



UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO

FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERIA EN ALIMENTOS

CARRERA DE INGENIERIA BIOQUIMICA

Cinética de secado de cereales provenientes de la Región Centro del Ecuador

Trabajo de Titulación, modalidad proyecto de investigación, previo a la obtención del Título de Ingeniero Bioquímico, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos.

Este trabajo de titulación forma parte del proyecto REDU (PREDU-2016-004) bajo el tema “Estudio de la valoración tecnológica del proceso de secado para optimizar el aprovechamiento de cereales mediante el uso de secadores híbridos”, coordinado por la Dra. Emérita Delgado Plaza (ESPOL).

Autor: Lauro David Noroña Gamboa

Tutor: Ph.D. Mirari Yosune Arancibia Soria

Ambato – Ecuador

Julio - 2018

APROBACION DEL TUTOR

Ph.D. Mirari Yosune Arancibia Soria

CERTIFICA:

Que el presente trabajo de titulación ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto autorizo la presentación de este Trabajo de Titulación modalidad Proyecto de Investigación, el mismo que responde a las normas establecidas en el Reglamento de Títulos y Grados de la Facultad.

Ambato, 13 de junio del 2018



Ph.D. Mirari Yosune Arancibia Soria.

CI: 180214246-1

Tutora

DECLARACION DE AUTENTICIDAD

Yo, Lauro David Noroña Gamboa, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniero Bioquímico son absolutamente originales, auténticos y personales; a excepción de las citas.



Lauro David Noroña Gamboa

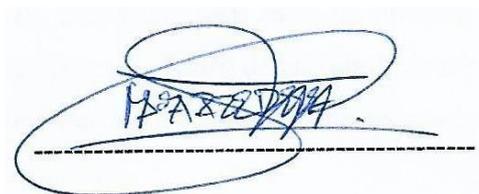
C.I. 180356989-4

Autor

APROBACION DE LOS MIEMBROS DE TRIBUNAL DE GRADO

Los suscritos profesores Calificadores, aprueban el presente trabajo de Titulación modalidad Proyecto de Investigación, el mismo que ha sido elaborado de conformidad a las disposiciones emitidas por la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos de la Universidad Técnica de Ambato.

Para constancia firman:

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'H. A. ...', written over a horizontal dashed line.

Presidente del Tribunal

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Liliana Patricia Acurio Arcos', written over a horizontal dashed line.

MSc. Liliana Patricia Acurio Arcos

C.I.180406708-8

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Daniel Alfonso Cabrera Valle', written over a horizontal dashed line.

MSc. Daniel Alfonso Cabrera Valle

C.I.180256159-5

Ambato, 10 de Julio del 2018.

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Proyecto de Investigación o parte de él un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi Proyecto, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este Proyecto dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.



Lauro David Noroña Gamboa

C.I. 180356989-4

Autor

DEDICATORIA

A mi Dios todopoderoso, que me ha bendecido con una grandiosa familia en especial mis padres, mi abuelita y mi tía que con su esfuerzo, su apoyo, su amor incondicional y sus consejos han velado por mi todos los días de mi vida y han permitido formarme como una gran persona. Muchas gracias por todo.

Los amo con todo mi corazón

David

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi Señor creador por haberme dado la bendición de la vida, salud, fuerza y ánimo para salir adelante cada día de mi vida, gracias por brindarme aliento para alcanzar mis metas que me propuesto y más que todo gracias por poner a las personas correctas en mi vida.

A mi padre Lauro Humberto Noroña y mi madre Evelia Marycruz Gamboa que con su esfuerzo y su dedicación estuvieron pendientes de mí, me apoyaron en todas mis decisiones y siempre me dieron razones para ser mejor cada día de mi vida.

A mi abuelita Juana Abril y mi tía María de los Ángeles Gamboa que han sido pilares fundamentales de mi formación, gracias por su apoyo moral incondicional, por sus consejos que siempre me han alentado y han motivado a mi persona para salir adelante. Gracias por permitirme ser como un miembro más de su familia y saber que puedo contar con ustedes para todo.

Un agradecimiento muy especial a la doctora Mirari Arancibia por toda la ayuda, paciencia, conocimientos y ánimos brindados por su parte durante elaboración de la presente investigación. Al ingeniero Pablo Amancha por darme la oportunidad y la confianza desde el inicio para el desarrollo del proyecto.

A todos los maestros de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos en especial a la Doctora Sandra Horvitz, Ing. Dolores Robalino e Ing. Aracely Pilamala por los consejos y la ayuda brindada cuando la requerí.

A la empresa Molino Miraflores S.A en especial al Ing. Gabriel Olmos por permitirme hacer uso de sus equipos para la realización de la parte experimental.

Al resto de mi familia que con su ejemplo de unión y armonía hemos pasado grandes momentos inigualables.

A mis amigos y amigas tanto dentro como fuera del aula de clase gracias su amistad, su apoyo, los ánimos brindados, por todos los momentos y las experiencias vividas durante todos estos años. Gracias a todos y cada uno de ustedes.

INDICE GENERAL DE CONTENIDO

| | |
|---------------------------------------|----|
| EL PROBLEMA..... | 3 |
| 1.1 Tema de investigación | 3 |
| 1.2 Justificación | 3 |
| 1.3 Objetivos..... | 4 |
| 1.3.1 Objetivo General..... | 4 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos..... | 4 |
| MARCO TEORICO..... | 5 |
| 2.1 Antecedentes Investigativos..... | 5 |
| 2.1.1 Cereales..... | 5 |
| 2.1.2 Conservación de granos | 8 |
| 2.1.3 Almacenamiento | 8 |
| 2.1.4 Secado | 10 |
| 2.2 Hipótesis | 15 |
| 2.2.1 Hipótesis nula..... | 15 |
| 2.2.2 Hipótesis alternativa..... | 15 |
| 2.2.3 Variable independiente | 15 |
| 2.2.4 Variable dependiente..... | 15 |
| MATERIAL Y METODOS..... | 16 |
| 3.1 Recolección de materia prima..... | 16 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2 Cinética de secado..... | 16 |
| 3.3 Determinación de las propiedades fisicoquímicas | 17 |
| 3.4 Diseño Experimental..... | 18 |
| 3.5 Modelos de secado..... | 18 |
| RESULTADOS Y DISCUSION | 24 |
| 4.1 Condiciones del proceso de secado..... | 24 |
| 4.1.1 Cinética de secado..... | 24 |
| 4.1.2 Propiedades fisicoquímicas..... | 31 |
| 4.1.3 Modelos de secado | 38 |
| 4.2 Verificación de hipótesis..... | 53 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 54 |
| 5.1 Conclusiones | 54 |
| 5.2 Recomendaciones | 54 |
| BIBLIOGRAFIA | 56 |
| ANEXOS | 61 |

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue determinar la cinética de secado de granos de maíz, trigo y cebada a 3 diferentes temperaturas 60 °C, 50 °C y 40 °C. El aire de secado se obtuvo mediante convección forzada a una velocidad constante de 1,1 m/s. Debido a los efectos presentados en cada cereal con respecto a cada temperatura se evaluaron las propiedades fisicoquímicas como: el contenido de humedad, tamaño del grano, masa de 1000 granos, % contenido de proteína, peso específico y actividad de agua. La temperatura de 50 °C presentó los valores más bajos en términos del contenido de humedad, tamaño, masa y peso específico, sin embargo, la temperatura más efectiva que garantizó la calidad de los granos durante el proceso de secado fue 60 °C, donde se observó una menor actividad de agua y un mayor % del contenido de proteína retenida. Se utilizaron los modelos matemáticos de Crank , Omoto y BET para describir el comportamiento de los datos experimentales, donde se determinó el coeficiente de difusividad del proceso (D_{eff}) y (K_s), la energía de activación (E_a) a partir de la linealización de la ecuación de Arrhenius y sus respectivos coeficientes de correlación (R^2) para cada cereal. Los datos experimentales presentaron buena correlación porque se obtuvieron coeficientes de correlación altos en los modelos matemáticos, se demostró también que los coeficientes de difusividad efectiva fueron mayores conforme exista una mayor velocidad de secado y que la energía de activación fue mayor conforme exista bajos coeficientes de difusividad en el proceso.

Palabras Clave: Secado, coeficiente de difusividad, granos, contenido de humedad, Arrhenius.

ABSTRACT

The aim of the study was to determinate the drying kinetics of corn, wheat and barley grains at 3 different temperature and relative humidity conditions of 60 °C, 50 °C and 40 °C. The air drying was obtained by forced convection and a constant speed of 1, 1 m/s. The physicochemical properties were evaluated in each cereal respect to the temperature such as: moisture content, grain size, mass of 1000 grains, specific weight % protein content and water activity. The temperature of 50°C presented the lowest values in terms of moisture content, size, mass of 1000 grains and specific weight; however, the temperature of 60 °C was the most effective temperature in terms of quality of the grains during the drying process because the protein content was much higher and the water activity was low. The experimental data were adjusted to the mathematical models of Crank, Omoto and BET, where the diffusivity coefficient (D_{eff}) (K_s) and the activation energy (E_a) were determined by the Arrhenius equation linearization and it's respective correlation coefficients (R^2) to each cereal. The experimental data presented good correlation because the values of the correlation coefficients obtained in the mathematical models were higher. It was also shown that the diffusivity coefficients were higher at higher drying rate, and the activation energy were lower respect to the diffusivity coefficient.

