméticamente el sistema. Encender el equipo y seleccionar el ciclo de extracción.
- Apagar el equipo y abrir el sistema una vez finalizada la extracción
- Colocar los dedales y los beacker con el solvente y la grasa extraída en la estufa, a 70 °C por 20 minutos.
- Retirar los dedales y los beacker de la estufa y colocarlos en un desecador, enfriar y pesar.

#### **3.4.2.5 Obtención del índice de absorción de agua (IAA).**

El índice de absorción de agua en las muestras de harina de frijol, se obtuvo de la forma siguiente:

- Pesar el tubo de la centrifuga de 15 mL.
- Añadir 1 g de muestra en un vidrio de reloj y colocarla en el tubo.
- Agregar 10 mL de agua destilada y agitar manualmente durante 1 minuto.
- Centrifugar a 3200 rpm por 30 minutos.
- Separar el líquido sobrenadante del sólido depositado y pesar el gel retenido en el tubo de la centrífuga.
- Con el cociente del peso del gel entre el peso inicial de la muestra se determinó el Índice de Absorción de Agua.

#### **3.4.2.6 Obtención del índice de solubilidad en agua (ISA)**

- El índice de solubilidad en agua en las muestras de harina de frijol, se obtuvo de acuerdo a los siguientes pasos:
- Verter en una Cápsula Petri previamente secada y pesada el líquido sobrenadante de cada tubo, obtenido en el procedimiento de absorción de agua.
- Colocar las cápsulas en una estufa a 70 °C por 24 horas.
- Pesar las cápsulas con el sobrenadante seco.
- Restar el peso del sobrenadante inicial menos el seco, y con esta diferencia entre el peso inicial de la muestra se obtuvo el Índice de Solubilidad en Agua.

### 3.5 EQUIPOS, MATERIALES, SUSTANCIAS

Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron los equipos, materiales y sustancias que se mencionan a continuación:

#### **Equipos**

- Equipo de Secado de construcción convencional, conformado por extractor de aire, serpentín de calefacción, termómetro, cronómetro, relé conectado a un resistencia y un interruptor.
- Estufa con control automático de temperatura, marca Memmer, Modelo BE400 con rangos de temperatura de 30-220 °C.
- Balanza. Marca: OHAUS Explorer pro. Modelo: EP 4102C apreciación  $\pm 0,01$  g.
- Balanza de Humedad. Marca: OHAUS. Modelo: MB 200 apreciación  $\pm 0,01$  g.
- Balanza Analítica Electrónica. Marca: Denver Instrument Company. Modelo: AA-200 apreciación  $\pm 0,0001$  g.
- Balanza Electrónica. Marca: OHAUS. Modelo: Adventurer Pro AV114C apreciación  $\pm 0,0001$  g.
- Equipo de Extracción de Grasa por Solventes. Marca: Velp Scientifica. Modelo: SER 48.
- Mufla con control automático. Marca Vulcan Boxfurnace. Modelo A-130 Rango: 0 a 1200 °C.
- Licuadora de 3 velocidades. Marca: Oster.
- Equipo digestor para Proteína. Marca Velp Scientifica. Modelo RC2.
- Equipo destilador de Proteína a vapor. Marca Velp Scientifica. Modelo UDK130D.

- Centrifugadora clínica. Marca Internacional Equipment Clinical. Rango: 0 a 6000 r.p.m.
- Tamizador. Marca Denver Equipment. Modelo WL 102470-5.

### **Materiales**

- Vasos de precipitado de 100, 250 y 500 ml.
- Cilindros graduados de 10, 50, 100, 500 ml y 1L
- Pipetas de 1, 5 y 15 ml.
- Termómetros de mercurio, rango 20 a 100 °C.
- Embudo.
- Matraces erlenmeyer de 50 ml.
- Buretas graduadas de 25 y 50 ml.
- Soportes universal.
- Cronómetro de apreciación 0,01 s.
- Dedales de Extracción.
- Desecador (con agente deshidratante).
- Gradilla.
- Agitadores de vidrio.
- Balones aforados de 500 y 1000 ml.
- Colador.
- Espátula.
- Tamiz 60 Mesh.
- Capsulas de Petri.
- Vidrio de Reloj.
- Tubos para centrifuga graduados de 15 ml.
- Crisoles de Gooch.
- Bolsas de polietileno con cierre hermético.

- Pinzas.
- Cilindros graduados de 25, 50 y 500 ml.
- Goteros plásticos.
- Papel de filtro.

### **Sustancias**

- Solución de ácido bórico al 4 %.
- Solución de ácido clorhídrico al 0,1 N.
- Solución alcohólica de fenolftaleína al 1 %.
- Solución de hidróxido de sodio al 18N.
- Solución de verde de bromocresol y rojo de metilo al 0,2 % en etanol.
- Catalizador para proteínas (sulfato de potasio-sulfato de cobre).
- Fibra de vidrio.
- Agua destilada.
- n-Octanol.
- Alcohol etílico al 90 % v/v neutralizado.
- n-Hexano al 99 % v/v.
- Acido sulfúrico concentrado.
- Biftalato de potasio.

### **3.6 TABLAS DE DATOS**

A continuación se presentan los datos obtenidos en las pruebas experimentales realizadas para el proceso de secado y en la caracterización fisicoquímica y funcional de las muestras de frijol.

**Tabla 3.1.** Volumen de agua agregada y recogida por el sólido para una carga de 460 g, para la determinación de la humedad en base húmeda entre el 14% y 15%.

| Corrida | Volumen de agua agregada (mL) | Volumen de agua recogida (mL) |
|---------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1       | 550                           | 452,6                         |
| 2       | 500                           | 416,1                         |
| 3       | 450                           | 372,3                         |

**Tabla 3.2.** Datos obtenidos para determinar la humedad en base húmeda y en base seca por el método de la estufa para la experiencia a 30 °C.

| Corrida         | Masa env. Vacío (g) | Masa sólido húmedo (g) | Masa sólido seco + env. vacío (g) | Masa sólido seco (g) |
|-----------------|---------------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| 1               | 2,8556              | 9,9220                 | 11,3569                           | 8,5013               |
|                 | 2,8537              | 9,9643                 | 11,3322                           | 8,4785               |
|                 | 2,8564              | 9,9520                 | 11,3343                           | 8,4779               |
| <b>Promedio</b> | <b>2,8552</b>       | <b>9,9461</b>          | <b>11,3411</b>                    | <b>8,4859</b>        |
| 2               | 2,8556              | 9,9637                 | 11,3395                           | 8,4839               |
|                 | 2,8537              | 9,9312                 | 11,3564                           | 8,5027               |
|                 | 2,8564              | 9,9280                 | 11,3518                           | 8,4954               |
| <b>Promedio</b> | <b>2,8552</b>       | <b>9,9410</b>          | <b>11,3492</b>                    | <b>8,4940</b>        |
| 3               | 2,8556              | 9,9384                 | 11,2989                           | 8,4433               |
|                 | 2,8537              | 9,9972                 | 11,3105                           | 8,4568               |
|                 | 2,8564              | 9,9872                 | 11,3433                           | 8,4869               |
| <b>Promedio</b> | <b>2,8552</b>       | <b>9,9743</b>          | <b>11,3176</b>                    | <b>8,4623</b>        |

**Tabla 3.3.** Datos obtenidos para determinar la humedad en base húmeda y en base seca por el método de la estufa para la experiencia a 40 °C.

| Corrida         | Masa env. Vacío (g) | Masa sólido húmedo (g) | Masa sólido seco + env. vacío (g) | Masa sólido seco (g) |
|-----------------|---------------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| 1               | 1,2638              | 7,7018                 | 7,8474                            | 6,5836               |
|                 | 1,2411              | 7,7395                 | 7,8521                            | 6,6110               |
|                 | 1,2407              | 7,6595                 | 7,7842                            | 6,5435               |
| <b>Promedio</b> | <b>1,2485</b>       | <b>7,7003</b>          | <b>7,8279</b>                     | <b>6,5794</b>        |
| 2               | 1,2638              | 7,6804                 | 7,8570                            | 6,5932               |
|                 | 1,2411              | 7,7855                 | 7,8563                            | 6,6152               |
|                 | 1,2407              | 7,6545                 | 7,7832                            | 6,5425               |
| <b>Promedio</b> | <b>1,2485</b>       | <b>7,7068</b>          | <b>7,8322</b>                     | <b>6,5836</b>        |
| 3               | 1,2638              | 7,9806                 | 7,8676                            | 6,6038               |
|                 | 1,2411              | 7,6852                 | 7,9092                            | 6,6681               |
|                 | 1,2407              | 7,4535                 | 7,7129                            | 6,4722               |
| <b>Promedio</b> | <b>1,2485</b>       | <b>7,7064</b>          | <b>7,8299</b>                     | <b>6,5814</b>        |

**Tabla 3.4.** Datos obtenidos para determinar la humedad en base húmeda y en base seca por el método de la estufa para la experiencia a 50 °C.

| Corrida         | Masa env. Vacío (g) | Masa sólido húmedo (g) | Masa sólido seco + env. vacío (g) | Masa sólido seco (g) |
|-----------------|---------------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| 1               | 1,2638              | 7,9806                 | 7,8670                            | 6,6032               |
|                 | 1,2411              | 7,6852                 | 7,8179                            | 6,5768               |
|                 | 1,2407              | 7,4535                 | 7,7819                            | 6,5412               |
| <b>Promedio</b> | <b>1,2485</b>       | <b>7,7064</b>          | <b>7,8223</b>                     | <b>6,5737</b>        |

|                 |               |               |                |               |
|-----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| 2               | 2,8556        | 9,8235        | 11,2721        | 8,4165        |
|                 | 2,8537        | 9,8399        | 11,2521        | 8,3984        |
|                 | 2,8564        | 9,8172        | 11,2166        | 8,3602        |
| <b>Promedio</b> | <b>2,8552</b> | <b>9,8269</b> | <b>11,2469</b> | <b>8,3917</b> |
| 3               | 2,8556        | 9,9435        | 11,3164        | 8,4608        |
|                 | 2,8537        | 9,9484        | 11,3484        | 8,4947        |
|                 | 2,8564        | 9,9272        | 11,3655        | 8,5091        |
| <b>Promedio</b> | <b>2,8552</b> | <b>9,9397</b> | <b>11,3434</b> | <b>8,4882</b> |

**Tabla 3.5.** Datos obtenidos para determinar la humedad en base húmeda y en base seca por el método de la estufa para la experiencia a 60 °C.

| Corrida         | Masa env. Vacío (g) | Masa sólido húmedo (g) | Masa sólido seco + env. vacío (g) | Masa sólido seco (g) |
|-----------------|---------------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| 1               | 2,8556              | 9,9335                 | 11,2261                           | 8,3705               |
|                 | 2,8537              | 9,9273                 | 11,3674                           | 8,5137               |
|                 | 2,8564              | 9,9581                 | 11,4375                           | 8,5811               |
| <b>Promedio</b> | <b>2,8552</b>       | <b>9,9396</b>          | <b>11,3437</b>                    | <b>8,4884</b>        |
| 2               | 2,8556              | 9,9689                 | 11,2137                           | 8,3581               |
|                 | 2,8537              | 9,9903                 | 11,3629                           | 8,5092               |
|                 | 2,8564              | 9,9841                 | 11,5008                           | 8,6444               |
| <b>Promedio</b> | <b>2,8552</b>       | <b>9,9811</b>          | <b>11,3591</b>                    | <b>8,5039</b>        |
| 3               | 2,8556              | 9,9235                 | 11,2854                           | 8,4298               |
|                 | 2,8537              | 9,9399                 | 11,3424                           | 8,4887               |
|                 | 2,8564              | 9,9372                 | 11,3875                           | 8,5311               |
| <b>Promedio</b> | <b>2,8552</b>       | <b>9,9335</b>          | <b>11,3384</b>                    | <b>8,4832</b>        |

**Tabla 3.6.** Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 30 °C

(Primera corrida)

| Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) | Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 0               | 14,5152        | 160             | 13,7067        |
| 10              | 14,3044        | 170             | 13,7403        |
| 20              | 14,2425        | 180             | 13,7457        |
| 30              | 14,2145        | 190             | 13,6739        |
| 40              | 14,1539        | 200             | 13,6635        |
| 50              | 14,1937        | 210             | 13,7144        |
| 60              | 14,1214        | 220             | 13,6885        |
| 70              | 14,0444        | 230             | 13,6623        |
| 80              | 13,9679        | 240             | 13,5741        |
| 90              | 13,9988        | 250             | 13,6475        |
| 100             | 13,9188        | 260             | 13,5947        |
| 110             | 13,8791        | 270             | 13,5978        |
| 120             | 13,8715        | 280             | 13,5870        |
| 130             | 13,9434        | 290             | 13,5833        |
| 140             | 13,9521        | 300             | 13,6603        |
| 150             | 13,8128        | -               | -              |

**Tabla 3.7.** Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 30 °C

(Segunda corrida)

| Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) | Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 0               | 14,5134        | 160             | 13,7489        |
| 10              | 14,2650        | 170             | 13,7602        |
| 20              | 14,2459        | 180             | 13,7892        |
| 30              | 14,2201        | 190             | 13,7243        |
| 40              | 14,1159        | 200             | 13,6480        |
| 50              | 14,1156        | 210             | 13,6932        |
| 60              | 14,1293        | 220             | 13,7179        |
| 70              | 14,0629        | 230             | 13,6744        |
| 80              | 14,0127        | 240             | 13,6552        |
| 90              | 14,0329        | 250             | 13,6156        |
| 100             | 14,0308        | 260             | 13,6191        |
| 110             | 13,9403        | 270             | 13,5848        |
| 120             | 13,9557        | 280             | 13,6170        |
| 130             | 13,9111        | 290             | 13,6162        |
| 140             | 13,8747        | 300             | 13,5278        |
| 150             | 13,8588        | -               | -              |

**Tabla 3.8.** Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 30 °C

(Tercera corrida)

| Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) | Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 0               | 14,5145        | 160             | 13,7492        |
| 10              | 14,2314        | 170             | 13,6962        |
| 20              | 14,2202        | 180             | 13,7034        |
| 30              | 14,1919        | 190             | 13,6792        |
| 40              | 14,1002        | 200             | 13,6523        |
| 50              | 14,1176        | 210             | 13,6572        |
| 60              | 14,0665        | 220             | 13,6835        |
| 70              | 14,0194        | 230             | 13,6441        |
| 80              | 13,9654        | 240             | 13,6120        |
| 90              | 13,9157        | 250             | 13,5881        |
| 100             | 13,9261        | 260             | 13,5833        |
| 110             | 13,9411        | 270             | 13,5545        |
| 120             | 13,9374        | 280             | 13,5953        |
| 130             | 13,9148        | 290             | 13,5887        |
| 140             | 13,9258        | 300             | 13,5573        |
| 150             | 13,8234        | -               | -              |