Key Words: Drying process, effective diffusion, grains, moisture content, Arrhenius

INTRODUCCION

El sector agrícola es el eje fundamental para el desarrollo económico y la seguridad alimentaria de un país, este se encarga de analizar el comportamiento de cultivos y su respectivo rendimiento a través del tiempo. Dentro de los cultivos con mayor importancia están los cereales que, además de ser alimentos con alta disponibilidad y grandes cantidades de nutrientes, poseen una gran demanda a nivel mundial debido al aumento poblacional evidenciado en los últimos años; lo necesario para satisfacer las necesidades alimentarias de cada país (Monteros, Sumba, & Salvador, 2013; Torres, 2016)

En Ecuador como en muchos países del mundo se ha generado la problemática de poner mayor atención en el control técnico agrícola que se produce a nivel de campo y no en el manejo postcosecha de los cereales, teniendo como consecuencia pérdidas permanentes y universales tanto en cantidad como en calidad, convirtiéndolos en ineficaces para procesos productivos y no aptos para el consumo humano (Caro-Greiffenstein, 1998). Entre los principales factores responsables de generar pérdidas en la etapa de postcosecha están los insectos, roedores, aves y hongos; que de forma conjunta provocan grandes volúmenes de pérdidas cuando el sistema de manejo y almacenamiento es inadecuado (García-Lara & Bergvinson, 2007).

Los sistemas de almacenamiento tienen el propósito de preservar la calidad de los granos mediante una baja temperatura y bajo contenido de humedad, donde se ha producido un almacenamiento seguro y que además demostró ser eficientes para largos periodos de tiempo. Sin embargo para alcanzar estas condiciones es necesario la aplicación del calor a través del secado el cual tiene por objeto remover mediante evaporación la mayor cantidad de agua presente de un producto, con lo cual inhibe el crecimiento microbiano, reduce la actividad enzimática y evita la degradación de los productos (Lule & Koyuncu, 2015; Tames, 2010).

Un alto contenido de humedad durante el almacenamiento contribuye a la pérdida del poder de germinación de la semilla, afecta la calidad del almidón, de la proteínas y además induce acidez; también afecta las estructuras físicas (granos integrales) provocando la pérdida del contenido nutricional a través de la reducción de las

composiciones químicas promedio y los valores energéticos de la especie convirtiéndola en materia prima ineficiente para la industrialización (De Oliveira et al., 2016)

En base a lo expuesto, en el presente trabajo se pretende analizar el efecto de tres temperaturas de secado en las propiedades fisicoquímicas de tres tipos de cereales con el fin de identificar el proceso más adecuado para reducir el contenido de humedad de los granos con la menor afectación en sus propiedades.

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1 Tema de investigación

CINÉTICA DE SECADO DE CEREALES PROVENIENTES DE LA REGIÓN
CENTRO DEL ECUADOR

1.2 Justificación

El secado es un proceso de gran importancia en la producción de alimentos. Controlar el contenido de humedad evita que el grano corra el riesgo de deteriorarse durante el almacenamiento. El secado permite inhibir la germinación de las semillas, reducir el contenido de humedad hasta un nivel que impida el crecimiento de microorganismos, y evitar las reacciones asociadas al deterioro. La escasa capacitación de los agricultores y el desconocimiento de las técnicas adecuadas de secado y almacenamiento de granos han dado como resultado pérdidas cuantiosas para la industria (Blancas, 2007; Grolleaud, 2017).

Para que las condiciones de almacenamiento sean óptimas es necesario eliminar el contenido de humedad de los granos hasta un cierto límite. Las técnicas que utilizan calor son las más adecuadas, sin embargo, hay que tener en cuenta la calidad de los granos ya que al ser expuestos a temperaturas de secado de entre 40, 60 y 80 °C, se produce una variación notable en las características fisicoquímicas especialmente en el contenido de proteína que tiende a decaer a medida que el tiempo de exposición a la temperatura de secado aumenta (Soares, Jorge, & Montanuci, 2016).

En Ecuador, los principales cereales cosechados son el maíz, el trigo y la cebada, especialmente en la región interandina, sin embargo, al no contar con técnicas de almacenamiento adecuadas, se ha recurrido a la importación de semillas para satisfacer la demanda nacional (PROECUADOR, 2016). El propósito de este estudio fue desarrollar las cinéticas de secado de 3 tipos de cereales a 3 diferentes temperaturas con el fin de encontrar las condiciones idóneas de almacenamiento reduciendo el

contenido de humedad con la menor afectación posible en sus propiedades fisicoquímicas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar las cinéticas de secado de granos de la región centro del Ecuador

1.3.2 Objetivos Específicos

Determinar las isothermas de desorción de agua en maíz, trigo y cebada dentro del rango de temperaturas en que se efectuó el secado, establecer un modelo matemático de las isothermas de desorción y estudiar la termodinámica mediante la aplicación de la teoría B.E.T.

Comparar las curvas de secado de los granos en corriente de aire a 40 °C, 50 °C, y 60 °C.

Identificar las variaciones que se producen en las propiedades fisicoquímicas de los cereales por efecto de las condiciones de secado.

Definir las condiciones de secado que minimicen la pérdida de calidad del grano.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes Investigativos

2.1.1 Cereales

Por sus características nutritivas, alto valor proteico y costo accesible, los cereales constituyen la principal fuente de energía en la alimentación de los seres humanos. Alrededor del 90% del aporte energético de la dieta diaria proviene de forma directa e indirecta de los cereales. Además, son un complemento para alimentación animal en la ganadería y en la industria agroalimentaria. Los cereales más difundidos en la dieta alimenticia son: el trigo, el maíz, el arroz, la cebada, la avena, el sorgo, el centeno y el mijo. En los últimos años, el crecimiento de la población ha motivado el consumo de estos cereales concomitantemente con el desarrollo de técnicas de secado, almacenamiento y transporte de grandes cantidades de granos para evitar su desperdicio, especialmente durante la postcosecha (INCAP/OPS, 2005; Espinoza & Quispe, 2011)

El conocimiento de la estructura de los cereales permite analizar los cambios que se pueden producir en las diferentes fases de la postcosecha y en la transformación en alimentos; ciertas características son típicas de cada cereal y se consideran como referencia para el manejo de variables como la humedad, la temperatura y el tiempo de almacenamiento (Ospina, 2001).

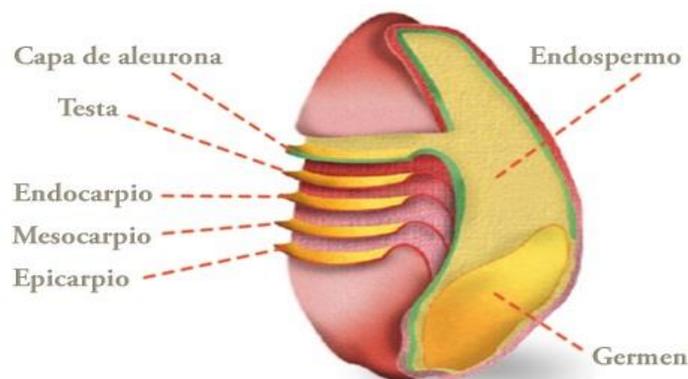


Figura 1 Estructura básica de un cereal. Editado de (Brigid, 2004)

Los granos de cereales están compuestos por: pericarpio, tegumento o testa, endospermo y el germen. El pericarpio consta de 2 partes; la parte externa que está formada de capas delgadas y gruesas que en conjunto forman el salvado, estas capas son el epicarpio (que consta de células rectangulares a manera de una película), el mesocarpio (constituido por células alargadas que están de forma transversal) y endocarpio (células de pared delgada). La parte interna en cambio está formada por células cruzadas y tubulares que cumplen funciones de protección y conducción de agua dentro del grano. El tegumento o testa es una capa fina que cubre al pericarpio y se encarga de contener los pigmentos característicos. El endospermo consta de células con pared y su principal función es contener los nutrientes para la nueva planta hasta que desarrolle hojas verdes y comience la fotosíntesis, ésta a su vez, se compone de: capa aleurona, endospermo córneo y vítreo y el endospermo harinoso. Finalmente el germen es una estructura con paredes delgadas que contiene a la nueva planta, está formado por el escutelo y el eje embrionario que se encarga de la movilización de las reservas de alimento del grano durante la germinación (Brigid, 2004; Ospina, 2001).

Maíz (*Zea mays*)

El componente principal del maíz es el almidón, el cual representa el 73% del grano, además posee azúcares como la fructosa, glucosa y la sacarosa. El grano también está compuesto por ácidos grasos saturados como el ácido palmítico y esteárico; ácidos grasos como el ácido linoleico, ácido araquidónico, y ácido oleico. La proteína (7% al 8% del total del grano), constituye otro de los componentes de gran importancia del maíz, especialmente por la presencia de aminoácidos como la lisina, el triptófano y en menor cantidad la leucina (Pérez & Zárate, 2013).

Durante los últimos años en Ecuador el maíz ha sido uno de los principales cultivos, tanto en la cantidad de hectáreas cosechadas como en producción, es el tercer producto de mayor superficie cosechada (13% - 15% de la superficie nacional) lo que representa el 3% al 7% de la producción nacional. En el verano del 2016 el rendimiento del maíz duro seco (13% de humedad y 1% de impurezas) fue de 5,77 toneladas por hectárea (t/ha), siendo Loja la provincia de mayor producción. Se estima que la producción total se ha reducido a un 8,8% en el año 2015 debido, entre otros, a factores fitosanitarios y a la escasez de agua (Castro, 2016; Moreno & Salvador, 2014).

Trigo (*Triticum aestivum*)

El grano de trigo está compuesto básicamente por 80% - 85% en peso del endosperma, 3% de germen y el resto corresponde al pericarpio, testa y la capa aleurona. El endosperma está compuesto de almidón y proteínas como las albúminas y globulinas que representan el 20%, las gliadinas con un 35%, las gluteninas con 35% y el resto de proteínas residuo, también contiene un 0.8% de lípidos relacionados con la amilosa denominada lisoleticina. Las capas exteriores como el pericarpio, la testa y la capa aleurona, están compuestas por 15% de proteína, 5% de grasa, 6% de cenizas, 14% de agua y 24% de otros componentes, siendo los principales carbohidratos, 35% de celulosa, 45% de hemicelulosa, 8% de azúcares y el resto de almidón. Finalmente, el germen aporta con 26% de proteínas, 10% de grasa, 5% de cenizas, 20% de almidón, 4% de pentosanas, 16% de azúcares, 14% de agua y 6% de otros componentes (Hugo & Godiño, 2000).

En Ecuador, la producción de trigo en los últimos años se ha mostrado en un nivel relativamente bajo, para satisfacer el consumo de la población ha sido necesario realizar importaciones. De acuerdo al Banco Central del Ecuador (2007), el 98% de los requerimientos locales de trigo provienen de las importaciones y apenas el 2% (9000 Tm) es producido a nivel local (Garófalo, Ponce, & Abad, 2011).

Cebada (*Hodeum vulgare*)

Los granos de cebada tienen grandes aplicaciones tanto en estado germinado como tostados debido al gran aporte de proteínas y complejo B de su composición. La industria de la panificación y cervecera se benefician de este hecho ya que la cebada aporta un 40% de energía durante su consumo en la alimentación humana. Los carbohidratos principales son el almidón, el cual aporta energía y junto con la fibra ayuda a retener el colesterol e impedir su absorción en el tracto digestivo, además mejora el metabolismo de los ácidos grasos. Dentro del aporte proteico, la cebada es rica en aminoácidos tales como: el ácido glutámico, prolina, leucina, lisina y triptófano. La cubierta o capa superior del grano es rica en minerales tales como el hierro, fosforo, zinc y el potasio, lo cual representa un 32%. El aporte de fósforo es esencial para la alimentación ya que influye en los ácidos nucleicos y en la

composición de los fosfolípidos que participan en el transporte de grasa, su valor dentro de la cebada es el 0.47%. Existe también una proporción de vitaminas dentro de las cuales destaca las de grupo B, como la riboflavina, niacina, el ácido pantoténico y la colina (Barnola, Alarcón, & Maza, 2017; Villacrés, 1996).

En los últimos años, la producción de cebada en el Ecuador ha mermado considerablemente en relación a la demanda mundial. Los cultivos locales (Provincias de Cotopaxi, Chimborazo, Imbabura y Pichincha) producen en promedio 24000 toneladas/año, lo que representa un rendimiento de 0,6 t / ha, de la cual el 40% de la producción es destinada a la industria cervecera y el resto para la generación de subproductos para la alimentación humana y animal (Lema, Basantes, & Pantoja, 2017).

2.1.2 Conservación de granos

Generalmente los granos son cosechados con contenidos de humedad que van del 20 al 30%, por lo tanto es esencial realizar un tratamiento sobre los granos frescos para prevenir su deterioro especialmente por ataque de hongos. Uno de los factores fisiológicos más críticos durante el almacenamiento de granos es el contenido de humedad del cultivo. Un alto contenido de humedad conduce a problemas de almacenamiento porque fomenta los problemas de hongos e insectos, respiración y germinación. Existen varios tratamientos como almacenamiento en silo, tratamientos químicos, enfriamiento y secado que permiten asegurar una corta o larga vida útil a los granos. Sin embargo, el secado es una de las técnicas más difundidas (Brooker, Bakker, & Hall, 1993).

2.1.3 Almacenamiento

El almacenamiento tiene como finalidad conservar la calidad de los granos cosechados, evitar su deterioro y las pérdidas producidas debido a la contaminación por factores externos. Estos factores, que han afectado a la calidad de los granos, ocurren por las malas técnicas de manejo postcosecha y al almacenamiento ineficiente; entre estos tenemos los factores meteorológicos, el ataque de aves, roedores, insectos y la proliferación de los microorganismos patógenos. Como acción preventiva se han desarrollado varios tipos de almacenamiento que pueden ser muy simples, como verter

en el suelo los granos, hasta almacenarlos en grandes estructuras hechas de metal denominadas silos, diseñadas para el llenado y vaciado instantáneo (Torres, 2016).

Según Abadía & Bartosik (2013) el tiempo de almacenamiento de los granos depende de 3 factores:

- Humedad, ya que si su contenido es alto, el grano va a ser susceptible a la aparición de todo tipo de plagas durante su almacenamiento.
- Temperatura, a medida que la temperatura es mayor provoca más rápido el deterioro de los granos, y además influye en la aparición de insectos.
- Porcentaje de daño mecánico del grano, ya que además de encontrarse dañado es más susceptible al ataque de hongos y provoca la contaminación hacia el resto de la cosecha, generando pérdidas de gran magnitud.

Tipos de almacenamiento

El almacenamiento en silos ha sido el método más utilizado en torno a las normativas y condiciones técnicas de preservación de granos de cereales. Se caracterizan por ser contenedores grandes que pueden ser abiertos o cerrados herméticamente con aperturas de alimentación en la parte superior para realizar el llenado y bocas de descarga en la base o a los lados para el vaciado. En el interior está compuesto por cemento vidriado, resinas o vidrio soluble para facilitar el flujo de los granos al momento del vaciado. También algunos silos están compuestos de tolvas con un ángulo de 28° para facilitar la movilidad al momento de la descarga (SURATEP, 2004)

El almacenamiento a granel es un método más moderno ya que tiene la ventaja de ser mecanizado y contar con equipamientos y aireación para mantener a los granos en óptima calidad, permitiendo que no sean afectados por la humedad, la temperatura y el ataque de plagas. Su almacenamiento se realiza en silos enormes y el grano es cuantificado a través de bushels, estos silos pueden contener hasta miles de bushels de un grano en específico (Espinoza & Quispe, 2011; Torres, 2016).

Otro sistema de almacenamiento muy eficiente pero costoso en el almacenamiento con atmósferas controladas, su principio se basa en que los granos son almacenados en

silos herméticos y se extrae todo su contenido de oxígeno para evitar la proliferación de microorganismos, la aparición de humedad y la supervivencia de artrópodos. Cuando el sistema está libre de oxígeno se inyecta al silo nitrógeno, dióxido de carbono o cualquier gas inerte el cual permite obtener más viabilidad al grano para el almacenamiento por períodos de tiempo extensos (Espinoza & Quispe, 2011).

2.1.4 Secado

El secado de productos agrícolas es la técnica más usada para garantizar calidad y estabilidad dentro de la industria agroalimentaria. El principio de esta técnica se basa en la reducción de la actividad del agua del interior del producto a tal punto que alcanza un contenido óptimo que evita la degradación de los productos por la reducción de la actividad biológica y los cambios fisicoquímicos que ocurren durante periodos de almacenamiento (Borah, Hazarika, & Khayer, 2015; Smaniotto, Resende, & de Sousa, 2017).

Además de la reducción del contenido de humedad de los productos agrícolas, el secado también contribuye a la reducción sustancial del peso y el volumen de los materiales, minimiza los costos de embalaje, espacio, facilita el manejo de los productos en tratamientos posteriores como el tamizado y la separación electrostática, en donde es necesario tener sólidos secos para la maximización en la utilización del producto, elimina los problemas con los envases y sobre todo permite la conservación de la calidad de los productos cuando se realiza a temperatura ambiente y cuando son destinados al transporte a largas distancias (Condorhuamán, Armijo, & Reyna, 2004; Wankhade & Sapkal, 2013).