**Tabla 3.9.** Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 40 °C

(Primera corrida)

| Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) | Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 0               | 14,5187        | 160             | 13,6481        |
| 10              | 14,2346        | 170             | 13,6379        |
| 20              | 14,1336        | 180             | 13,6429        |
| 30              | 14,1110        | 190             | 13,6163        |
| 40              | 14,0749        | 200             | 13,6201        |
| 50              | 13,9727        | 210             | 13,6132        |
| 60              | 13,9163        | 220             | 13,6261        |
| 70              | 13,8678        | 230             | 13,6178        |
| 80              | 13,8532        | 240             | 13,6080        |
| 90              | 13,8297        | 250             | 13,6088        |
| 100             | 13,8320        | 260             | 13,6116        |
| 110             | 13,8013        | 270             | 13,5803        |
| 120             | 13,8089        | 280             | 13,6236        |
| 130             | 13,8163        | 290             | 13,6193        |
| 140             | 13,7492        | 300             | 13,5969        |
| 150             | 13,6657        | -               | -              |

**Tabla 3.10.** Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 40 °C

(Segunda corrida)

| Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) | Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 0               | 14,514         | 160             | 13,6850        |
| 10              | 14,2137        | 170             | 13,6713        |
| 20              | 14,1851        | 180             | 13,6456        |
| 30              | 14,0800        | 190             | 13,6389        |
| 40              | 14,0156        | 200             | 13,6386        |
| 50              | 14,0168        | 210             | 13,6250        |
| 60              | 13,9994        | 220             | 13,6245        |
| 70              | 13,9329        | 230             | 13,6253        |
| 80              | 13,8936        | 240             | 13,6249        |
| 90              | 13,8532        | 250             | 13,6232        |
| 100             | 13,8191        | 260             | 13,6218        |
| 110             | 13,8132        | 270             | 13,5957        |
| 120             | 13,7901        | 280             | 13,5884        |
| 130             | 13,7583        | 290             | 13,6262        |
| 140             | 13,7378        | 300             | 13,6006        |
| 150             | 13,7203        | -               | -              |

**Tabla 3.11.** Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 40 °C

(Tercera corrida)

| Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) | Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 0               | 14,5164        | 160             | 13,6881        |
| 10              | 14,2148        | 170             | 13,6306        |
| 20              | 14,1616        | 180             | 13,6155        |
| 30              | 14,0679        | 190             | 13,5870        |
| 40              | 14,0898        | 200             | 13,6049        |
| 50              | 13,9825        | 210             | 13,5763        |
| 60              | 13,9236        | 220             | 13,6206        |
| 70              | 13,9175        | 230             | 13,6231        |
| 80              | 13,9022        | 240             | 13,5941        |
| 90              | 13,7990        | 250             | 13,5703        |
| 100             | 13,7178        | 260             | 13,6055        |
| 110             | 13,7295        | 270             | 13,5910        |
| 120             | 13,7690        | 280             | 13,6185        |
| 130             | 13,7194        | 290             | 13,6212        |
| 140             | 13,7279        | 300             | 13,5819        |
| 150             | 13,7225        | -               | -              |

**Tabla 3.12.** Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 50 °C

(Primera corrida)

| Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) | Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 0               | 14,5123        | 130             | 13,6021        |
| 10              | 14,1817        | 140             | 13,5259        |
| 20              | 14,0992        | 150             | 13,6309        |
| 30              | 13,9980        | 160             | 13,4446        |
| 40              | 13,9447        | 170             | 13,4154        |
| 50              | 13,8482        | 180             | 13,4342        |
| 60              | 13,7975        | 190             | 13,3800        |
| 70              | 13,8523        | 200             | 13,3913        |
| 80              | 13,8453        | 210             | 13,3393        |
| 90              | 13,6967        | 220             | 13,3597        |
| 100             | 13,6693        | 230             | 13,3478        |
| 110             | 13,6338        | 240             | 13,3450        |
| 120             | 13,5631        | 250             | 13,3117        |

**Tabla 3.13.** Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 50 °C

(Segunda corrida)

| Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) | Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 0               | 14,5162        | 130             | 13,6027        |
| 10              | 14,2195        | 140             | 13,5306        |
| 20              | 14,1481        | 150             | 13,4377        |
| 30              | 14,0897        | 160             | 13,4235        |
| 40              | 13,9482        | 170             | 13,4160        |
| 50              | 13,9103        | 180             | 13,4156        |
| 60              | 13,8767        | 190             | 13,3879        |
| 70              | 13,8102        | 200             | 13,4091        |
| 80              | 13,8149        | 210             | 13,3403        |
| 90              | 13,7439        | 220             | 13,3531        |
| 100             | 13,7622        | 230             | 13,3603        |
| 110             | 13,5701        | 240             | 13,3138        |
| 120             | 13,6934        | 250             | 13,3229        |

**Tabla 3.14.** Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 50 °C

(Tercera corrida)

| Tiempo (min) | Masa Sh (g) | Tiempo (min) | Masa Sh (g) |
|--------------|-------------|--------------|-------------|
| 0            | 14,5133     | 130          | 13,6706     |
| 10           | 14,1890     | 140          | 13,5970     |
| 20           | 14,0214     | 150          | 13,5723     |
| 30           | 13,9484     | 160          | 13,4799     |
| 40           | 13,8736     | 170          | 13,4407     |
| 50           | 13,8941     | 180          | 13,4406     |
| 60           | 13,8972     | 190          | 13,4274     |
| 70           | 13,8290     | 200          | 13,4136     |
| 80           | 13,7895     | 210          | 13,3634     |
| 90           | 13,8292     | 220          | 13,4001     |
| 100          | 13,8353     | 230          | 13,4227     |
| 110          | 13,7797     | 240          | 13,3922     |
| 120          | 13,7592     | 250          | 13,3729     |

**Tabla 3.15.** Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 60 °C

(Primera corrida)

| Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) | Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 0               | 14,5133        | 130             | 13,3063        |
| 10              | 14,1890        | 140             | 13,3111        |
| 20              | 14,0214        | 150             | 13,4023        |
| 30              | 13,9484        | 160             | 13,3346        |
| 40              | 13,8736        | 170             | 13,3359        |
| 50              | 13,7941        | 180             | 13,2964        |
| 60              | 13,6972        | 190             | 13,2656        |
| 70              | 13,5290        | 200             | 13,2736        |
| 80              | 13,5895        | 210             | 13,2461        |
| 90              | 13,4292        | 220             | 13,2567        |
| 100             | 13,3729        | 230             | 13,2414        |
| 110             | 13,3563        | 240             | 13,2123        |
| 120             | 13,2928        | 250             | 13,2170        |

**Tabla 3.16.** Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 60 °C

(Segunda corrida)

| Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) | Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 0               | 14,5148        | 130             | 13,3047        |
| 10              | 14,2093        | 140             | 13,2729        |
| 20              | 14,1048        | 150             | 13,2471        |
| 30              | 13,8699        | 160             | 13,2501        |
| 40              | 13,7440        | 170             | 13,2581        |
| 50              | 13,6311        | 180             | 13,2419        |
| 60              | 13,5843        | 190             | 13,2322        |
| 70              | 13,5905        | 200             | 13,2415        |
| 80              | 13,5693        | 210             | 13,2198        |
| 90              | 13,4373        | 220             | 13,2465        |
| 100             | 13,3419        | 230             | 13,2014        |
| 110             | 13,3885        | 240             | 13,2255        |
| 120             | 13,3693        | 250             | 13,2230        |

**Tabla 3.17.** Variación de la masa del sólido húmedo a una temperatura de secado de 60 °C

(Tercera corrida)

| Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) | Tiempo<br>(min) | Masa Sh<br>(g) |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 0               | 14,5136        | 130             | 13,2522        |
| 10              | 14,2227        | 140             | 13,2687        |
| 20              | 14,0573        | 150             | 13,2277        |
| 30              | 13,8880        | 160             | 13,2612        |
| 40              | 13,7844        | 170             | 13,2739        |
| 50              | 13,6802        | 180             | 13,2432        |
| 60              | 13,6896        | 190             | 13,2451        |
| 70              | 13,7354        | 200             | 13,2148        |
| 80              | 13,6270        | 210             | 13,2056        |
| 90              | 13,5737        | 220             | 13,2297        |
| 100             | 13,4787        | 230             | 13,2596        |
| 110             | 13,3704        | 240             | 13,2231        |
| 120             | 13,2838        | 250             | 13,2018        |

**Tabla 3.18.** Humedad en base húmeda de la harina del sólido antes del proceso de secado utilizando la Balanza Ohaus a 70 °C.

| Primera corrida |                                  | Segunda corrida |                                  | Tercera corrida |                                  |
|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| Tiempo (min)    | Humedad (g agua/g sólido húmedo) | Tiempo (min)    | Humedad (g agua/g sólido húmedo) | Tiempo (min)    | Humedad (g agua/g sólido húmedo) |
| 0               | 0,0                              | 0               | 0,0                              | 0               | 0,0                              |
| 5               | 6,4                              | 5               | 6,6                              | 5               | 7,4                              |
| 10              | 8,8                              | 10              | 8,5                              | 10              | 9,4                              |
| 15              | 9,5                              | 15              | 9,2                              | 15              | 9,7                              |
| 20              | 9,5                              | 20              | 9,2                              | 20              | 10,1                             |
| 25              | 9,8                              | 25              | 9,5                              | 25              | 10,4                             |
| 30              | 9,8                              | 30              | 9,5                              | 30              | 10,1                             |
| 35              | 9,8                              | 35              | 9,8                              | 35              | 10,1                             |
| 40              | 9,8                              | 40              | 9,8                              | 40              | 10,1                             |
| 45              | 9,8                              | 45              | 9,8                              | 45              | 10,1                             |
| 50              | 9,8                              | 50              | 9,8                              | 50              | 10,1                             |
| 55              | 9,8                              | 55              | 9,8                              | 55              | 10,1                             |
| 60              | 9,8                              | 60              | 9,8                              | 60              | 10,1                             |

**Tabla 3.19.** Humedad en base húmeda de la harina del sólido secado a 30 °C, utilizando la Balanza Ohaus a 70 °C.

| Primera corrida |                                  | Segunda corrida |                                  | Tercera corrida |                                  |
|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| Tiempo (min)    | Humedad (g agua/g sólido húmedo) | Tiempo (min)    | Humedad (g agua/g sólido húmedo) | Tiempo (min)    | Humedad (g agua/g sólido húmedo) |
| 0               | 0,0                              | 0               | 0,0                              | 0               | 0,0                              |
| 5               | 7,0                              | 5               | 7,7                              | 5               | 7,1                              |
| 10              | 9,4                              | 10              | 10,1                             | 10              | 9,5                              |
| 15              | 10,1                             | 15              | 11,1                             | 15              | 10,2                             |
| 20              | 10,7                             | 20              | 11,4                             | 20              | 10,2                             |
| 25              | 11,1                             | 25              | 11,4                             | 25              | 10,5                             |
| 30              | 11,1                             | 30              | 11,4                             | 30              | 10,5                             |
| 35              | 11,1                             | 35              | 11,4                             | 35              | 10,8                             |
| 40              | 11,1                             | 40              | 11,4                             | 40              | 10,8                             |
| 45              | 11,1                             | 45              | 11,4                             | 45              | 10,8                             |
| 50              | 11,1                             | 50              | 11,4                             | 50              | 10,8                             |
| 55              | 11,1                             | 55              | 11,4                             | 55              | 10,8                             |
| 60              | 11,1                             | 60              | 11,4                             | 60              | 10,8                             |

**Tabla 3.20.** Humedad en base húmeda de la harina del sólido secado a 40 °C, utilizando la Balanza Ohaus a 70 °C.

| Primera corrida |                                  | Segunda corrida |                                  | Tercera corrida |                                  |
|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| Tiempo (min)    | Humedad (g agua/g sólido húmedo) | Tiempo (min)    | Humedad (g agua/g sólido húmedo) | Tiempo (min)    | Humedad (g agua/g sólido húmedo) |
| 0               | 0,0                              | 0               | 0,0                              | 0               | 0,0                              |
| 5               | 7,8                              | 5               | 7,4                              | 5               | 8,4                              |
| 10              | 9,5                              | 10              | 9,1                              | 10              | 10,4                             |
| 15              | 9,8                              | 15              | 9,8                              | 15              | 10,4                             |
| 20              | 10,1                             | 20              | 10,1                             | 20              | 10,4                             |
| 25              | 10,5                             | 25              | 10,1                             | 25              | 10,4                             |
| 30              | 10,8                             | 30              | 10,1                             | 30              | 10,8                             |
| 35              | 10,8                             | 35              | 10,5                             | 35              | 11,1                             |
| 40              | 10,8                             | 40              | 10,5                             | 40              | 11,1                             |
| 45              | 10,8                             | 45              | 10,5                             | 45              | 11,1                             |
| 50              | 10,8                             | 50              | 10,5                             | 50              | 11,1                             |
| 55              | 10,8                             | 55              | 10,5                             | 55              | 11,1                             |
| 60              | 10,8                             | 60              | 10,5                             | 60              | 11,1                             |

**Tabla 3.21.** Humedad en base húmeda de la harina del sólido secado a 50 °C, utilizando la Balanza Ohaus a 70 °C.

| Primera corrida |                                  | Segunda corrida |                                  | Tercera corrida |                                  |
|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| Tiempo (min)    | Humedad (g agua/g sólido húmedo) | Tiempo (min)    | Humedad (g agua/g sólido húmedo) | Tiempo (min)    | Humedad (g agua/g sólido húmedo) |
| 0               | 0,0                              | 0               | 0,0                              | 0               | 0,0                              |
| 5               | 7,8                              | 5               | 7,4                              | 5               | 7,8                              |
| 10              | 8,4                              | 10              | 10,1                             | 10              | 8,2                              |
| 15              | 9,5                              | 15              | 10,4                             | 15              | 9,8                              |
| 20              | 10,1                             | 20              | 10,8                             | 20              | 10,1                             |
| 25              | 10,1                             | 25              | 10,8                             | 25              | 10,4                             |
| 30              | 10,1                             | 30              | 10,8                             | 30              | 10,4                             |
| 35              | 10,1                             | 35              | 10,8                             | 35              | 10,4                             |
| 40              | 10,1                             | 40              | 10,8                             | 40              | 10,4                             |
| 45              | 10,1                             | 45              | 10,8                             | 45              | 10,4                             |
| 50              | 10,1                             | 50              | 10,8                             | 50              | 10,4                             |
| 55              | 10,1                             | 55              | 10,8                             | 55              | 10,4                             |
| 60              | 10,1                             | 60              | 10,8                             | 60              | 10,4                             |