Parámetros de secado

Humedad promedio: es la humedad que contiene un sólido que se expresa generalmente en cantidad de agua sobre cantidad de sólido seco o en % de humedad en base seca.

Humedad de equilibrio: cualquier material higroscópico (incluido el grano) tiene su propio equilibrio característico (o equilibrio) entre la humedad que contiene y el vapor de agua en el aire con el que está en contacto. Los granos que contienen una cierta

cantidad de humedad están expuestos al aire, la humedad que se mueve del grano al aire, o viceversa hasta que alcance un equilibrio entre la humedad en el grano y en el aire.

Humedad crítica: es el contenido de humedad que se encuentra en el punto de transición entre el periodo de velocidad constante y el periodo decreciente. El tiempo al que la curva de secado se aleja del comportamiento lineal o termina el periodo constante se denomina tiempo crítico de secado.

Constante de tiempo: este parámetro representa el tiempo que toma el proceso de secado desde el inicio hasta alcanzar la humedad en equilibrio, si la velocidad fuese constante en todo el proceso. Se representa como la razón entre la capacidad máxima sobre la velocidad máxima del proceso (Gatica, 2015).

Curvas de secado

La velocidad de secado es el fenómeno en donde se reduce el contenido de humedad de un material en un cierto periodo de tiempo, este depende de ciertas condiciones como el tipo de secador usado, el contenido de humedad inicial, contenido de humedad en equilibrio, la temperatura y la velocidad del aire empleado. La mejor determinación de las curvas de secado es de forma experimental y se procede colocando una muestra sobre una bandeja que este expuesta a una corriente de aire y se determina la pérdida de peso de la muestra durante el secado a diferentes intervalos de tiempo (Geankoplis, 2006).

Método para graficar una curva de velocidad de secado

Inicialmente, se necesita una conversión de los datos de secado a datos de velocidad de secado, esto se realiza transformando el peso total (W) del sólido húmedo a diferentes tiempos (t) en el contenido de humedad del sólido para cada intervalo de tiempo (Xt) mediante la siguiente ecuación:

$$Xt = \frac{W - Ws \text{ (Kg totales de agua)}}{Ws \text{ (Kg de sólido seco)}} \quad \text{(Ec. 1) (Geankoplis, 2006)}$$

Donde:

X_t: es el contenido de humedad del sólido en cada intervalo de tiempo (Kg H₂O/Kg SS)

W: es el peso del sólido a cada intervalo de tiempo (Kg)

W_s: es el peso del sólido seco (Kg)

Seguidamente se establece el valor del contenido de humedad libre (X) en Kg de agua libre / Kg de sólido seco para cada valor de (X_t), que se calcula restando por el contenido de humedad en equilibrio (X_e) el cual se obtiene mediante la aplicación de la ecuación 1 cuando los pesos son constantes al final del proceso de secado:

$$X = X_t - X_e \quad (\text{Ec. 2}) \text{ (Geankoplis, 2006)}$$

X_e: contenido de humedad en equilibrio (Kg H₂O/Kg. SS)

Luego se traza una gráfica del contenido de humedad libre (X) en función del tiempo (t) para obtener una curva de velocidad de secado.

Para obtener la velocidad de secado R, se traza una gráfica de humedad libre (X) en función de los valores de dX/dt para ciertos valores del tiempo en cada punto con la siguiente ecuación.

$$R = -\frac{L_s}{A} * \frac{dX}{dt} \quad (\text{Ec. 3}) \text{ (Geankoplis, 2006)}$$

Donde:

R: es la velocidad de secado (Kg H₂O/h.m²)

L_s: es el peso de sólido seco utilizado (Kg)

A: es el área usada para el secado (m²)

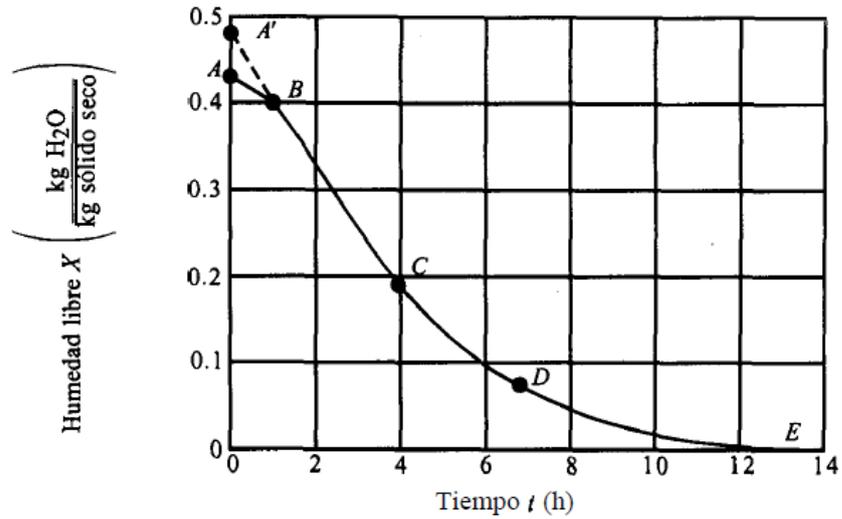


Figura 2. Curva secado en función del tiempo (Geankoplis, 2006)

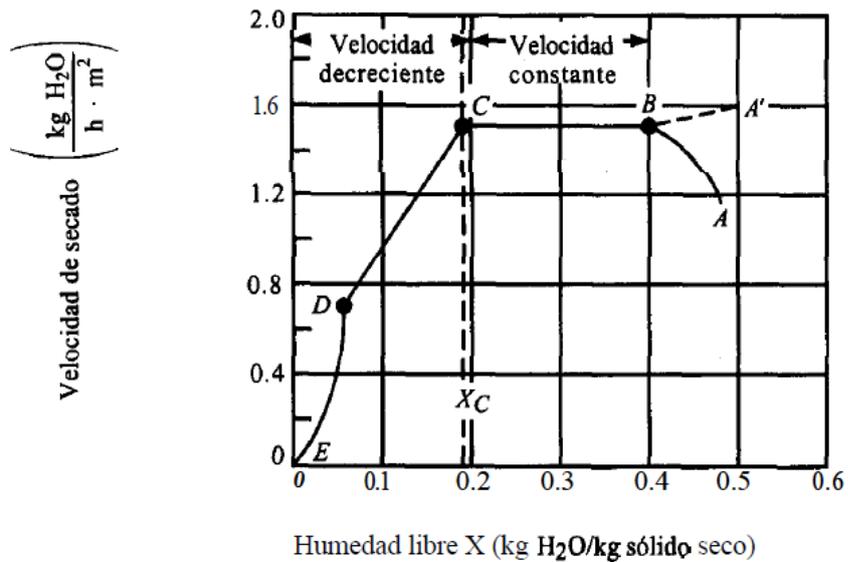


Figura 3. Curva de velocidad de secado en función de la humedad libre (Geankoplis, 2006).

En la figura 2 y 3 se puede observar que el punto A representa el tiempo cero donde el contenido de humedad es el inicial, en este punto el sólido tiene una temperatura inferior de la que tendrá al final, al llegar al punto B la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio, por otra parte, si el sólido está bastante caliente al empezar la operación se ubicará en el punto A' aunque este periodo inicial de ajuste es corto pasa por alto en los tiempos de análisis de secado. La curva en los puntos BC

es recta como se muestra en la figura 3 porque la pendiente y la velocidad son constantes, por lo tanto toma el nombre de periodo de velocidad constante de secado. A partir del punto C la velocidad empieza a disminuir llegando al punto D donde se denomina periodo de velocidad decreciente, y a partir del punto D disminuye con más rapidez hasta llegar al punto E donde el material a secar alcanza su contenido de humedad en equilibrio (X_e) ya que la presión parcial del aire de secado se iguala a la presión parcial del material (Geankoplis, 2006).

Secado durante el periodo de velocidad constante

En el primer periodo del proceso de secado, la superficie del sólido está completamente mojada al inicio y sobre ella hay una película de agua continua y no combinada que da la apariencia de actuar como si el sólido no estuviera presente. En este punto la velocidad de evaporación es independiente del sólido e igual a la que tendría la superficie líquida pura. Sin embargo si el sólido presenta hendiduras o porosidad, la mayor parte de evaporación en este periodo proviene de su interior y continua mientras el agua siga llegando a la superficie con una rapidez igual a la que se evapora (Geankoplis, 2006).

Secado durante el periodo de velocidad decreciente

El segundo periodo del proceso de secado empieza en el punto C el cual representa al contenido de humedad crítica (X_c) como se puede observar en la figura 3. En ese punto el contenido de agua es muy baja y la superficie ya no está totalmente mojada; por lo tanto esta va a comenzar a disminuir hasta que se seque totalmente en el punto D. El calor de evaporación se transfiere hasta la zona de vaporización a través del sólido, el cual se desplaza con lentitud por debajo de la superficie hasta que el agua evaporada que atraviesa el sólido sea igual a la corriente de aire. La humedad que se elimina en este periodo puede ser muy pequeña aunque el tiempo requerido puede ser muy largo. (Geankoplis, 2006; Torres, 2016)

2.2 Hipótesis

2.2.1 Hipótesis nula

El desarrollo de curvas de fracción de agua removida ($\text{Kg H}_2\text{O/Kg s.s}$) por unidad de tiempo a una temperatura y humedad relativa de aire no permite determinar la cinética de secado en cereales.

2.2.2 Hipótesis alternativa

El desarrollo de curvas de fracción de agua removida ($\text{Kg H}_2\text{O/Kg s.s}$) por unidad de tiempo a una temperatura y humedad relativa de aire permite determinar la cinética de secado en cereales.

Señalamiento de variables

2.2.3 Variable independiente

Tiempo y temperatura de secado

2.2.4 Variable dependiente

Fracción de agua removida o Humedad libre (X) ($\text{Kg H}_2\text{O/Kg s.s}$)

CAPITULO III

MATERIAL Y METODOS

3.1 Recolección de materia prima

Los granos de maíz, trigo y cebada fueron recolectados en las provincias de Cotopaxi y Tungurahua, durante la temporada de crecimiento del segundo semestre del año 2017. Las muestras fueron almacenadas a $8\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ durante 20 días previos a los análisis, para mantener un contenido de humedad uniforme (Markowski, Bialobrewski, & Modrzeuska, 2010).

3.2 Cinética de secado

El secado se realizó en un horno convectivo de circulación de aire (GANDER MTN CD-160, China). En cada caso se secaron 300 g de granos de cada cereal a 40 °C, 50 °C y 60 °C. Los ensayos se realizaron por triplicado. Para la cinética de secado, el registro de los pesos se realizó en una balanza (METLER TOLEDO EQ-5/10, EE.UU), cada 5 minutos (durante los primeros 30 minutos) finalmente cada 30 minutos hasta obtener 3 pesos constantes (Soares et al., 2016).

Para la determinación de la cinética de secado fue indispensable tomar en cuenta ciertos parámetros en el proceso como: velocidad del aire, humedad relativa (HR) y temperatura del bulbo seco. Al conocer estas condiciones específicas, se determinó la humedad en equilibrio de cada cereal (Alvarado, 1996).

La velocidad del aire en el secador se determinó con un anemómetro (SPERS CIENTIFIC 840032, EE.UU) y la humedad relativa del secador con un termohigrómetro (BOE 330, Alemania).

3.3 Determinación de las propiedades fisicoquímicas

Humedad

El contenido de humedad, que representa la cantidad total de agua presente en el grano, en el maíz se determinó de acuerdo al método UNE en ISO 7971-1:2009, Sección 2, y por el método UNE en ISO 712:2009 para el trigo y cebada.

El contenido de humedad de los granos se expresó en porcentaje en base seca (%) y fue calculado a través de la siguiente ecuación:

$$\%CH \text{ bs} = \frac{P_i - P_f}{P_f} * 100 \quad (\text{Ec. 4})$$

Pi = peso inicial

Pf = peso final (Abadía & Bartosik, 2013)

Peso del sólido seco (S.S)

El peso del sólido seco se determinó mediante la ecuación 5, tomando como principal referencia los valores del contenido de humedad determinado anteriormente (Maldonado & Pacheco, 2003).

$$S.S = \frac{((100 - \% \text{ Humedad del grano}) * P_{sho})}{100} \quad (\text{Ec.5})$$

Psho: peso del sólido húmedo al inicio del proceso (Kg)

Peso Específico

El peso específico es otra de las propiedades físicas importante de los granos. Se toma en cuenta para predecir la capacidad de almacenamiento, sistemas de transporte y para la fabricación de equipos de separación. Esta propiedad se define como el peso que tiene un determinado volumen de una cierta cantidad de granos, el cual es expresado en unidades de kilogramos por hectolitro (Hugo, 2000; Ordoñez, Gely & Pagano, 2012). Para la determinación del peso específico se utilizó un analizador de granos NIR (PERTEN Inframatic 9500, EE.UU.).

Tamaño del grano

Se utilizó un calibrador Vernier con una precisión de 0,1 mm, para la medición del largo y ancho de una muestra de 50 granos de cada cereal.

Masa de 1000 granos

Se determinó de acuerdo al método UNE en ISO 520:2010, y consistió en pesar una cierta cantidad de granos de la porción de análisis y expresar en base a 1000 granos.

Contenido de proteínas

Se utilizó el analizador de granos NIR (PERTEN Inframatic 9500, EE.UU.) el cual está basado en la norma estándar ISO 16634-2:2009 Dumas.

Actividad de agua

Se determinó utilizando un medidor de actividad de agua (a_w) (aquaLab, 4TE, EE.UU).

3.4 Diseño Experimental

Se aplicó el diseño de un solo factor con 3 tratamientos (40, 50 y 60 °C). Los datos obtenidos se mostraron como el valor medio \pm la desviación estándar. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA). Las diferencias se consideraron significativas para un valor de $\alpha=0,05$. Para el análisis estadístico se utilizó el software GraphPad Prism (EE.UU).

3.5 Modelos de secado

Modelo de Crank

Este modelo matemático se basa en la segunda ley de Fick, la cual representa la difusión de un líquido en un sólido y es la más utilizada en el caso de los alimentos (Alvarado, 1996).

$$\frac{dw}{dt} = D \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (\text{Ec. 6})$$

La solución general de la ecuación de la segunda ley de Fick en coordenadas esféricas obtenida por Crank (1975) se representa en la siguiente ecuación (Soares et al., 2016).

$$MR = \frac{Mt - Me}{Mo - Me} = \frac{6}{\pi^2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-D_{eff} n^2 \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (\text{Ec.7})$$

Donde:

MR: es la humedad adimensional

D_{eff}: coeficiente de difusividad efectiva (m²/s);

Mt: es la humedad en un tiempo determinado

Me: es la humedad en equilibrio

Mo: la humedad inicial

r: es el radio de la partícula (m)

t: el tiempo (h)

Considerando a los granos como partículas esféricas, que el coeficiente de difusión es constante e independiente de la concentración, transferencia unidimensional, la resistencia del transporte de masa insignificante en la interfaz líquido-sólido y que el secado es constante se obtiene la siguiente ecuación (Soares et al., 2016).

$$MR = \frac{Mt - Me}{Mo - Me} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{D_{eff} \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (\text{Ec.8}) \text{ (Soares et al., 2016)}$$

Y mediante la linealización con logaritmos naturales la ecuación 8 toma la siguiente forma:

$$\ln(MR) = -\frac{1}{2} - \frac{D_{eff} * \pi^2 * t}{r^2} \quad (\text{Ec.9}) \text{ (Soares et al., 2016)}$$

Con la ecuación 9 se calculó el coeficiente de difusión efectivo (D_{eff}) para cada cereal a cada temperatura utilizando las pendientes de la regresión lineal del Ln MR frente al tiempo.

Para el cálculo de la energía de activación, se utilizó la ecuación de Arrhenius.

$$Def f = Do \exp \frac{Ea}{RG (T+273.15)} \quad (\text{Ec. 10}) \text{ (Paquita, 2015)}$$

Donde

D_{eff}: es el coeficiente de difusividad efectiva (m²/s)

D_o: es la difusividad a la temperatura de referencia (m²/s)

E_a: es la energía de activación (KJ/mol)

RG: es la constante universal de los gases 8,31451 J/mol.K y

T: la temperatura usada para el proceso de secado en K. (°C +273.15)

Mediante una linealización la ecuación 10 se pudo simplificar de la siguiente forma:

$$\ln(Def f) = \ln (Do) - \frac{Ea}{RG(T + 273, 15)} \quad (\text{Ec.11}) \text{ (Paquita, 2015)}$$

Modelo de Omoto

Teniendo en cuenta un balance de masa en régimen transitorio para el agua presente en el grano y considerando la concentración uniforme se obtiene la ecuación 12 que es la base del modelo de Omoto (Soares et al., 2016).

$$\frac{d\rho AV}{dt} = NA \quad (\text{Ec. 12}) \text{ (Soares et al., 2016)}$$

Donde:

ρA: es la variación de masa de agua en el grano (Kg/m³)

V: es el volumen del grano (m³)

t: el tiempo (h)

NA: es el flujo de masa de agua (Kg/m².h)

Si la geometría del grano es esférico, volumen constante y el ajuste del flujo de masa $NA = K_s (\rho_{eq} - \rho_A)$ se obtiene la ecuación 13,

$$\frac{d(\rho_A)}{dt} = -3 \frac{K_s}{r_o} (\rho_{Aeq} - \rho_A) \quad (\text{Ec. 13}) \text{ (Soares et al., 2016)}$$

Donde

K_s : es el coeficiente de difusión (m/h)

r_o : el radio de la partícula (m)

ρ_A : la concentración de agua en el grano en un instante de tiempo (kg/m^3).