**Tabla 3.22.** Humedad en base húmeda de la harina del sólido secado a 60 °C, utilizando la Balanza Ohaus a 70 °C.

| Primera corrida |                                  | Segunda corrida |                                  | Tercera corrida |                                  |
|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| Tiempo (min)    | Humedad (g agua/g sólido húmedo) | Tiempo (min)    | Humedad (g agua/g sólido húmedo) | Tiempo (min)    | Humedad (g agua/g sólido húmedo) |
| 0               | 0,0                              | 0               | 0,0                              | 0               | 0,0                              |
| 5               | 8,8                              | 5               | 7,0                              | 5               | 7,4                              |
| 10              | 9,7                              | 10              | 8,5                              | 10              | 9,1                              |
| 15              | 10,1                             | 15              | 9,7                              | 15              | 9,7                              |
| 20              | 10,1                             | 20              | 10,1                             | 20              | 10,5                             |
| 25              | 10,1                             | 25              | 10,1                             | 25              | 10,5                             |
| 30              | 10,1                             | 30              | 10,1                             | 30              | 10,5                             |
| 35              | 10,1                             | 35              | 10,1                             | 35              | 10,5                             |
| 40              | 10,1                             | 40              | 10,1                             | 40              | 10,5                             |
| 45              | 10,1                             | 45              | 10,1                             | 45              | 10,5                             |
| 50              | 10,1                             | 50              | 10,1                             | 50              | 10,5                             |
| 55              | 10,1                             | 55              | 10,1                             | 55              | 10,5                             |
| 60              | 10,1                             | 60              | 10,1                             | 60              | 10,5                             |

**Tabla 3.23.** Valores obtenidos para determinar el porcentaje de grasa cruda en la muestra de harina del sólido, antes del proceso de secado según Norma COVENIN 1785-81.

| Muestra | Masa Bo + perlas (g) | Masa Bi + grasa (g) | Masa de la muestra (g) |
|---------|----------------------|---------------------|------------------------|
| 1       | 80,7104              | 80,7517             | 2,1706                 |
| 2       | 79,8447              | 79,8878             | 2,1804                 |
| 3       | 77,9733              | 78,0145             | 2,1633                 |

**Tabla 3.24.** Valores obtenidos para determinar el porcentaje de grasa cruda en la muestra de harina del sólido, secado a 30 °C según Norma COVENIN 1785-81.

| Muestra | Masa Bo + perlas (g) | Masa Bi + grasa (g) | Masa de la muestra (g) |
|---------|----------------------|---------------------|------------------------|
| 1       | 79,8508              | 79,8898             | 2,1355                 |
| 2       | 78,1117              | 78,1503             | 2,1359                 |
| 3       | 74,9353              | 74,9554             | 2,1280                 |

**Tabla 3.25.** Valores obtenidos para determinar el porcentaje de grasa cruda en la muestra de harina del sólido, secado a 40 °C según Norma COVENIN 1785-81.

| Muestra | Masa Bo + perlas (g) | Masa Bi + grasa (g) | Masa de la muestra (g) |
|---------|----------------------|---------------------|------------------------|
| 1       | 80,7095              | 80,7537             | 2,1408                 |
| 2       | 76,6960              | 76,7358             | 2,1419                 |
| 3       | 78,5850              | 78,6278             | 2,1438                 |

**Tabla 3.26.** Valores obtenidos para determinar el porcentaje de grasa cruda en la muestra de harina del sólido, secado a 50 °C según Norma COVENIN 1785-81.

| Muestra | Masa Bo + perlas (g) | Masa Bi + grasa (g) | Masa de la muestra (g) |
|---------|----------------------|---------------------|------------------------|
| 1       | 76,4209              | 76,4605             | 2,0443                 |
| 2       | 78,1094              | 78,1483             | 2,0664                 |
| 3       | 89,7018              | 80,7393             | 2,0349                 |

**Tabla 3.27.** Valores obtenidos para determinar el porcentaje de grasa cruda en la muestra de harina del sólido, secado a 60 °C según Norma COVENIN 1785-81.

| Muestra | Masa Bo + perlas (g) | Masa Bi + grasa (g) | Masa de la muestra (g) |
|---------|----------------------|---------------------|------------------------|
| 1       | 77,0880              | 77,1336             | 2,0529                 |
| 2       | 76,6984              | 76,7397             | 2,0310                 |
| 3       | 77,9750              | 78,0173             | 2,0119                 |

**Tabla 3.28.** Datos utilizados para obtener el porcentaje de ceniza presente en la muestra de harina del sólido, antes del proceso de secado según Norma COVENIN 1783-81.

| Muestra | Masa crisol vacío (g) | Masa crisol + ceniza (g) | Masa de la muestra (g) |
|---------|-----------------------|--------------------------|------------------------|
| 1       | 15,4001               | 15,4523                  | 1,5091                 |
| 2       | 17,5539               | 17,6027                  | 1,5061                 |
| 3       | 17,4450               | 17,4960                  | 1,5054                 |

**Tabla 3.29.** Datos utilizados para obtener el porcentaje de ceniza presente en la muestra de harina del sólido, secado a 30 °C según Norma COVENIN 1783-81.

| Muestra | Masa crisol vacío (g) | Masa crisol + ceniza (g) | Masa de la muestra (g) |
|---------|-----------------------|--------------------------|------------------------|
| 1       | 18,9731               | 19,0215                  | 1,4960                 |
| 2       | 18,6957               | 18,7456                  | 1,5002                 |
| 3       | 17,6918               | 17,7412                  | 1,4924                 |

**Tabla 3.30.** Datos utilizados para obtener el porcentaje de ceniza presente en la muestra de harina del sólido, secado a 40 °C según Norma COVENIN 1783-81.

| Muestra | Masa crisol vacío (g) | Masa crisol + ceniza (g) | Masa de la muestra (g) |
|---------|-----------------------|--------------------------|------------------------|
| 1       | 16,1519               | 16,2007                  | 1,5099                 |
| 2       | 17,5603               | 17,6112                  | 1,5047                 |
| 3       | 15,3566               | 15,4049                  | 1,5054                 |

**Tabla 3.31.** Datos utilizados para obtener el porcentaje de ceniza presente en la muestra de harina del sólido, secado a 50 °C según Norma COVENIN 1783-81.

| Muestra | Masa crisol vacío (g) | Masa crisol + ceniza (g) | Masa de la muestra (g) |
|---------|-----------------------|--------------------------|------------------------|
| 1       | 15,4010               | 15,4507                  | 1,5050                 |
| 2       | 17,5530               | 17,6008                  | 1,5088                 |
| 3       | 17,4464               | 17,4950                  | 1,4971                 |

**Tabla 3.32.** Datos utilizados para obtener el porcentaje de ceniza presente en la muestra de harina del sólido, secado a 60 °C según Norma COVENIN 1783-81.

| Muestra | Masa crisol vacío (g) | Masa crisol + ceniza (g) | Masa de la muestra (g) |
|---------|-----------------------|--------------------------|------------------------|
| 1       | 16,1548               | 16,2030                  | 1,4930                 |
| 2       | 17,5605               | 17,6081                  | 1,5033                 |
| 3       | 15,3567               | 15,4062                  | 1,5041                 |

**Tabla 3.33.** Datos obtenidos para determinar el porcentaje de Nitrógeno presente en la harina del sólido antes del secado, según Norma COVENIN 1195-80, con HCl (0,1037 N).

| Corrida | Masa de la muestra (g) | Volumen de HCl gastado (mL) |
|---------|------------------------|-----------------------------|
| 1       | 2,0428                 | 48,00                       |
| 2       | 2,0113                 | 49,00                       |
| 3       | 2,0027                 | 48,50                       |

**Tabla 3.34.** Datos obtenidos para determinar el porcentaje de Nitrógeno presente en la harina del sólido secado a 30 °C, según Norma COVENIN 1195-80, con HCl (0,1037 N).

| Corrida | Masa de la muestra (g) | Volumen de HCl gastado (mL) |
|---------|------------------------|-----------------------------|
| 1       | 2,0141                 | 49,80                       |
| 2       | 2,0109                 | 49,90                       |
| 3       | 2,0098                 | 49,90                       |

**Tabla 3.35.** Datos obtenidos para determinar el porcentaje de Nitrógeno presente en la harina del sólido secado a 40 °C, según Norma COVENIN 1195-80, con HCl (0,1037 N).

| Corrida | Masa de la muestra (g) | Volumen de HCl gastado (ml) |
|---------|------------------------|-----------------------------|
| 1       | 2,0030                 | 48,80                       |
| 2       | 2,0002                 | 49,50                       |
| 3       | 2,0055                 | 49,20                       |

**Tabla 3.36.** Datos obtenidos para determinar el porcentaje de Nitrógeno presente en la harina del sólido secado a 50 °C, según Norma COVENIN 1195-80, con HCl (0,1003 N).

| Corrida | Masa de la muestra (g) | Volumen de HCl gastado (ml) |
|---------|------------------------|-----------------------------|
| 1       | 2,0075                 | 50,20                       |
| 2       | 2,0020                 | 50,50                       |
| 3       | 2,0065                 | 50,40                       |

**Tabla 3.37.** Datos obtenidos para determinar el porcentaje de Nitrógeno presente en la harina del sólido secado a 60 °C, según Norma COVENIN 1195-80, con HCl (0,1003 N).

| Corrida | Masa de la muestra (g) | Volumen de HCl gastado (ml) |
|---------|------------------------|-----------------------------|
| 1       | 2,0033                 | 50,00                       |
| 2       | 2,0030                 | 49,90                       |
| 3       | 2,0064                 | 50,00                       |

**Tabla 3.38.** Determinación del índice de absorción y de solubilidad en agua para la harina del sólido antes del proceso de secado, según la metodología de Anderson.

| Corri<br>da | Índice de Absorción de Agua<br>(IAA) |                              |                     | Índice de Solubilidad<br>en Agua (ISA) |        |
|-------------|--------------------------------------|------------------------------|---------------------|--|--------|
|             | Masa<br>Ts (g)                       | Masa<br>de la<br>muestra (g) | Masa<br>del gel (g) | Cs (g)                                 | Cv (g) |
| 1           | 11,87                                | 1,005                        | 13,89               | 39,42                                  | 39,68  |
|             | 15                                   | 3                            | 92                  | 01                                     | 22     |
| 2           | 11,65                                | 1,000                        | 13,76               | 40,69                                  | 40,96  |
|             | 24                                   | 1                            | 63                  | 11                                     | 08     |
| 3           | 11,96                                | 1,003                        | 14,04               | 35,36                                  | 35,63  |
|             | 06                                   | 0                            | 23                  | 48                                     | 31     |

**Tabla 3.39.** Determinación del índice de absorción y de solubilidad en agua para la harina del sólido secado a 30 °C, según la metodología de Anderson.

| Corri<br>da | Índice de Absorción de Agua<br>(IAA) |                              |                     | Índice de Solubilidad<br>en Agua (ISA) |        |
|-------------|--------------------------------------|------------------------------|---------------------|--|--------|
|             | Masa<br>Ts (g)                       | Masa<br>de la<br>muestra (g) | Masa<br>del gel (g) | Cs (g)                                 | Cv (g) |
| 1           | 13,15                                | 1,004                        | 15,24               | 43,27                                  | 43,42  |
|             | 09                                   | 4                            | 20                  | 04                                     | 90     |
| 2           | 11,88                                | 1,010                        | 13,82               | 41,76                                  | 41,48  |
|             | 49                                   | 2                            | 52                  | 50                                     | 58     |
| 3           | 11,83                                | 1,006                        | 13,89               | 41,30                                  | 41,15  |
|             | 12                                   | 3                            | 92                  | 49                                     | 62     |

**Tabla 3.40.** Determinación del índice de absorción y de solubilidad en agua para la harina del sólido secado a 40 °C, según la metodología de Anderson.

| Corri<br>da | Índice de Absorción de Agua<br>(IAA) |                              |                     | Índice de Solubilidad<br>en Agua (ISA) |             |
|-------------|--------------------------------------|------------------------------|---------------------|--|-------------|
|             | Masa<br>Ts (g)                       | Masa<br>de la<br>muestra (g) | Masa<br>del gel (g) | Cs (g)                                 | Cv (g)      |
| 1           | 13,15<br>09                          | 1,004<br>4                   | 15,21<br>31         | 43,27<br>04                            | 43,53<br>05 |
| 2           | 11,83<br>34                          | 1,010<br>2                   | 13,91<br>17         | 41,76<br>50                            | 42,01<br>35 |
| 3           | 11,88<br>85                          | 1,006<br>3                   | 13,87<br>77         | 41,30<br>49                            | 41,55<br>53 |

**Tabla 3.41.** Determinación del índice de absorción y de solubilidad en agua para la harina del sólido secado a 50 °C, según la metodología de Anderson.

| Corri<br>da | Índice de Absorción de Agua<br>(IAA) |                              |                     | Índice de Solubilidad<br>en Agua (ISA) |             |
|-------------|--------------------------------------|------------------------------|---------------------|--|-------------|
|             | Masa<br>Ts (g)                       | Masa<br>de la<br>muestra (g) | Masa<br>del gel (g) | Cs (g)                                 | Cv (g)      |
| 1           | 11,87<br>15                          | 1,015<br>2                   | 13,96<br>78         | 44,86<br>74                            | 45,11<br>58 |
| 2           | 11,65<br>26                          | 1,004<br>5                   | 13,71<br>81         | 42,26<br>06                            | 42,51<br>24 |
| 3           | 11,96<br>06                          | 1,006<br>1                   | 13,96<br>42         | 40,00<br>10                            | 40,25<br>48 |

**Tabla 3.42.** Determinación del índice de absorción y de solubilidad en agua para la harina del sólido secado a 60 °C, según la metodología de Anderson.

| Corrida | Índice de Absorción de Agua (IAA) |                        |                  | Índice de Solubilidad en Agua (ISA) |        |
|---------|-----------------------------------|------------------------|------------------|-------------------------------------|--------|
|         | Masa Ts (g)                       | Masa de la muestra (g) | Masa del gel (g) | Cs (g)                              | Cv (g) |
| 1       | 11,87                             | 1,018                  | 13,97            | 40,40                               | 40,66  |
|         | 15                                | 1                      | 40               | 38                                  | 58     |
| 2       | 11,65                             | 1,012                  | 13,74            | 44,08                               | 44,34  |
|         | 26                                | 1                      | 81               | 69                                  | 97     |
| 3       | 11,96                             | 1,011                  | 14,00            | 30,39                               | 30,66  |
|         | 06                                | 7                      | 62               | 71                                  | 27     |

### 3.7 MUESTRA DE CÁLCULO

#### 3.7.1 Determinación del contenido de humedad inicial en base húmeda del sólido a secar, para llevar el frijol a la condición de cosecha

Se procedió a realizar pruebas de ensayo y error, añadiendo un volumen de agua a una cantidad de frijol de 460 gramos y dejando reposar durante un tiempo de 10 minutos, con la finalidad de reproducir un valor de humedad a las condiciones de cosecha (maduración fisiológica), las cuales están comprendidas entre el 14% y el 15% en base húmeda.

Para la primera corrida mostrada en la tabla 3.1, se tomó un volumen de agua de 550 mL y se añadió al frijol, luego al cabo de 10 minutos se pasó a través de un colador, donde se recogió un volumen de agua de 452,6 mL. Transformando el volumen de agua a masa con ayuda de la densidad del agua de 1 g/mL y realizando un balance de masa, se obtuvo la cantidad de agua que absorbió el frijol.



$$ME = MS + MA$$

**(Ec. 3.1)**

donde:

ME= masa de agua a la entrada.

MS= masa de agua a la salida.

MA= Acumulación (agua absorbida por el frijol).

Despejando la acumulación de la ecuación 3.1, se obtiene:

$$MA = ME - MS \quad \text{(Ec. 3.2)}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 3.2, se tiene:

$$MA = 550g - 452,6g$$

$$MA = 97,4g$$

Luego se determinó la humedad en base seca a partir de la ecuación 2.8, utilizando los 460g de frijol como sólido seco.

$$X = \frac{97,4g}{460g}$$

$$X = 0,2117 \frac{kg_{agua}}{kg_{Ss}}$$

Finalmente se calculó la humedad en base húmeda, utilizando la ecuación 2.12.

$$W = \frac{0,2117}{1 + 0,2117}$$

$$W = 0,1743$$

y expresada en porcentaje, se tiene:

$$\%W = 17,43$$

Los cálculos se repiten, añadiendo al frijol diferentes volúmenes de agua mostrados en la tabla 3.1, hasta obtener un porcentaje de humedad entre 14% y 15%. Los resultados se muestran en la tabla 4.1.

### 3.7.2 Reproducción de la curva de velocidad de secado de frijol (*Vigna Unguiculata*) a diferentes temperaturas

- **Cálculo de las humedades iniciales en base seca y en base húmeda**

Para determinar la humedad del sólido, se sometieron tres muestras de granos húmedos de peso conocido, al secado a través del método de la estufa. Sustituyendo en la ecuación 2.11 los valores promedios tanto del sólido húmedo como del sólido seco tomados de la tabla 3.2, se procedió a calcular la humedad en base seca del sólido de la siguiente manera:

$$X_i = \frac{9,9461 \text{ gSs} - 8,4859 \text{ gSh}}{8,4859 \text{ gSs}}$$

$$X_i = 0,1721 \text{ g agua/g Ss} \Rightarrow X_i = 0,1721 \text{ kg agua / kgSs}$$

El mismo procedimiento se realizó por triplicado para cada muestra colocada en la estufa, para las diferentes experiencias, reportando los valores en la tabla A9 del anexo A.

La humedad en base húmeda se determinó, sustituyendo en la ecuación 2.12 el valor de la humedad en base seca, obtenido anteriormente.

$$W_i = \frac{0,1721}{1 + 0,1721} = 0,1468 \frac{\text{kg agua}}{\text{kgSh}}$$

Expresándolo como porcentaje de humedad en base húmeda, se tiene:

$$W_i = 14,68\%$$

Al obtener el valor de humedad en base húmeda y verificar que éste se encontraba entre 14% y 15% (rango establecido correspondiente a la cosecha), se procedió a calcular la masa del sólido totalmente seco a partir de la masa inicial del sólido húmedo tomado de la tabla 3.6, correspondiente a la primera corrida de la experiencia a 30°C. Despejando de la ecuación 2.11 se obtiene:

$$m_{S_s} = \frac{14,5152 \text{ gSh}}{0,1721 \frac{\text{g agua}}{\text{gSh}} + 1}$$

$$m_{S_s} = 12,3839 \text{ gSs} = L_s$$

Estos cálculos se repiten con todas las muestras para las diferentes experiencias y los resultados se reportan en la tabla A.10 del anexo A.

- **Cálculo de la humedad en base seca y la humedad libre**

Sustituyendo en la ecuación 2.11 la masa de sólido seco obtenido anteriormente y la masa de sólido húmedo de cada una de las muestras expuestas a proceso de secado a las diferentes temperaturas. Se procedió a calcular la humedad en base seca.

Para un tiempo igual a 0 minutos, se tiene:

$$X_1 = \frac{14,5152 \text{ gSh}}{12,3839 \text{ gSs}} - 1 \quad \Rightarrow \quad X_1 = 0,1721 \frac{\text{g agua}}{\text{gSs}}$$

Este procedimiento se repite, para cada valor de las tablas 3.6 a 3.17 y los resultados se encuentran reportados en la tabla A11 a A14 del anexo A.

Una vez realizados estos cálculos, se procedió a construir la gráfica de humedad en base seca en función del tiempo, las cuales se muestran en las figuras A15 a A18 para cada corrida. Mediante el software Statgraphics Plus 5.1, se corrigieron los valores de humedad calculados, los cuales se muestran en las tablas A19 a A22 y se construyeron las curvas las figuras A23 a A26, para luego poder determinar la humedad de equilibrio (aquella que retiene el sólido una vez que se alcanza el equilibrio (líquido – vapor). Ésta representa el último valor que se mantiene constante. Por ejemplo en la tabla A19, para un tiempo de 240 minutos y una temperatura de 30 °C se alcanzó la humedad de equilibrio en un valor de 0,1018 kg de agua/kg S<sub>s</sub>, para la primera corrida. Con estos resultados se realizaron los cálculos de la humedad libre del sólido, que es la diferencia entre la humedad en cada tiempo menos la humedad en el equilibrio, utilizando la ecuación 2.14:

Para un tiempo igual a 0, minutos utilizando los valores de la tabla A19 y sustituyendo en la ecuación 2.14, se tiene:

$$X_{libre} = (0,1713 - 0,1018) g \text{ agua} / g_{ss} \quad \Rightarrow \quad X_{libre} = 0,0695 g \text{ agua} / g_{ss}$$

Este procedimiento se repite para todos los valores de la tabla mencionada y para las otras experiencias a las diferentes temperaturas, los resultados se muestran en las tablas A27 a A30 del anexo A. Una vez realizados los ajustes a las curvas, se seleccionó la que reproducía mejores resultados, es decir, las que mostraron mayores valores de coeficiente de correlación  $R^2$ , resultando para las temperaturas de 30 °C, 40 °C y 50 °C, la correspondiente a la segunda corrida realizada y para la temperatura de 60 °C la tercera corrida. Las graficas ajustadas se muestran en la figura 4.1.

- **Cálculo de la Velocidad de Secado**

Para determinar la velocidad de secado, se calcularon los cambios de humedad con respecto al tiempo, a través de la ecuación 3.3:

$$\frac{dX}{dt} \approx \frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{X_{libre_2} - X_{libre_1}}{t_2 - t_1}$$

**(Ec. 3.3)**

Tomando como datos los valores reportados en la tabla A31, para un tiempo entre 0 y 10 minutos y una temperatura de 30°C para la segunda corrida, se obtiene:

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{(0,0701 - 0,0561) \text{ kg agua/kg Ss}}{(0 - 10) \text{ min}} \Rightarrow \frac{\Delta X}{\Delta t} = -0,0014 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg Ss} \cdot \text{min}}$$

Este procedimiento se repite para todos los valores de las tablas A27 a A30, y los resultados se encuentran reportados en las tablas A31 a A34 del anexo A.

Posteriormente el área de secado, se calculó utilizando la relación para cuando el aire fluye en forma paralela por una cara del sólido, mediante la ecuación 3.4.

$$A = l \times a$$

**(Ec. 3.4)**

donde:

A: área de secado.

l: largo del envase de aluminio (7,5 cm).

a: ancho del envase de aluminio (4,0 cm).

Utilizando la ecuación anterior y sustituyendo sus valores respectivos se tiene:

$$A = (4,0 \times 7,5) \text{ cm}^2 = 30 \text{ cm}^2 \cdot \left( \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right)^2 = 0,003 \text{ m}^2$$

Calculado este valor, se puede conocer la velocidad de secado utilizando la ecuación 2.15, tomando como referencia los datos de la tabla A10 del anexo A.

$$N = -\frac{0,0124009 \text{ kg Ss}}{0,003 \text{ m}^2} \cdot (-0,0014) \cdot 60 \text{ min} \frac{\text{kg agua}}{\text{kg Ss} \cdot \text{h}} = 3,48 \cdot 10^{-1} \frac{\text{kg agua}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

Este procedimiento se repite para el resto de los valores de las tablas A31 a A34, los resultados se encuentran reportados en las tablas A35 a A38.

A partir de estos datos se construyeron las gráficas de velocidad de secado, que se muestran en la figura A39 a A42 del anexo A. Las curvas realizadas con las corridas seleccionadas por presentar mejor ajuste (Statgraphics Plus 5.1) se muestran en la figura 4.2.

### **3.7.3 Cálculo del coeficiente de difusión efectivo del agua a diferentes temperaturas de secado por la ecuación de Fick**

Al verificar a través de las curvas de secado que el frijol se seca en el período de velocidad decreciente o caída, se procedió a aplicar la ecuación de la segunda Ley de Fick, calculando el coeficiente de difusión efectivo del agua mediante la resolución de la ecuación de difusión para una placa. Las experiencias se realizaron considerando el área de exposición al secado ofrecida por una monocapa de frijoles, y considerando que en ésta la pérdida de agua se produce solamente por una cara y la distribución inicial de la humedad es uniforme. El frijol aún siendo un medio heterogéneo, puede ser convenientemente analizado usando la Ley de Fick de materiales homogéneos, en el cual la heterogeneidad de los alimentos es compensado por el uso del coeficiente de difusividad efectiva.

Los datos experimentales se ajustaron a la ecuación de Fick, pero fue necesario establecer el número de términos que presenta la serie.

Para la primera corrida bajo las condiciones de temperatura de 30°C, se tomaron los datos de humedad de la tabla A19 del Anexo A y luego se evaluaron en la ecuación 2.17.

- Usando  $n=0$ , la ecuación se expresa como:

$$\frac{0,1570 - 0,1009}{0,1710 - 0,1009} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left[-\frac{\pi^2 \cdot Dl \cdot 600}{4,0,006^2}\right]$$

$$Dl = 3,11 \cdot 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Sustituyendo los valores se determinó el coeficiente de difusión efectivo. Estos resultados se reportaron en la tabla A43 del anexo A. Posteriormente se repitió el procedimiento para el segundo término de la ecuación.

- Usando  $n=1$ :

$$\frac{0,1570 - 0,1009}{0,1710 - 0,1009} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \left[ \exp\left[-\frac{\pi^2 \cdot Dl \cdot 600}{4,0,006^2}\right] + \frac{1}{9} \exp\left[-\frac{9 \cdot \pi^2 \cdot Dl \cdot 600}{4,0,006^2}\right] \right]$$

$$Dl = 1,77 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Los resultados obtenidos se reportaron en la tabla A43 a A46 del anexo A. Estos valores se promediaron excluyendo el último valor, debido a que se alejaba considerablemente del resto de los resultados. Éstos se muestran en la tabla 4.4. Luego se calculó el porcentaje de desviación existente, para los promedios obtenidos

de la resolución de la ecuación de Fick para el primer y segundo término, utilizando la siguiente ecuación:

$$\%Desv = \frac{(Dl_1 - Dl_0)}{Dl_1} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Sustituyendo los valores, se tiene:

$$\%Desv = \frac{(2,19 \cdot 10^{-9} - 2,04 \cdot 10^{-9})}{2,19 \cdot 10^{-9}} \cdot 100$$

$$\%Desv = 6,85$$

El mismo procedimiento se realizó para todas experiencias, encontrándose que el porcentaje de desviación fue mayor del 2%, demostrando que existían diferencias significativas entre los valores obtenidos para  $n=0$  y  $n=1$ , por lo cual se hizo necesario determinar el coeficiente de difusión a partir del tercer término de la ecuación.

- Usando  $n=2$ :

$$\frac{0,1570 - 0,1009}{0,1710 - 0,1009} = \frac{8}{\pi^2} \left[ \exp\left[-\frac{\pi^2 \cdot Dl \cdot 600}{4.0,006^2}\right] + \frac{1}{9} \exp\left[-\frac{9 \cdot \pi^2 \cdot Dl \cdot 600}{4.0,006^2}\right] + \frac{1}{25} \exp\left[-\frac{25 \cdot \pi^2 \cdot Dl \cdot 600}{4.0,006^2}\right] \right]$$

$$Dl = 2,20 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Los resultados se reflejan en la tabla A43 a A46 del anexo A, de igual manera se determinó el porcentaje de desviación para  $n=1$  y  $n=2$ , obteniéndose resultados menores del 2%. Demostrándose con esto, que no existen diferencias significativas entre estos dos términos de la ecuación, por lo tanto se tomaron dos términos de la sumatoria, para determinar el coeficiente de difusión, truncándose la ecuación en el segundo término, es decir, para  $n=1$ . El mismo procedimiento se realizó para cada una de las corridas experimentales mostrándose en la tabla 4.4, el coeficiente de difusión efectivo del agua y el porcentaje de desviación entre los términos de la ecuación de Fick.

#### **3.7.4 Efecto de la temperatura sobre el coeficiente de difusión efectivo del agua mediante la ecuación de Arrhenius y determinación de la energía de activación ( $E_a$ )**

Por medio de la ecuación de Arrhenius se determinó una expresión del coeficiente de difusión efectivo del agua en función de la temperatura. Esta ecuación es usada para interpretar el efecto de la temperatura sobre el coeficiente de difusión efectivo.

Se tomaron los datos de la tabla A43 a A46 correspondientes a la primera corrida a las diferentes temperaturas, aplicándoles logaritmo natural y graficándolos en función del inverso de la temperatura y luego ajustándose a una función lineal se obtiene la figura 4.4.

Con el punto de corte de la línea recta se determinó el factor Arrhenius ( $D_0$ ) y con la pendiente, la energía de activación ( $E_a$ ). Es importante señalar que el factor de Arrhenius y la energía de activación son característicos de cada gráfica y el término ( $E_a/R.T$ ) es adimensional. De la figura 4.4 se obtuvo para la primera corrida a las diferentes temperaturas, que la pendiente de la recta resultó -2209,9 y el logaritmo del factor de Arrhenius -12,617.

Sustituyendo en la ecuación 2.19 se obtiene:

$$\ln D_I = -12,617 - 2209,9 \left( \frac{1}{T} \right)$$

A partir de la pendiente de la recta, se tiene:

$$-\frac{E_a}{R} = -2209,9 \frac{\frac{\text{Joule}}{\text{mol}}}{\frac{\text{Joule}}{\text{mol.K}}}$$

$$-\frac{E_a}{R} = -2209,9K$$

Despejando la energía de activación del factor  $E_a/R$ , se tiene:

$$E_a = (2209,9K) \cdot \left( 8,314 \frac{\text{Joule}}{\text{mol.K}} \right)$$

$$E_a = 18373,11 \frac{\text{Joule}}{\text{mol}} \Rightarrow E_a = 18,37 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

Luego se calculó el factor de frecuencia tomando el valor del intercepto de la ecuación 2.19, obteniendo:

$$\ln D_o = -12,617$$

Aplicando exponencial en ambos términos en la expresión anterior:

$$D_o = \exp(-12,617)$$

$$D_o = 3,32 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

De igual manera se obtuvo el factor de frecuencia y la energía de activación para las distintas experiencias realizadas, los cuales son reportados en la tabla 4.6 y las gráficas  $\ln D_l$  vs.  $1/T$  ( $K^{-1}$ ) se representan en las figuras 4.4.