ρ_{Aeq} : la concentración de agua del grano en el equilibrio (kg/m^3).

Esta ecuación inicialmente fue propuesta para la hidratación de granos (Omoto, Andrade, & Jorge, 2009) pero puede adaptarse fácilmente al proceso de secado con un ligero cambio de signo (Soares et al., 2016) y la ecuación 13, en forma linealizada, tomaría la siguiente forma

$$\text{Ln}\theta = \text{Ln} \left(\frac{\rho_A - \rho_{Aeq}}{\rho_{A0} - \rho_{Aeq}} \right) = - \frac{3K_s}{r_o} t$$

$$(\text{Ec.14}) \text{ (Fracasso, Tobaldini, Jorge, \& Jorge, 2015)}$$

Donde:

θ : es la concentración de agua en el grano adimensional

ρ_A : la concentración de agua en el grano en un instante de tiempo (kg/m^3).

ρ_{Aeq} : la concentración de agua del grano en el equilibrio (kg/m^3).

ρ_{A0} : la concentración de agua del grano inicial (kg/m^3).

K_s : el coeficiente de difusión (m/h)

r_o: el radio de la partícula (m)

t: el tiempo (h).

Con la ecuación 14 se calculó el coeficiente de difusión K_s (m/h) a partir de la pendiente de la recta entre Ln θ vs el tiempo y, mediante el arreglo de la ecuación de Arrhenius se obtuvo la energía de activación en este modelo mediante la ecuación 15.

$$\ln K_s = \ln K_o - E \frac{1}{T} \quad (\text{Ec.15}) \text{ (Fracasso et al ., 2015)}$$

Donde:

K_o: es un parámetro de la difusión a cada temperatura (m/h),

E: la energía de activación (K⁻¹)

T: la temperatura usada para el proceso de secado en K. (°C +273.15).

Modelo B.E.T (Brunauer-Emmet-Teller)

Relaciona el contenido de humedad de un material (% CH) o la humedad en equilibrio con la actividad de agua (*a_w*) donde forma isotermas de adsorción o desorción a través de la siguiente ecuación:

$$MC = \frac{Mo \cdot C \cdot aw}{((1 - aw) + (C + 1)(1 - aw)aw)} \quad (\text{Ec.16}) \text{ (Talens, 2017)}$$

Donde:

MC: contenido de humedad (% b.s)

a_w: actividad de agua

Mo: humedad del producto en la monocapa donde el agua interactúa con los componentes orgánicos (% b.s)

C: constante característica del material relacionada con el calor desprendido en el proceso de desorción.

Para la representación de los datos experimentales se propone la ecuación 16 de forma linealizada.

$$\frac{aw}{MC(1-aw)} = \frac{(C-1)}{mo.C} aw + \frac{1}{mo.C} \quad (\text{Ec.17}) \text{ (Talens, 2017)}$$

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Condiciones del proceso de secado

Para cada temperatura de secado se obtuvo una velocidad de aire constante de 1,1 m/s y la humedad relativa presentó variaciones de acuerdo a cada temperatura. A 60 °C la humedad relativa no pudo ser determinada por el termohigrómetro por el límite de detección del equipo y se presentó como valor final de 6% HR a la temperatura de 50 °C. Se estimó que la humedad relativa para 60 °C fue menor que 6% HR, mientras que a 40 °C tuvo un valor de 9% HR. Según Gatica (2015) la humedad relativa disminuye como consecuencia del calentamiento del aire hasta alcanzar un valor constante; tal como en los resultados obtenidos, ya que a una mayor temperatura de secado, la humedad relativa del aire fue disminuyendo.

4.1.1 Cinética de secado

En las Figuras 4,5 y 6 se pueden observar las curvas experimentales de humedad libre (X) en función del tiempo obtenidas a través de la ecuación 2 para el proceso de secado de maíz, trigo y cebada respectivamente. Los tiempos en los que los granos alcanzaron su humedad en equilibrio fueron diferentes para cada temperatura y para cada cereal. Sin embargo, en las gráficas se puede observar que mientras mayor es la temperatura del aire, menor será el tiempo en alcanzar su humedad en equilibrio. Vásquez-Chávez y Vizcarra-Mendoza (2008), determinaron que el parámetro de la temperatura del aire favorece al aumento de la evaporación del agua en el grano y por consiguiente, la pérdida de humedad se vuelve más rápida. Además, cuando el aire de secado contiene menos humedad, la absorción del agua contenida en el grano va a ser mayor y por lo tanto el proceso de secado tomará menos tiempo (Larrosa, Lorenzo, & Zaritzky, 2016).