### 3.7.5. Caracterizaciones fisicoquímicas y funcionales del producto a las condiciones obtenidas.

- **Cálculo del contenido de proteínas de las muestras de frijol. Método de micro-Kjedalh.**

El contenido de proteína se determinó a través de la ecuación 2.3, empleando los valores de la tabla 3.34, expresándolo en función del porcentaje de nitrógeno presente en la muestra.

$$\%Nitrogeno = \frac{49.80ml \cdot 0,1037N \cdot 0,014}{2,0149g} \cdot 100$$

$$\%Nitrogeno = 3,5882$$

Una vez obtenido el porcentaje de nitrógeno presente en la muestra se sustituyó en la ecuación 2.4, se tiene que:

$$\%Proteinas = 3,5882\% \cdot 6,25$$

Los cálculos se realizaron por triplicado, y se muestran en la tabla A48 para las diferentes corridas. Luego se promedió y los resultados se reportan en la tabla 4.7.

- **Cálculo del contenido de cenizas de la harina de frijol**

Se calculó a través de la ecuación 2.1, tomando los datos de la tabla 3.28 correspondientes a la muestra de harina de frijol antes del proceso de secado, estas fueron tomadas por triplicado para obtener un promedio.

$$\%Cenizas = \frac{15,4523g - 15,4001g}{16,9092g - 15,4001g} \cdot 100$$

$$\%Cenizas = 3,4590$$

Este procedimiento se repite para el resto de las muestras, al igual que para los valores de las tablas 3.39 a 3.32. Los cálculos se realizaron por triplicado mostrándose en la tabla A49. Luego se promedió y los resultados se reportan en la tabla 4.7.

- **Cálculo del contenido de grasas en las muestras de frijol**

El contenido de grasa se determinó utilizando los valores reportados en la tabla 3.23, y empleando la ecuación 2.2:

$$\%Grasa = \frac{(80,7517 - 80,7104)g}{2,1706g} \cdot 100$$

$$\%Grasa = 1,90$$

El cálculo se repite para todos los datos de las tablas 3.23 a 3.27, los valores fueron reportados en la tabla A50 y luego se promediaron, mostrándose los resultados en la tabla 4.7.

- **Cálculo del Índice de Absorción de Agua (IAA)**

El índice de Absorción de agua se obtuvo a partir de la ecuación 2.5 y con los valores de la tabla 3.38 para la harina del sólido antes del proceso de secado.

$$IAA = \frac{13,8992g - 11,8715g}{12,9245g - 11,8715g}$$

$$IAA = 1,93g$$

Este procedimiento se repite para el resto de los valores de las tablas 3.38 a 3.42 y los valores se muestran en la tabla A51 del anexo A. Estos resultados se obtuvieron a través de un promedio y se muestran en la tabla 4.8.

- **Cálculo del Índice de Solubilidad del Agua (ISA)**

El índice de solubilidad de agua se calculó a partir de la ecuación 2.6, utilizando los datos de la tabla 3.38, se tiene.

$$\%ISA = (39,6822 - 39,4201).100$$

$$\%ISA = 26,21$$

Este procedimiento se repite para el resto de los valores de las tablas 3.38 a 3.42 y los valores se muestran en la tabla A51 de anexo A. Luego se promediaron, mostrándose los resultados en la tabla 4.8.

## **CAPITULO IV**

### **DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **4.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de las pruebas experimentales, realizadas a las muestras de frijol secadas a diferentes temperaturas, con la finalidad de reproducir las curvas de velocidad de secado. Luego se determinó el coeficiente de difusividad efectivo mediante la resolución de la ecuación de la segunda Ley de Fick, así como la Energía de Activación necesaria para iniciar la migración de la humedad, empleando la ecuación de Arrhenius. Posteriormente con las harinas de frijol se evaluó el efecto del proceso de secado sobre las propiedades fisicoquímicas y funcionales de la leguminosa.

##### **4.1.1 Escogencia de la humedad inicial a utilizarse en el proceso de secado de frijol**

En la tabla 4.1 se muestran los resultados del volumen de agua, que fue necesario añadir al frijol, para alcanzar humedades comprendidas entre 14% y 15% (madurez fisiológica)<sup>[25]</sup>. Al realizar pruebas de ensayo y error, se determinó que al remojar el frijol durante 10 minutos en volúmenes de agua de 550 mL, 500 mL y 450 mL; logró absorber 97,4 mL; 83,9 mL y 77,7 mL, permitiendo obtener humedades en base húmeda de 17,43%, 15,42% y 14,45% respectivamente. Con base a estos resultados, la humedad que se encuentra dentro del rango establecido para las

condiciones de madurez fisiológica o cosecha, es la que se obtuvo cuando se añadió 450 mL de agua a los 460 g de frijol.

**Tabla 4.1.** Volumen de agua absorbido por el frijol, humedad con base seca y porcentaje de humedad en base húmeda

| Ensayo | Volumen de agua agregada(mL) | Volumen de agua absorbido (mL) | X (g de Agua/ g sólido seco) | W (%) |
|--------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------|
| 1      | 550                          | 97,4                           | 0,2117                       | 17,43 |
| 2      | 500                          | 83,9                           | 0,1824                       | 15,42 |
| 3      | 450                          | 77,7                           | 0,1689                       | 14,45 |

#### 4.1.2 Reproducción de las curvas de velocidad de secado de frijol, a diferentes temperaturas

##### 4.1.2.1 Curva de humedad en función del tiempo

Transformados los valores de sólido húmedo a contenido de humedad en base seca, para las tres corridas realizadas a 30 °C, 40 °C, 50 °C y 60 °C, indicados en las tablas A11 a la A14 del anexo A, se procedió a construir las gráficas mostradas en las figuras A15 a A18. En vista del comportamiento de los datos, se les realizó un ajuste utilizando el software Statgraphics Plus 5.1, presentándose los resultados en las tablas A19 a A22, para posteriormente construir las gráficas, las cuales se presentan en las figuras A.23 a la A.26.

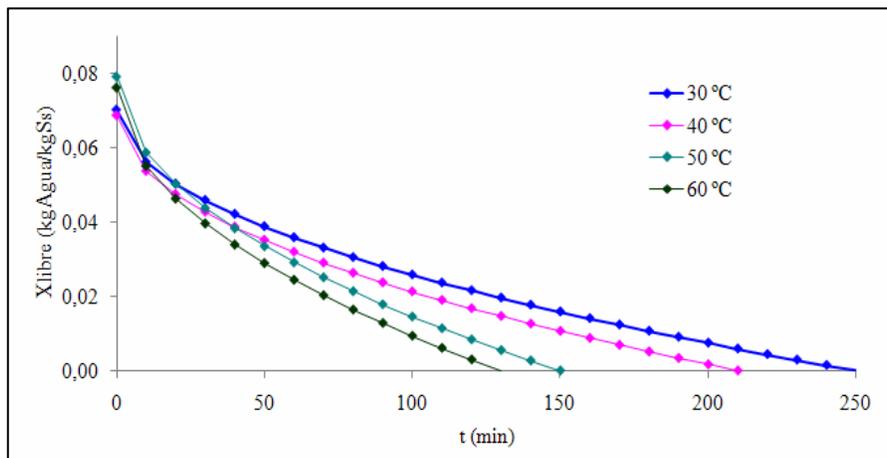
En la tabla 4.2 se reportan los coeficientes de correlación obtenidos en el ajuste de los datos para las diferentes temperaturas, en la misma se puede observar que la segunda corrida es la que muestra los mayores valores en los coeficientes de correlación, para las temperaturas de 30 °C, 40 °C y 50 °C; mientras que la tercera

corrida reporta el mayor coeficientes para la temperatura de 60 °C, por lo tanto estas son las gráficas que mejor describen la relación entre la humedad y el tiempo.

**Tabla 4.2** Coeficientes de correlación de las curvas de humedad en base seca ajustada en función del tiempo para las diferentes temperaturas.

| Temperatura (°C) | R1     | R2     | R3     |
|------------------|--------|--------|--------|
| 30               | 0,9712 | 0,9784 | 0,9675 |
| 40               | 0,9412 | 0,9480 | 0,9314 |
| 50               | 0,9613 | 0,9799 | 0,9755 |
| 60               | 0,9126 | 0,9140 | 0,9236 |

Los datos correspondientes a estas corridas, fueron transformados a humedad libre y sus gráficas se presentan en la figura 4.1, en la misma se puede observar, que al comparar las cuatro curvas obtenidas, durante los primeros 10 minutos de la experiencia no se evidencia una cambio apreciable a las diferentes temperaturas evaluadas, pero a medida que transcurre el tiempo, entre 25 y 30 minutos, al incrementarse la temperatura del aire, el tiempo de secado se reduce considerablemente.



**Figura 4.1.** Curvas de humedad libre en función del tiempo de secado del frijol (*Vigna Unguiculata*) a diferentes temperaturas.

Gráficamente en esta figura, se distingue que las curvas presentan un sólo período de secado correspondiente al de velocidad decreciente, que se relaciona con la pérdida significativa de la humedad del sólido durante la primera hora del proceso, siendo la mayor de 0,0358 kg agua/kgS<sub>s</sub> para una temperatura de 30 °C y la menor de 0,0244 kg agua/kgS<sub>s</sub> para 60 °C. Disminución que está incluso por debajo de la mitad del valor de humedad inicial del sólido, durante la primera hora de secado y se hace más relevante aún, cuando se observa el perfil de secado del sólido a 60°C, donde la caída de humedad es mucho más fuerte, porque a esta temperatura la evaporación del agua es más rápida.

Esto es indicativo de que al aumentar la temperatura, disminuye significativamente el tiempo de secado, necesitando la muestra sometida a la temperatura de 60 °C, de un tiempo de 130 minutos para liberar todo el contenido de agua libre, finalizando el proceso de secado y logrando así, su humedad de equilibrio, mientras que las muestras sometidas a temperaturas de 50 °C, 40 °C y 30 °C, la alcanzaron a los 150, 210 y 250 minutos respectivamente.

Por otra parte, relacionando estas cuatro curvas, se observa que la caída de humedad se hace más moderada a partir de la primera hora de secado, puesto que para un tiempo de 200 minutos la correspondiente a la temperatura de 30 °C, alcanzó una humedad de 0,010 kg agua/kgS<sub>s</sub>, debido a la menor rapidez con la que pierde agua, mientras que la sometida a 60 °C, requirió sólo de la mitad del tiempo (100 minutos).

El análisis de estas curvas de secado, permite deducir la presencia de un sólo período de velocidad decreciente para el secado de esta leguminosa, el cual es controlado por mecanismos internos de transferencia de masa, que corresponden al período de velocidad decreciente de secado<sup>[4]</sup>, el cual se sustenta con lo expresado en

la literatura<sup>[44]</sup>, cuando se señala, que los granos y semillas en general presentan un período de secado a velocidad constante demasiado corto o inexistente, porque en condiciones operacionales de secado, la resistencia a la transferencia de masa está esencialmente en su interior, haciendo que la tasa de evaporación superficial sea marcadamente superior a la tasa de sustitución de agua hasta la superficie del producto.

Además, resulta interesante destacar la importancia que tienen para estos alimentos, las elevadas pérdidas de humedad durante la primera hora de secado, tanto desde el punto de vista tecnológico como nutricional, en vista de que hoy en día, los procesos térmicos están diseñados utilizando temperaturas moderadas a cortos tiempos de exposición, evitando así la degradación de sus características nutricionales.

#### **4.1.2.2 Velocidad de secado**

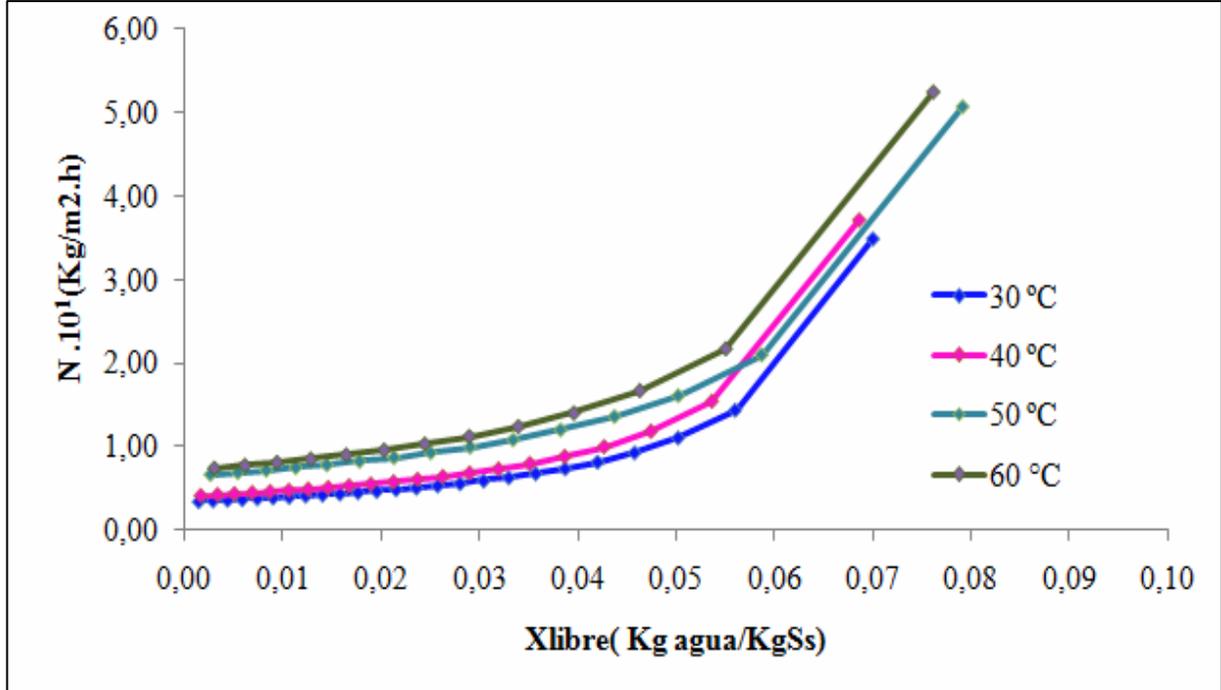
Los valores numéricos de la velocidad de secado determinados analíticamente se reportan en las tablas A35 a A38 del anexo A. En la figura 4.2 se observan los cambios que experimenta la velocidad de secado en función de la humedad del sólido, durante el proceso de secado de frijol a 30 °C, 40 °C, 50 °C y 60 °C, en la misma fue posible evidenciar la presencia de un sólo período de secado a velocidad decreciente, que se inicia con la humedad del sólido a 0,0701; 0,0686; 0,0792 y 0,0762 kg agua/kgS<sub>s</sub> respectivamente, finalizando el proceso cuando la humedad libre se anula. Los mismos revelan que manteniendo la velocidad de aire constante durante todas las experiencias, el valor más alto lo alcanzó la curva correspondiente a la temperatura de 60 °C, el cual fue de 0,524 kg/m<sup>2</sup>.h, mientras que para las temperaturas de 50 °C, 40 °C y 30 °C la velocidad fue de 0,507; 0,371 y 0,348 kg/m<sup>2</sup>.h, lo que evidencia que al aumentar la temperatura del aire, se incrementa la velocidad de secado beneficiando la evaporación de agua que se hace más intensa y rápida a las temperaturas más altas.