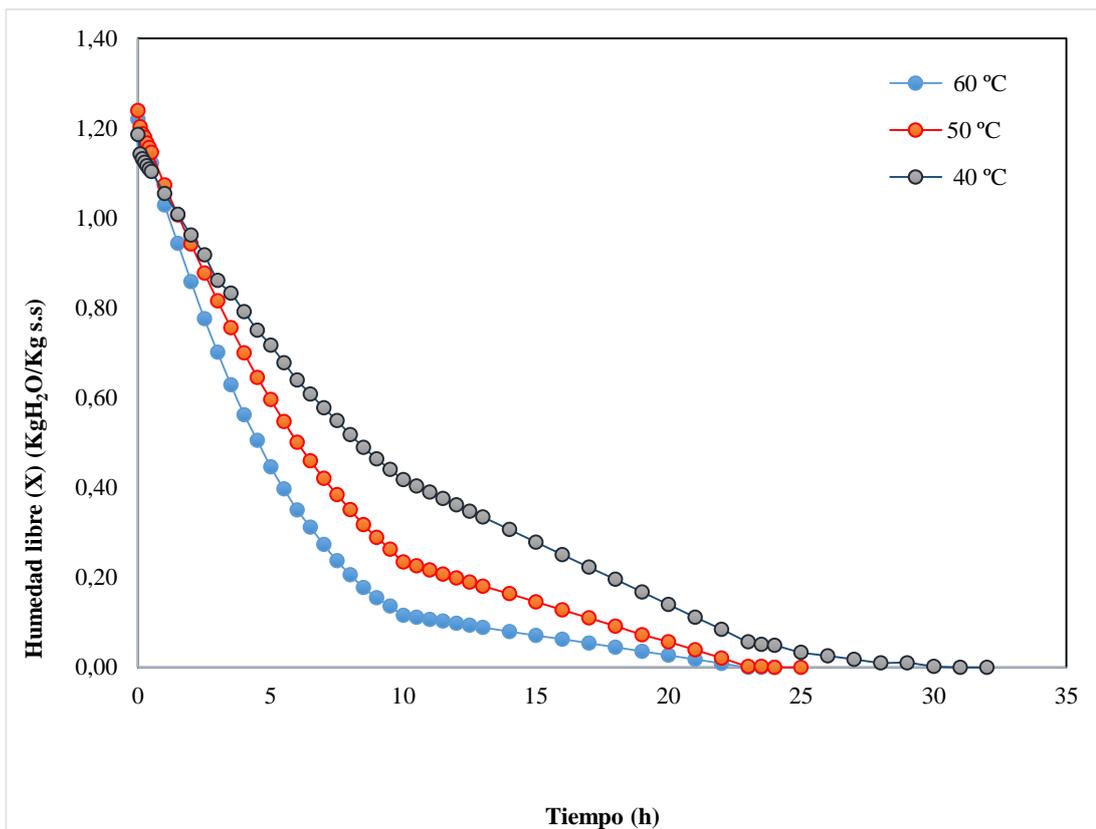


Figura 4. Curvas experimentales de secado de maíz a 40, 50 y 60 °C

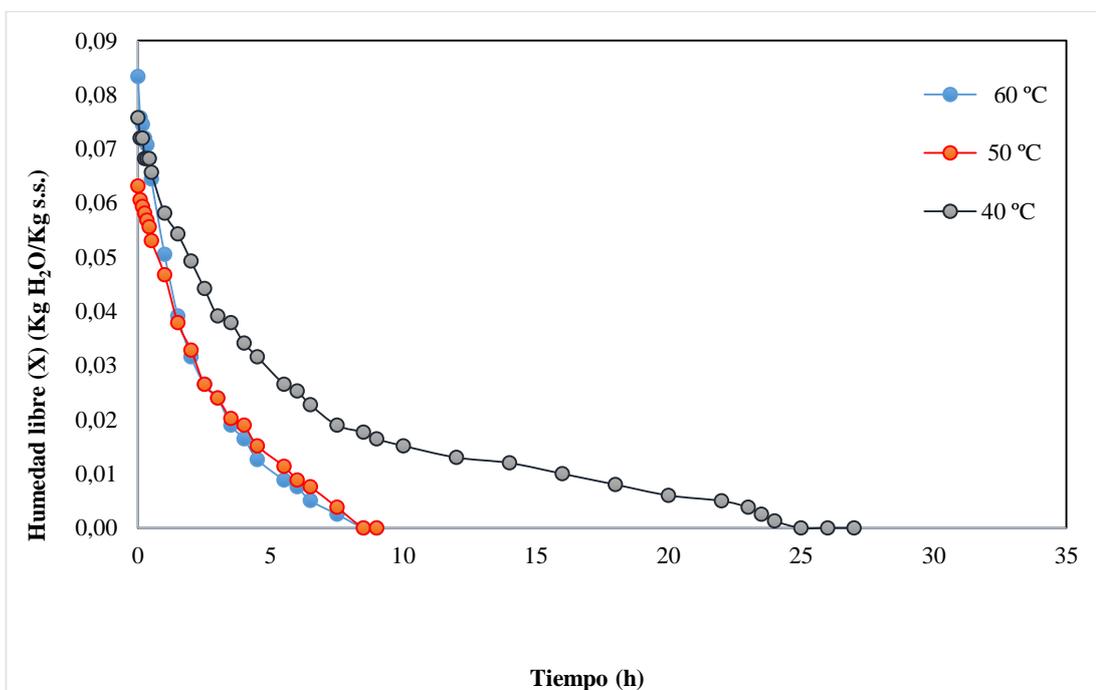


Figura 5. Curvas experimentales de secado de trigo a 40, 50 y 60 °C

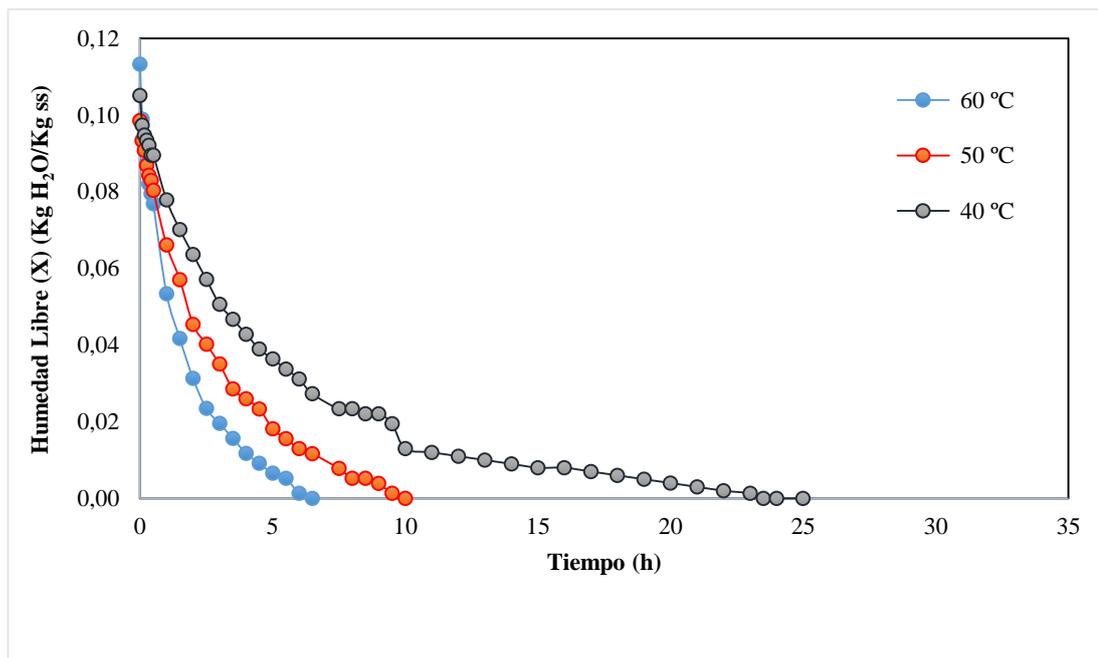


Figura 6. Curvas experimentales de secado de cebada a 40, 50 y 60 °C

En todas las curvas se observó que al inicio del proceso de secado disminuye rápidamente la humedad, y luego este proceso se ralentiza paulatinamente hasta alcanzar el equilibrio. Según Ajala, Tunde-Akintunde (2012) y Geankoplis (2006), la mayoría de productos agrícolas se secan en un periodo de tasa decreciente y alcanzar la humedad relativa del medio puede tomar alrededor de 9 horas.

La muestra de maíz alcanzó una humedad en equilibrio de $0,102 \pm 0,009$ Kg H₂O/Kg s.s a los 60 °C, $0,082 \pm 0,005$ Kg H₂O/Kg s.s a 50 °C y $0,135 \pm 0,009$ Kg H₂O/Kg s.s a 40 °C al cabo de 24, 25 y 32 horas respectivamente (Figura 4). En el trigo el proceso de secado a 60 °C tomó alrededor de 9 horas, a 50 °C, 9,5 horas y a 40 °C alrededor de 27 horas, con humedades en equilibrio de $0,053 \pm 0,001$ Kg H₂O/Kg s.s; $0,073 \pm 0,002$ Kg H₂O/Kg s.s y $0,061 \pm 0,001$ Kg H₂O/Kg s.s respectivamente. Se observaron diferencias entre las curvas de secado del maíz y del trigo (Figura 4 y 5) debido a que el contenido de humedad inicial de los granos del maíz fue mayor en comparación con el trigo. Respecto a la cebada (Figura 6), su comportamiento durante el secado fue similar al del trigo, y alcanzó humedades en equilibrio de $0,054 \pm 0,002$ Kg H₂O/Kg s.s; $0,069 \pm 0,002$ Kg H₂O/Kg s.s y $0,062 \pm 0,002$ Kg H₂O/Kg s.s a 60 °C, 50 °C y 40 °C respectivamente, en tiempos de 7; 10,5 y 25 horas cada uno.

No se realizó un análisis estadístico en las temperaturas de secado porque el objetivo del trabajo fue evaluar el efecto del secado en las propiedades fisicoquímicas de los granos.

Curvas de velocidad de secado

En las Figuras 7, 8 y 9 se muestran las curvas de velocidad de secado, obtenidas mediante el cálculo de la velocidad por la ecuación 3 en función del tiempo. En las figuras se puede observar la separación de los periodos donde la temperatura de la superficie del sólido se incrementó hasta alcanzar el estado de sequedad en los granos (Heldman & Singh, 2009; Brennan, 1998). En el maíz (Figura 7) se determinaron humedades críticas de 1,029 Kg H₂O/Kg s.s; 0,943 Kg H₂O/Kg s.s y 0,962 Kg H₂O/Kg s.s a 60 °C, 50 °C y 40 °C respectivamente; estas fueron obtenidas a través de la visualización de los puntos donde se produjo la separación de los periodos de velocidad constante y de los periodos de velocidad decreciente en las curvas experimentales, a partir de ello las curvas adoptaron una pendiente hasta que alcanzaron sus respectivas humedades en equilibrio. En el trigo a 50 °C (Figura 8B) y la cebada (Figura 9) no se pudo apreciar un periodo de velocidad constante. Según Alvarado (1996) en algunos alimentos el periodo de velocidad de secado constante es muy pequeño y puede ser desestimado. Torres (2016) indicó que el proceso de difusión, que permite el movimiento de la humedad desde el interior del grano, es tan rápido como su proceso de evaporación.

El tiempo en que el maíz alcanzó la humedad crítica a cada temperatura fue de alrededor de 1 a 2 horas, el trigo en 2,5 horas y la cebada en 1,5 horas de secado. Los resultados obtenidos fueron similares a los presentados por Geankoplis (2006) de aproximadamente 3 horas de acuerdo a las características del producto a secar. Cerrón (2013) indicó que para el secado de la quinua, la humedad crítica se puede alcanzar tras 0,75 a 1,25 horas dependiendo del tratamiento térmico y, Gatica (2015) estableció que con 1,86 horas se puede secar maqui a 40 °C.