La presencia de un sólo período de secado a velocidad decreciente, en esta leguminosa, obedece a que no llega a existir una película de agua en la superficie del producto debido a la rapidez del secado y por lo tanto, el agua se desplaza a la superficie desde el interior de la muestra, evaporándose casi inmediatamente<sup>[45,46]</sup>.

Resultados similares se obtuvieron al estudiar otros cereales y leguminosas, donde también se observó la presencia de un sólo período de secado a velocidad decreciente<sup>[4,47,48]</sup>.

Por otra parte durante este período de velocidad decreciente, se observan dos tramos característicos, el primero que va desde el inicio del proceso, donde las curvas poseen pendientes pronunciadas y se alcanzan velocidades de secado de 0,524 kg agua/m<sup>2</sup>.h; 0,507 kg agua/m<sup>2</sup>.h; 0,371 kg agua/m<sup>2</sup>.h y 0,348 kg agua/m<sup>2</sup>.h para las temperaturas de 30 °C, 40 °C, 50 °C y 60 °C respectivamente, hasta la zona en que las velocidades de secado disminuyen rápidamente siendo esta lineal con la humedad del sólido. El segundo tramo del período se inicia en la zona donde la velocidad de secado es bastante lenta, pero el tiempo para eliminar el agua generalmente es largo<sup>[39]</sup>, en el mismo las pendientes de las curvas son menos pronunciadas, finalizando el proceso cuando las velocidades de secado se aproximan a cero.

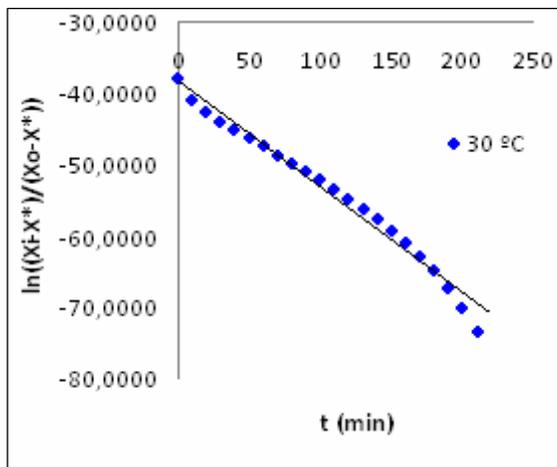
Además al distinguirse un sólo período de velocidad decreciente que se da prácticamente durante todo el proceso de secado para todas las curvas, se comprueba que la difusión es el fundamento predominante en la pérdida de humedad en el secado de esta leguminosa, esto se debe a que la difusión desde el interior, no puede suministrar todo el líquido que se evaporaría en la superficie, es decir, el agua líquida sobre la superficie fue insuficiente para mantener una película continua que recubra toda el área de secado; en consecuencia la velocidad de transferencia de agua de la superficie al medio de arrastre disminuye<sup>[17]</sup>.



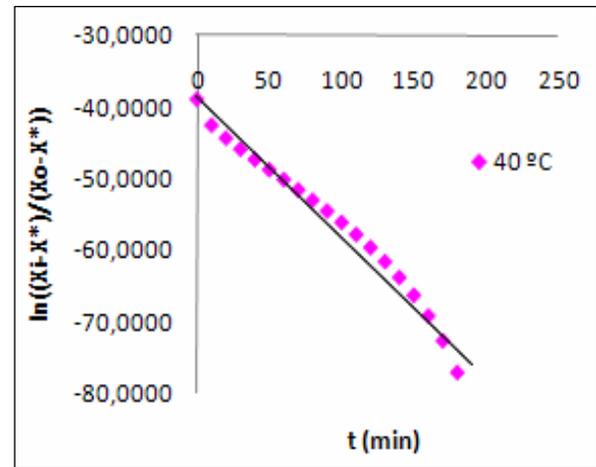
**Figura 4.2.** Curvas de velocidad de secado del frijol (*Vigna Unguiculata*) a diferentes temperaturas.

#### 4.1.3 Obtención la difusividad efectiva del agua aplicando la Segunda Ley de Fick, a diferentes temperaturas

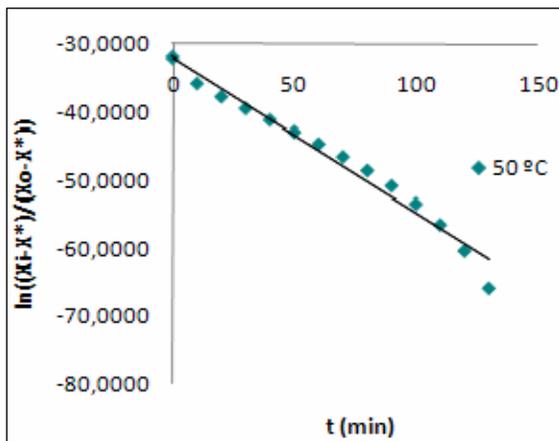
Para estudiar la cinética del secado de frijol (*Vigna Unguiculata*) se aplicó el modelo difusional, el cual ha sido utilizado en el estudio de transferencia de masa para diferentes productos agrícolas<sup>[50]</sup>. Se empleó la ecuación integrada de la segunda Ley de Fick, considerando el lecho formado por una monocapa de sólido húmedo, como láminas seminfinitas de espesor finito. El coeficiente difusional para cada temperatura, se calculó a partir de la pendiente de la línea recta obtenida al graficar el logaritmo natural de la razón de humedad en función del tiempo de secado expresado en segundos, los mismos se presentan en la figura 4.3.



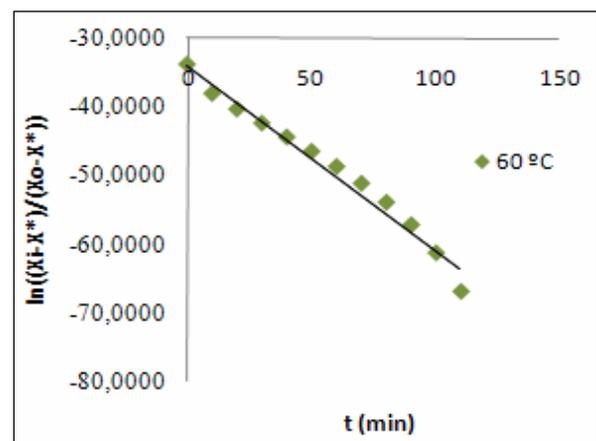
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 4.3.** Correlación logarítmica de la segunda Ley de Fick, para el cálculo de la difusividad efectiva a las temperaturas evaluadas.

En dicha figura se puede observar que las cuatro curvas trazadas muestran una tendencia lineal desde el inicio del proceso para las temperaturas de 30 °C, 40 °C,

50 °C y 60 °C y presenta altos valores de correlación, como se evidencia en la tabla 4.3, lo que comprueba la validez del ajuste lineal realizado.

**Tabla 4.3.** Coeficiente de correlación para la regresión lineal realizada para las temperaturas de 30, 40, 50 y 60 °C.

| Temperatura (°C) | R <sup>2</sup> |
|------------------|----------------|
| 30               | 0,9801         |
| 40               | 0,9593         |
| 50               | 0,9730         |
| 60               | 0,9779         |

Para establecer el número de términos presentes en la ecuación de la segunda Ley de Fick, se tomaron los valores de humedad de cada corrida para  $n = 0$ , obteniéndose los valores de los coeficientes de difusividad efectiva para las temperaturas de 30 °C, 40 °C, 50 °C y 60 °C; repitiéndose el procedimiento para  $n=1$ , donde los valores obtenidos presentaron un porcentaje de desviación mayor de 2%, por lo que se hizo necesario realizar una nueva evaluación de la ecuación, para  $n = 2$ , consiguiendo valores muy similares a los anteriores, pero con una desviación menor al 2% para todos los casos, Estos resultados indican, que no existen diferencias significativas con respecto a los valores obtenidos para  $n= 1$ , ajustándose éstos adecuadamente a la ecuación, por lo tanto ésta se truncó en el segundo término.

**Tabla 4.4.** Coeficientes de difusividad efectiva del agua en el frijol a diferentes temperaturas de secado.

| Temperatura<br>(°C) | De (m <sup>2</sup> /s) |                       | %<br>Desviación | De<br>(m <sup>2</sup> /s) | %<br>Desviación |
|---------------------|------------------------|-----------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|
|                     | n=0                    | n=1                   |                 | n=2                       |                 |
| 30                  | 2,04.10 <sup>-9</sup>  | 2,19.10 <sup>-9</sup> | 6,85            | 2,20.10 <sup>-9</sup>     | 0,46            |
| 40                  | 2,51.10 <sup>-9</sup>  | 2,60.10 <sup>-9</sup> | 3,46            | 2,63.10 <sup>-9</sup>     | 1,14            |
| 50                  | 3,53.10 <sup>-9</sup>  | 3,61.10 <sup>-9</sup> | 2,22            | 3,62.10 <sup>-9</sup>     | 0,28            |
| 60                  | 4,09.10 <sup>-9</sup>  | 4,17.10 <sup>-9</sup> | 1,92            | 4,17.10 <sup>-9</sup>     | 0,00            |

En la tabla 4.4 se observan los coeficientes de difusión efectiva calculados para esta leguminosa, en ausencia de resistencia externa al transporte de masa y cuando el transporte interno del material es debido exclusivamente a procesos difusionales.

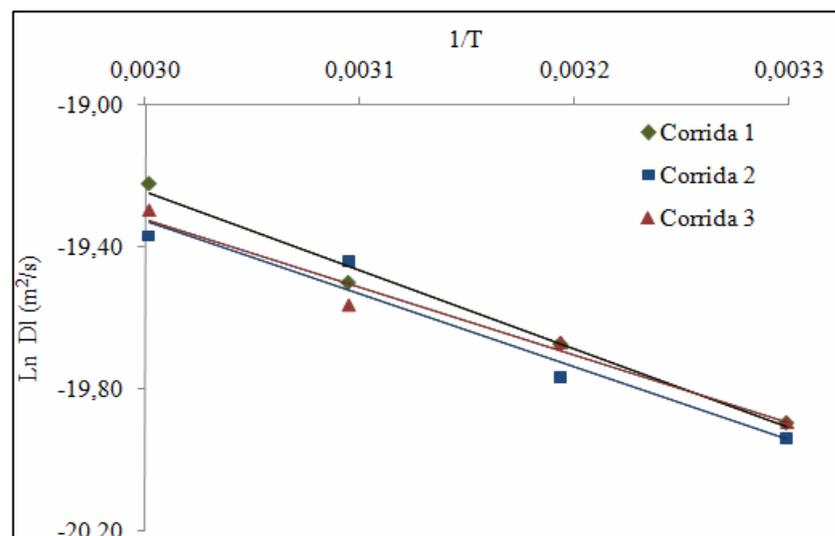
Los valores de los coeficientes, se obtuvieron a partir de la pendiente alcanzada para cada una de las rectas ajustadas a las temperaturas de 30 °C, 40 °C, 50 °C y 60 °C, se promediaron los datos para cada corrida experimental, excluyendo el último valor el cual se alejaba considerablemente del resto. Observándose, que el efecto de la temperatura sobre los valores de los coeficientes difusionales fue menor para la temperatura de 30 °C, con un valor de 2,19.10<sup>-9</sup>, mientras que para 60 °C el coeficiente aumentó a 4,17.10<sup>-9</sup>, lo que revela que esta muestra fue la que ofreció menor resistencia a la migración de la humedad, y deja en evidencia que la temperatura tiene una influencia significativa en la difusividad, apreciándose que la

muestra sometida a 60 °C, fue la que tuvo menor encogimiento durante el proceso de secado, ofreciendo mayor área de exposición con relación al aire caliente, y por ende una mayor difusividad de la humedad<sup>[9,17,51]</sup>.

Ante la escasa información de secado de leguminosas por aire caliente, se tomaron como referencias estudios realizados para la caraota (*Phaseolus Vulgaris*) y para otros granos y vegetales. Los valores encontrados del coeficiente de difusión efectivo, se encuentran dentro de los rangos establecidos en otras investigaciones: berenjena (*Solanum Melongena L*)  $2,93 \cdot 10^{-10}$  y  $7,339 \cdot 10^{-10}$  y zanahoria (*Daucus Carota*) con valores desde  $4,69 \cdot 10^{-9}$  hasta  $9,25 \cdot 10^{-9}$ <sup>[15,48,51]</sup>.

#### 4.1.4 Cálculo de la energía de activación requerida para la difusión de la humedad a través del sólido, utilizando la Ecuación de Arrhenius

Como puede observarse en la figura 4.4, la influencia de las diferentes temperaturas de secado sobre el coeficiente de difusividad efectiva en cada una de las experiencias, se ajustan perfectamente a una línea representativa de una relación tipo Arrhenius, por lo que de las pendientes de las rectas obtenidas analíticamente por regresión lineal, se han deducido los valores de energía de activación, para cada corrida realizada.



**Figura 4.4.** Logaritmo natural de la difusividad en función del inverso de la temperatura para las diferentes corridas.

Al graficar el logaritmo natural de los valores del coeficiente de difusión efectivo (DI) en función del inverso de las temperaturas (ecuación de Arrhenius) de 30 °C, 40 °C, 50 °C y 60 °C, de acuerdo a las diferentes corridas ensayadas, se observa un alto coeficiente de correlación que valida el ajuste lineal, los mismo se muestran en la tabla 4.5.

**Tabla 4.5.** Coeficiente de correlación para la regresión lineal aplicada a la ecuación de Arrhenius, para las diferentes corridas.

| Corridas | R <sup>2</sup> |
|----------|----------------|
| 1        | 0,9880         |
| 2        | 0,9536         |
| 3        | 0,9728         |

En la tabla 4.6 se muestra que la Energía de Activación requerida para iniciar la difusión de la humedad través del sólido, alcanzó valores de 18,37 kJ/mol, 17,14 kJ/mol y 15,96 kJ/mol para las distintas corridas. Estas magnitudes están dentro del rango de valores encontrados en la literatura para materiales alimenticios (12,7 a 110 kJ/mol): 40,08 kJ/mol para la caraota (*Phaseolus Vulgaris*) para un rango de temperaturas entre 35°C y 55°C<sup>[52]</sup> y 22,404 kJ/mol para un rango de temperaturas entre 50 °C y 90 °C<sup>[53]</sup>.

También se reportan en esta tabla, los valores del factor de Arrhenius para este producto, los cuales resultaron ser de  $3,31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $1,97 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  y  $1,28 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  para las mismas experiencias, lo que demuestra que la difusividad efectiva es

directamente proporcional al factor de frecuencia, además, por el signo negativo asociado al exponente  $E_a/RT$ , la difusividad efectiva disminuye conforme se incrementa la temperatura, lo que es indicativo de la influencia significativa de la temperatura utilizada en el proceso de secado del frijol.

**Tabla 4.6.** Valores de la energía de activación y factor de Arrhenius para el frijol a las diferentes temperaturas de estudio.

| Exper<br>iencia | $E_a$ (Kj/Kg<br>mol) | $D_0$<br>( $m^2/s$ ) |
|-----------------|----------------------|----------------------|
| 1               | 18,37                | 3,31.<br>$10^{-6}$   |
| 2               | 17,14                | 1,97.<br>$10^{-6}$   |
| 3               | 15,96                | 1,28.<br>$10^{-6}$   |

#### 4.1.5 Caracterizaciones fisicoquímicas y funcionales del producto a las condiciones obtenidas

Sometidos los granos de frijol a la operación unitaria de molienda y su posterior tamizado, se obtuvieron las harinas a las que se le realizaron la caracterización fisicoquímica y funcionales, las cuales incluyeron el análisis del contenido de humedad, grasa, cenizas y proteínas presentes en la leguminosa, así como del índice de solubilidad (ISA) y de absorción de agua (IAA) respectivamente.

Los resultados de éstas, se muestran en las tablas A48 a A52 del anexo A, en donde se puede apreciar los valores promedios para todas las corridas de la muestra cruda de frijol (antes del secado).

En las tablas 4.7 y 4.8 se muestran los promedios obtenidos para las harinas derivadas de este producto, antes de secar y después de ser sometidas a proceso de secado a temperaturas de 30 °C, 40 °C, 50 °C y 60 °C, respectivamente.

**Tabla 4.7.** Valores promedios de las propiedades fisicoquímicas de la harina de frijol cruda y secada a las diferentes temperaturas.

| Muestra        | Propiedades Fisicoquímicas |               |           |            |
|----------------|----------------------------|---------------|-----------|------------|
|                | %W                         | % Grasa Cruda | % Cenizas | % Proteína |
| M <sub>1</sub> | 9,90                       | 1,93          | 3,36      | 21,80      |
| M <sub>2</sub> | 11,1                       | 1,84          | 3,29      | 22,49      |
| M <sub>3</sub> | 10,8                       | 1,97          | 3,28      | 22,27      |
| M <sub>4</sub> | 10,4                       | 1,89          | 3,24      | 22,04      |
| M <sub>5</sub> | 10,2                       | 2,02          | 3,23      | 21,88      |

M<sub>1</sub>: muestra original (antes de secar), M<sub>2</sub>: muestra secada a una temperatura de 30°C, M<sub>3</sub>: muestra secada a una temperatura de 40°C, M<sub>4</sub>: muestra secada a una temperatura de 50°C, M<sub>5</sub>: muestra secada a una temperatura de 60°C

#### 4.1.5.1 Propiedades Fisicoquímicas

- **Contenido de humedad**

El contenido de humedad promedio obtenido de las muestras de harina de frijol sometidas a temperaturas de secado del 30, 40, 50 y 60 °C, fue del 11,10%; 10,80%; 11,40% y 10,2% respectivamente, observándose que la muestra expuesta a mayor temperatura de secado es la que presenta menor contenido de humedad, muy cercano al reportado en la muestra cruda (9,90%), los mismos son similares a los presentados en la literatura para este tipo de leguminosa<sup>[52,53]</sup> y se corresponden con los valores establecidos en otros estudios realizados, *Vigna Unguiculata* (variedad Orituco)

11,68%, *Phaseolus Vulgaris* 9,72%<sup>[54,55]</sup>. Este parámetro es muy importante, porque está relacionado con la vida del grano, pues cuando estos poseen un contenido de humedad del 10 al 13%<sup>[13]</sup>, son estables ante la contaminación microbiana; pero si se encuentra por encima de este rango, el producto es atacado fácilmente por enfermedades fúngicas y bacterianas que puedan ocasionar su rápido deterioro. Se demostró que no existieron cambios significativos al exponer esta leguminosa a las temperaturas evaluadas, por lo tanto no se evidenciaron cambios apreciables en relación a la humedad.

- **Contenido de grasa**

En relación al contenido de grasa se encontró una variación entre las muestras que va desde el 1,84% al 2,02%, siendo el menor valor el reportado para la muestra expuesta a 30 °C, mientras que el mayor se registró para la temperatura de 60 °C. Estos resultados coinciden con los valores señalados en la literatura para esta leguminosa<sup>[53]</sup>, que se caracteriza por poseer bajas cantidades de compuestos lipídicos y son valores cercanos a los obtenidos para estudios realizados para *Phaseolus Vulgaris* con un contenido de grasa de 2,24%<sup>[55]</sup>. Esto es indicativo de que el contenido de grasa de la harina de frijol no presentó alteraciones considerables en el rango térmico estudiado.

- **Contenido de proteína**

La cantidad de proteínas que reportan las muestras de harinas sometidas a diferentes temperaturas de secado, reflejan un leve decrecimiento que va desde el 22,49% hasta el 21,88%, alcanzando el menor valor la muestra expuesta a la temperatura de 60 °C, siendo éste muy cercano al que presentaba la muestra cruda antes de ser expuesta a proceso de secado (21,80%). Esto evidencia que el contenido de proteína fue disminuyendo directamente con el incremento de la temperatura, no obstante la variación entre ellas fue muy pequeña alcanzando sólo el 0,61%, esto se debe posiblemente a que las proteínas del frijol fueron resistentes a las fuerzas de

cizallamiento y al efecto térmico a las que fueron sometidas. Todos los valores obtenidos se encuentran dentro de los niveles conocidos para este tipo de leguminosa (21% y 23%)<sup>[53,54]</sup>, y coinciden con los resultados obtenidos de otras investigaciones por ejemplo para *Phaseolus Vugaris* 27,25% y 23,3% y para el frijol *Vigna Unguiculata* 21,1%.<sup>[29,55,56]</sup>

- **Contenido de cenizas**

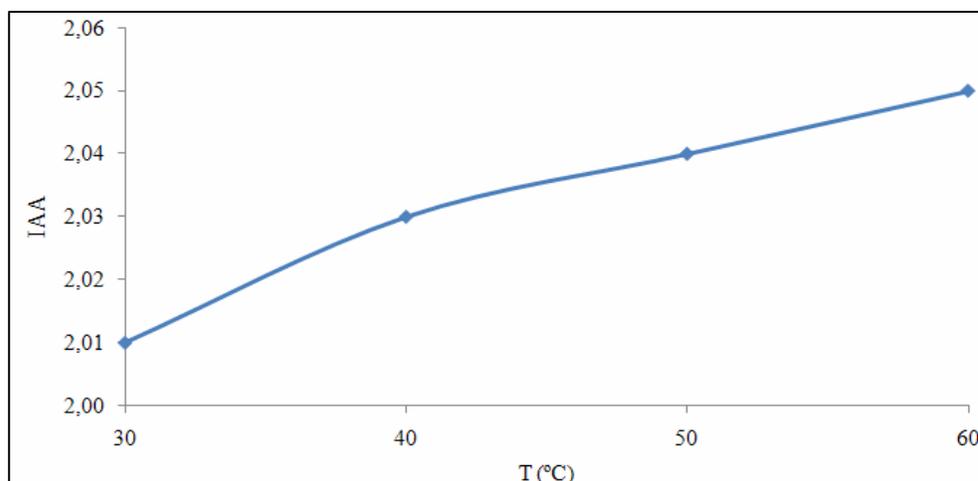
En lo que respecta al contenido de cenizas se alcanzaron valores que 3,29% , 3,28%, 3,24%, y 3,23% para las temperaturas de 30 °C, 40 °C, 50 °C y 60 °C respectivamente, siendo las muestras sometidas a temperaturas más altas las que poseen el menor contenido de materia orgánica, sin embargo no se evidenció una diferencia significativa entre ellas. Estos valores están dentro del rango conocido para estas leguminosas el cual oscila entre 3,0% y 4,0%<sup>[20,21]</sup> y coinciden con los resultados de trabajos realizados con quinchoncho *Cajanus Cajan* obteniéndose valores de contenido de cenizas de 3,82% y para el frijol bayo *Vigna Unguiculata* de 3,20%.<sup>[56,57]</sup>

#### 4.1.5.2. Propiedades funcionales

- **Índice de absorción de agua (IAA)**

El índice de absorción de agua (IAA) es una prueba estandarizada que se puede utilizar como un indicativo del grado de modificación de los almidones por tratamiento termomecánico<sup>[36]</sup>. En este estudio los valores reportados para este indicador, aumentan levemente desde 2,00 g gel/g muestra a 2,05 g gel/g muestra, lo que evidencia que el incremento de la temperatura durante el proceso de secado y las fuerzas de cizalla a las que se sometieron las muestras durante la molienda no produjeron en la leguminosa diferencias significativas con respecto a los valores reportados inicialmente (2,07g gel/g muestra), lo que es indicativo de que el contenido de almidón presente en el grano, no sufrió modificaciones considerables

durante el proceso, lo que se explica probablemente porque al someter a temperaturas mayores las harinas, éstas se solubilizan formando macroestructuras que impiden la absorción de agua<sup>[36]</sup>. En la figura 4.5 se muestran los valores del índice de absorción de agua en función del tiempo, en la cual se evidencia la dependencia directa de la temperatura con esta propiedad funcional. Resultados similares se obtuvieron en estudios realizados por otros autores para el quinchoncho (*Cajanus Cajan*) y para frijol bayo (*Vigna Unguiculata*) de 2,0 g gel/ g muestra y 1,8 g gel/g muestra.<sup>[29]</sup>



**Figura 4.5.** Índice de absorción de agua en función de las temperaturas evaluadas

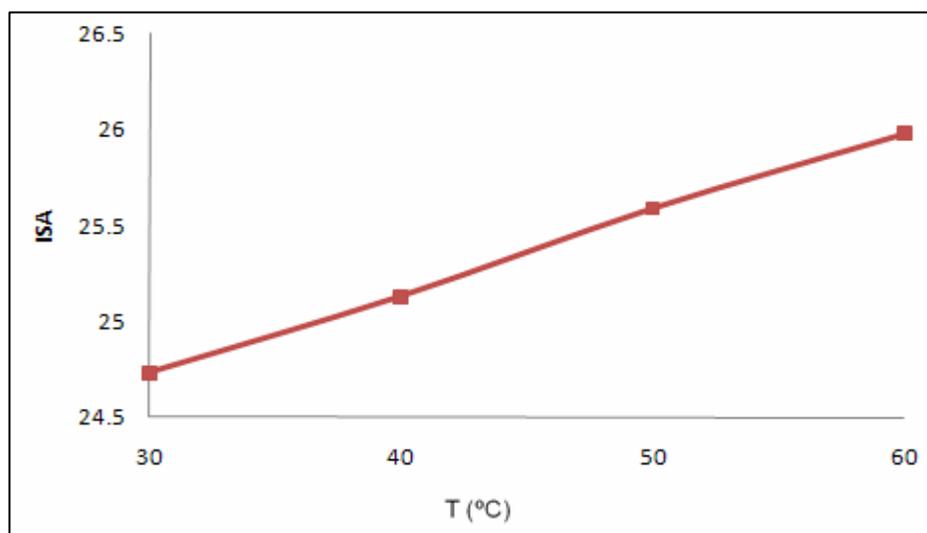
- **Índice de solubilidad en agua (ISA)**

El índice de solubilidad expresado como la cantidad de materia seca recuperada después de evaporar el supernadante de la determinación de la absorción de agua<sup>[34]</sup>, refleja para esta investigación un mínimo incremento del índice de solubilidad en las muestras evaluadas de 24,73%, 25,13%; 25,59% y 25,98% para las temperaturas de 30 °C, 40 °C, 50 °C y 60 °C, respectivamente, lo que evidencia el efecto de la temperatura sobre este indicador, esto muestra que una mayor temperatura de secado constituye un tratamiento más severo, incrementando la solubilidad de los

componentes químicos de la leguminosa, principalmente del almidón, tal como se evidencia en la figura 4.6. Sin embargo para las temperaturas estudiadas no se mostraron cambios apreciables en la solubilidad en agua de la harina de frijol.

**Tabla 4.8.** Valores promedios de las propiedades funcionales de la harina de frijol cruda y secada a las diferentes temperaturas

| Muestra | Propiedades funcionales                              |   |
|---------|--|---|
|         | Índice de absorción de agua<br>(IAA g gel/g muestra) | Índice de solubilidad<br>de<br>agua (ISA %) |
| Cruda   | 2,07   | 26,67                                       |
| 30 °C   | 2,01   | 24,73                                       |
| 40 °C   | 2,03   | 25,13                                       |
| 50 °C   | 2,04   | 25,59                                       |
| 60 °C   | 2,05   | 25,98                                       |



**Figura 4.6.** Índice de solubilidad en agua en función de las temperaturas evaluadas

## 4.2 CONCLUSIONES

1. El frijol (*Vigna Unguiculata*) alcanzó una humedad de 14,45%, correspondiente a la condición de madurez fisiológica o cosecha, al absorber 77,7 mL de agua.
2. La curva de velocidad de secado del frijol, a las temperaturas entre 30 °C y 60 °C, muestran sólo el periodo de velocidad decreciente o de descenso.
3. Al aumentar la temperatura del aire de secado, disminuye significativamente el tiempo de secado y aumenta la velocidad de secado debido a que se incrementa la cantidad de agua evaporada.
4. La humedad de equilibrio se alcanzó en un menor tiempo, a la temperatura de secado de 60 °C.
5. El secado del frijol se realiza básicamente por difusión, desde el interior del sólido hacia la superficie.
6. El secado del frijol se puede modelar a partir de la segunda Ley de Fick, para un lecho formado por una monocapa de sólidos.
7. La difusividad efectiva del agua a través del frijol, aumenta con la temperatura.
8. La energía de activación necesaria para iniciar la difusión de la humedad a través del sólido, alcanzó valores dentro del rango para materiales alimenticios.
9. Los coeficientes de difusividad efectiva estudiados se encuentran dentro del rango de valores estudiados para otras leguminosas, verificándose un comportamiento tipo Arrhenius con respecto a la temperatura.
10. Las harinas de frijol expuestas a tratamiento térmico no mostraron cambios significativos en sus propiedades fisicoquímicas y funcionales en relación directa con la temperatura de secado.

### **4.3 RECOMENDACIONES**

1. Realizar el estudio aplicando la segunda Ley de Fick, considerando otras geometrías.
2. Ampliar el rango de temperatura para la aplicación de la ecuación de Arrhenius.
3. Realizar un nuevo estudio cambiando la velocidad del aire y la carga del sólido.
4. Utilizar otros modelos matemáticos para el ajuste de las curvas y poder hacer comparaciones con el utilizado en esta experiencia.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Mora, M. **“Influencia de diferentes temperaturas y contenidos de humedad sobre el tiempo de cocción del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) almacenado durante 18 meses”**. Revista de Agronomía Costarricense, Vol. 3. (1982)
2. Perry R., **“Manual del Ingeniero Químico”**, Tomo II. Séptima Edición, Editorial McGraw–Hill, México (2001)
3. Moreno B. **“Microorganismo de los Alimentos”**, Editorial Acribia, España (1985)
4. Geankoplis C., **“Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias”**, Tercera edición, Editorial Continental, S.A., México (1998)
5. Mujumdar, A. **“Handbook of industrial drying”**, Marcel DeKKer, New York (1995)
6. Comisión Suiza para el Desarrollo (COSUDE). **“Secamiento de granos su importancia y las prácticas comunes. Programa regional poscosecha”**. Agencia Suiza para el desarrollo y la cooperación. Nicaragua. (1998)
7. De Lucia, M. y Assenato, D. **“La ingeniera en el desarrollo, manejo y tratamiento de granos poscosecha”**. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO, Italia. (1993)
8. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. **“Cereales, legumbres, leguminosas, productos derivados y proteínas vegetales”**. Segunda Edición, Italia. (1996)

9. Vizcarra, M. **“Efecto del contenido de humedad y la temperatura en la determinación de la difusividad del agua durante el secado de trigo en lecho fluidificado”**. Ciencias ediciones IMIQ, México (1998)
10. Vega, A. **Simulación matemática del proceso de secado de la gracilaria chilena (*Gracilaria Chilensis*)**. Revista chilena de Ingeniería, Vol. 15, N° 1, (2007)
11. Carmona, A. y Jaffé, W. **Importancia de las leguminosas en la nutrición humana**. Taller Formulación de un programa integral de investigación en leguminosas, IDEA, Sartanejas. Venezuela. (1998)
12. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. **“Manual de manejo postcosecha de granos a nivel rural”**. Chile (1993)
13. Márquez, J. y Marcal, D. **“Principios de secado de granos psicometria higroscopia”**. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, Chile. (1991)
14. Restrepo, A. y Jaramillo, J. **“Disponibilidad térmica solar y su aplicación en el secado de granos”**. Revista Scientia et Technica Año XI, No 27, Abril (2005)
15. Avanza, J. y Chaves, M. **“Cinética de secado de berenjena (*Solanum Melongena, L.*) en bandejas”**. Universidad Nacional del Nordeste. Argentina. (2008)
16. Montes, E., y colaboradores. **“Modelado de la cinética de secado de ñame (*Dioscorea Rotundata*) en capa delgada”**. Revista Ingeniería e Investigación. Vol.28. No.2, Colombia. (2008)
17. Vega, A. y Fito, P. **“Modelado de la cinética de secado del Pimiento Rojo (*Capsicum Annuum L. cv Lamuyo*)”**. Revista Información Tecnológica, Vol. 16, No.6, Chile. (2005)

18. Vázquez, A. y Pereira, A. “**Estudio del coeficiente de difusión Efectivo del agua en el secado por convección de láminas de Coroba (*Attalea Maripa*)**”. Tesis de Grado. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui, Venezuela. (2006)
19. Piccirillo, G. “**Estudio de insectos polinizadores en el frijol (k) y su efecto sobre el rendimiento**”. Revista Facultad de Agronomía. Universidad del Zulia. Vol. 14. N°. 3, Venezuela. (1997)
20. Flores, C y colaboradores. “**Evaluación de altura de plantas y componentes del rendimiento de seis genotipos del género *Vigna* en dos localidades de Venezuela**”. Revista de la Facultad Agronomía. Vol.22, No.4, Caracas, Venezuela. Octubre (2005)
21. Ortega, S., y colaboradores. “**Orituco: Nueva variedad de frijol blanco (*Vigna Unguiculata (L.) Walp*)**”. Revista Agronomía Tropical. Vol. 43. N°3 .Venezuela. (1993)
22. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA). “**Prácticas agronómicas del frijol para semilla en la zona sur del estado Anzoátegui**”. (2009)
23. Programa regional POSTCOSECHA. “**Estructura de los cereales y las leguminosas**”. Internet <http://www.postcosecha.net>. Noviembre (1998)
24. Combariza, A. y Sánchez, D. “**Estudio de la obtención de un alimento a partir de cultivos biofortificados**”. Tesis de grado. Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Química, Colombia. (2006)
25. FENALCE, Federación Nacional de cultivadores de cereales y leguminosas. “**Composición Nutricional**”. Internet [http://www.fenalce.org/pagina.php?p\\_a=51](http://www.fenalce.org/pagina.php?p_a=51).

26. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA). “**Segundo Informe Nacional sobre el estado de los recursos fitogenéticos para la agricultura y la alimentación**”. Venezuela. (2008)
27. VARIOS AUTORES. “**Enciclopedia SALVAT de la cocina**”, primera edición, Ediciones Salvat. España. (1977)
28. COVENIN (1980). Norma Venezolana de Alimentos. **Determinación de humedad**, Norma 1553-80. Comisión Venezolana de normas Industriales. Venezuela.
29. Sangronis, E. y colaboradores. “**Propiedades funcionales de las harinas de leguminosas (*Phaseolus vulgaris* y *Cajanus cajan*) germinadas**”. Revista Interciencia, Vol. 29, N° 2. Caracas – Venezuela. (2004)
30. COVENIN (1981). Norma Venezolana de Alimentos. **Determinación de Cenizas**, Norma 1783-81. Comisión Venezolana de normas Industriales. Venezuela.
31. COVENIN (1981). Norma Venezolana de Alimentos. **Determinación de Grasa**, Norma 1785-81. Comisión Venezolana de normas Industriales. Venezuela.
32. COVENIN (1980). Norma Venezolana de Alimentos. **Método Kjeldahl, Determinación de Nitrógeno**, Norma 1195-80. Comisión Venezolana de normas Industriales. Venezuela.
33. Marcano, M. “**Estudio de la harina de ñame (*discorea alata*) como potencial aditivo en la elaboración de productos de panadería**”. Tesis de grado. Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, Venezuela. (2001)

34. Espin, S. **“Caracterización fisicoquímica, nutricional y funcional de raíces y tubérculos andinos”** Capítulo IV. Instituto nacional de investigaciones agropecuarias. INIAP. Ecuador. (2004)
35. Hristov, A. **“Almidón”**. Internet: <http://www.ciencia.net/encicloalfa.jfp>.
36. Salas, W. **“Aplicación del sistema HACCP en el proceso de elaboración de alimentos de reconstitución instantánea a base de cereales extruidos”**. Trabajo de Grado. Departamento de Ingeniería Química. Universidad Nacional Mayor San Marco, Perú. (2003)
37. Anderson, R. y colaboradores. **“Gelatinization of corn grits by roll – and extrusion – cooking”**. Cereal Science today. Vol. 14. (1969)
38. Treybal R., **“Operaciones de Transferencia de Masa”**, Segunda Edición, Editorial McGraw–Hill, México. (2000)
39. Mc Cabe W., **“Operaciones Unitarias en Ingeniería Química”**, Cuarta Edición, Editorial McGraw–Hill, España. (1999)
40. Coulson J. M. y Richarson J. F., **“Operaciones Unitarias II Ingeniería Química”**, tercera edición, Editorial Pergamon, Oxford. (1978)
41. Prieto, J. **“Degradación física del almidón de cebada (*Hordeum Sativun Jess*) correlaciones entre la gelatinización y el tamaño del granulo”**. Revista Científica Vol 9, N° 2, España. (2009)
42. Martínez, N. **“Termodinámica y cinética de sistemas. Alimento entorno”**. Servicio de publicación, Venezuela. (1998)
43. Alizaga, R. **“Efecto de la temperatura de secado y del contenido de humedad durante el almacenamiento sobre la calidad de la semilla de frijol”**, Segunda Edición, Costa Rica. (1985)
44. Kreyger, J. **“Practical observations on the drying of seed”**. Seed Science and Technology, Zürich, Vol.1. (1973)

45. Hawlader, M. **“Drying characteristics of tomatoes”**. Journal of food. (1990)
46. Ahmed, J. **“Effect of pretreatment on drying characteristics and color of dehydrated green chilli”**. Department of food Science and Technology, India. (2001)
47. Caballero, V. **“Secado de amaranto: Simulación y modelado en lechos fluidizados”**. Tesis de Grado. Universidad Autónoma Metropolitana, México. (1999)
48. Mulet, A y colaboradores. **“Mecanismo y cinética del secado de zanahorias con aire caliente”**. Revista Agroquímica, Tecnológica y Alimenticia, Vol. 23, N° 3. (1983)
49. Suárez, R. **“Estudio comparativo de la incidencia de la Forma geométrica del Alimento en la Velocidad de Secado aplicado al Melón (*Cantaloupe*)”**. Tesis de Grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador. (2009)
50. Vega, A. y Lemus, R. **“Modelado de la Cinética de Secado de la Papaya Chilena (*Vasconcellea Pubescens*)”**. Información Tecnológica, Vol. 17, N°3. (2006)
51. Correa, P. **“Modelaje matemático para la descripción del proceso de secado de frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) en camadas delgadas”**. Revista Engenharia Agrícola. Vol. 27 N°2. Brasil. (2007)
52. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. **“Los granos y su calidad”**. Segunda Edición, Chile (1996)
53. Reyes, E. y colaboradores. **“Historia, naturaleza y cualidades alimentarias del frijón”**. Revista Investigación Científica, Vol. 4, No. 3. México. (2008)
54. Granito, M. **“Efecto del procesamiento sobre las propiedades funcionales del frijón (*Vigna Sinensis*)”**. Revista Interciencia. Vol. 29, N° 9. Venezuela. (2004)
55. Granito, M. **“Composición química y nutricional de variedades de caraota (*Phaseolus Vulgaris*) cultivadas en Venezuela”**. Revista Agronomía Tropical, Vol 56, N° 4. (2006)

56. Bilbao, T. **“Evaluación de la calidad de dos leguminosas durante su almacenamiento comercial”**. Tesis Doctoral. Universidad de la Habana. Cuba. **(2000)**
57. León, R. **“Caracterización química y valor nutricional de granos de leguminosas tropicales para la alimentación de aves”**. Revista Zootecnia Tropical, Vol. 11 N° 2, FONAIAP-CENIAP, Venezuela. **(1993)**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y  
ASCENSO:**

|                  |  |
|------------------|--|
| <b>TÍTULO</b>    | <b>Evaluar la influencia de la temperatura sobre la cinética de secado de frijol (<i>Vigna Unguiculata</i>), utilizando un secador discontinuo de bandejas</b> |
| <b>SUBTÍTULO</b> |  |

**AUTOR (ES):**

| <b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>   | <b>CÓDIGO CULAC / E MAIL</b>   |
|------------------------------|--|
| <b>Brito S., HENDALYS L.</b> | <b>CVLAC: 17.409.579</b><br><b>E MAIL: hendalysbrito@hotmail.com</b> |
| <b>Marín C., Karla P.</b>    | <b>CVLAC: 18.678.797</b><br><b>E MAIL: karlapaolamarín@gmail.com</b> |

**PALÁBRAS O FRASES CLAVES:**

Secado\_\_\_\_\_

Frijol\_\_\_\_\_

Difusividad\_\_\_\_\_

Humedad\_\_\_\_\_

Cinética\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

| <b>ÀREA</b>                     | <b>SUBÀREA</b>            |
|---------------------------------|---------------------------|
| Ingenieria y Ciencias Aplicadas | <u>Ingeniería Química</u> |
|                                 |                           |
|                                 |                           |

**RESUMEN (ABSTRACT):**

En el presente trabajo se estudió la influencia de la temperatura sobre la cinética de secado del frijol (*Vigna Unguiculata*), utilizando un secador discontinuo de bandeja, en el Laboratorio de Alimentos de la Universidad de Oriente, núcleo Anzoátegui. Para cumplir con el objetivo planteado, se efectuaron corridas experimentales utilizando frijol con una humedad establecida de 14,45% y en un rango de temperatura de 30 °C a 60 °C. Se construyeron curvas de secado, que se

ajustaron por medio del programa Statgraphics Plus 5.1, identificándose sólo el período de velocidad decreciente y observándose que al aumentar la temperatura cada 10 °C, se redujo considerablemente el tiempo de secado del frijol, obteniéndose menores tiempos a 60 °C. Esto es indicativo de que al aumentar la temperatura, se incrementa la velocidad de secado y por lo tanto la cantidad de agua evaporada. Con base a la obtención de un solo período de secado, se aplicó la segunda Ley de Fick en el intervalo de temperatura de 30 °C a 60 °C, y se concluyó que el mecanismo que predomina en el secado del frijol, es la difusión de la humedad del interior del sólido. La difusividad efectiva aumentó con la temperatura, mostrando valores de  $2,19 \cdot 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$  para 30 °C y  $4,17 \cdot 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$  para 60 °C. La variación de la difusividad con respecto a la temperatura fue descrita por la Ecuación de Arrhenius, ajustada por regresión lineal y dando como resultado una Energía de Activación en promedio de 17,15 kJ/mol.

### **METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y**

#### **ASCENSO:**

#### **CONTRIBUIDORES:**

| <b>APELLIDOS Y NOMBRES</b> | <b>ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL</b> |                  |           |             |             |
|----------------------------|------------------------------------|------------------|-----------|-------------|-------------|
| <b>Martínez., Petra M.</b> | <b>ROL</b>                         | <b>CA</b>        | <b>AS</b> | <b>TU x</b> | <b>JU</b>   |
|                            | <b>CVLAC:</b>                      | <b>4.902.046</b> |           |             |             |
|                            | <b>E_MAIL</b>                      |                  |           |             |             |
|                            | <b>E_MAIL</b>                      |                  |           |             |             |
| <b>Obando., Yaneis.</b>    | <b>ROL</b>                         | <b>CA</b>        | <b>AS</b> | <b>TU</b>   | <b>JU x</b> |
|                            | <b>CVLAC:</b>                      | <b>5.476.677</b> |           |             |             |
|                            | <b>E_MAIL</b>                      |                  |           |             |             |
|                            | <b>E_MAIL</b>                      |                  |           |             |             |

|                 |        |           |    |    |    |   |
|-----------------|--------|-----------|----|----|----|---|
| Silva., Héctor. | ROL    | CA        | AS | TU | JU | X |
|                 | CVLAC: | 3.955.146 |    |    |    |   |
|                 | E_MAIL |           |    |    |    |   |
|                 | E_MAIL |           |    |    |    |   |

**FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:**

|       |     |     |
|-------|-----|-----|
| 2.010 | 04  | 13  |
| AÑO   | MES | DÍA |

**LENGUAJE. SPA**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**ARCHIVO (S):**

| NOMBRE DE ARCHIVO                       | TIPO MIME          |
|---|--------------------|
| TESIS. Influencia de la temperatura.doc | Application/msword |
|   |                    |
|   |                    |

**CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS:** A B C D E F G H  
I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u  
v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

**ALCANCE**

**ESPACIAL:** \_\_\_\_\_ (OPCIONAL)

TEMPORAL: \_\_\_\_\_ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Químico \_\_\_\_\_

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado \_\_\_\_\_

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Química \_\_\_\_\_

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente \_\_\_\_\_

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y**

**ASCENSO:**

**DERECHOS**

De acuerdo al artículo 41 del Reglamento de Trabajos de Grado de la Universidad de

Oriente: “Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien le participara al Consejo Univeritario.

---

**AUTOR**

**Karla Paola Marín Campos**

**AUTOR**

**Hendalys Lourdes Brito Sosa**

**TUTOR**

**Ms.c Petra Martínez**

**JURADO**

**MS.c Yaneis Obando**

**JURADO**

**Ms.c. Héctor Silva**

**POR LA SUBCOMISION DE TESIS**

**Iraima Salas**