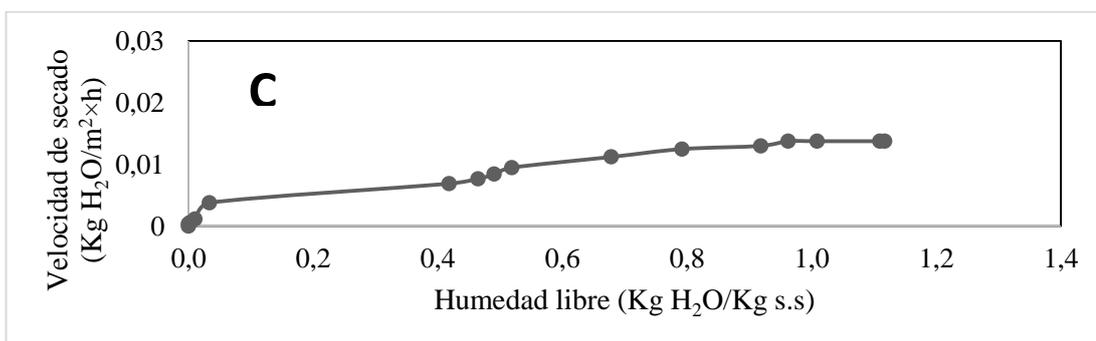
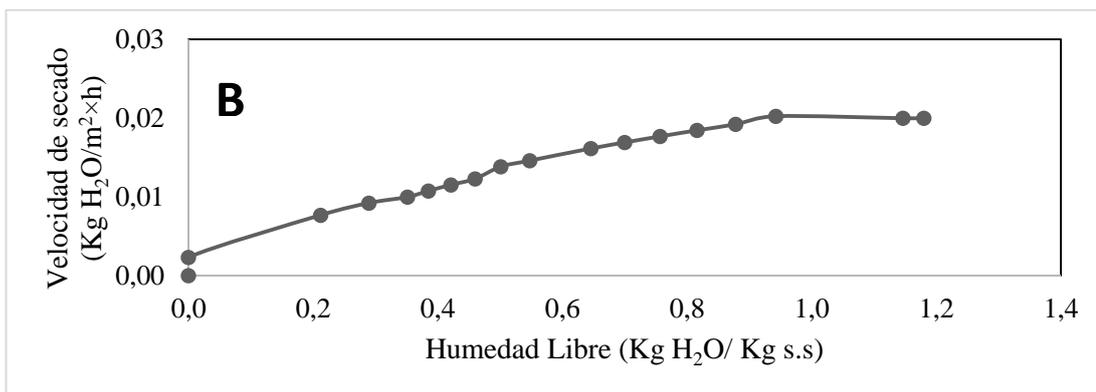
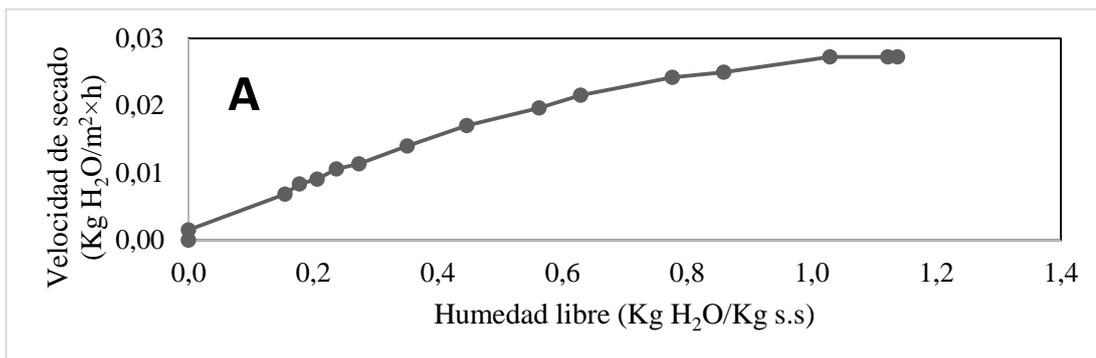


Figura 7. Curvas experimentales de velocidad de secado de maíz a 60 °C (A), 50 °C (B) y 40 °C (C).

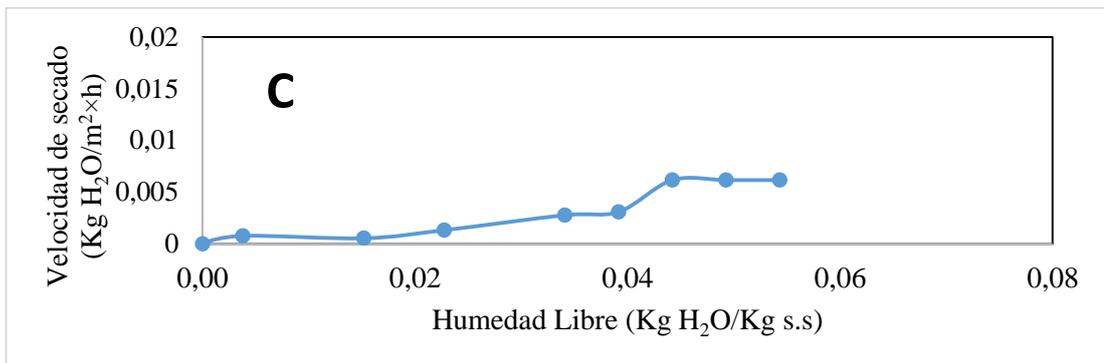
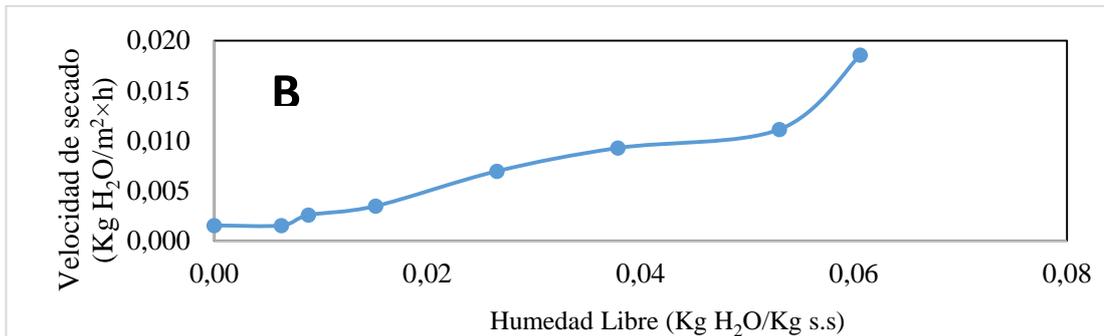
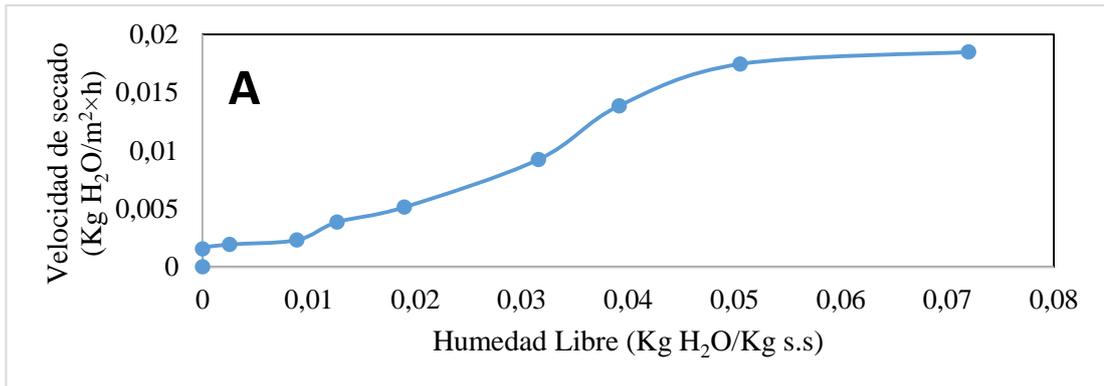


Figura 8. Curvas experimentales de velocidad de secado de trigo a 60 °C (A), 50 °C (B) y 40 °C (C).

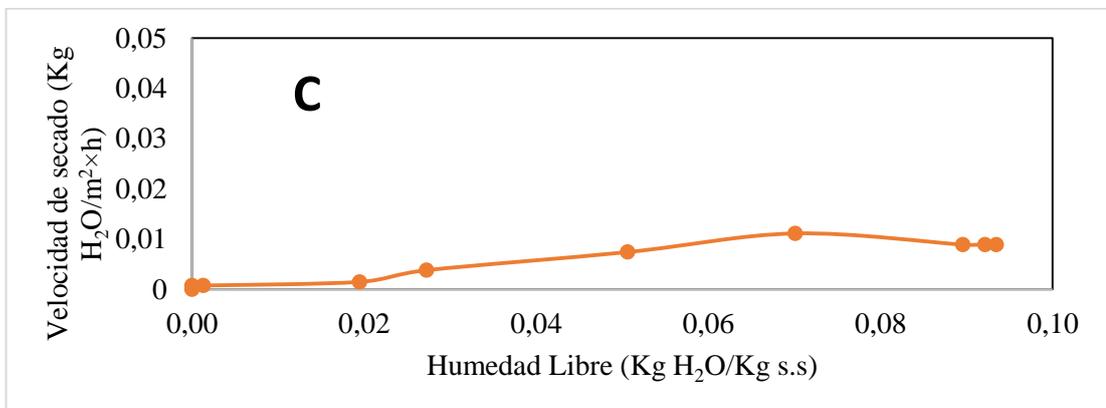
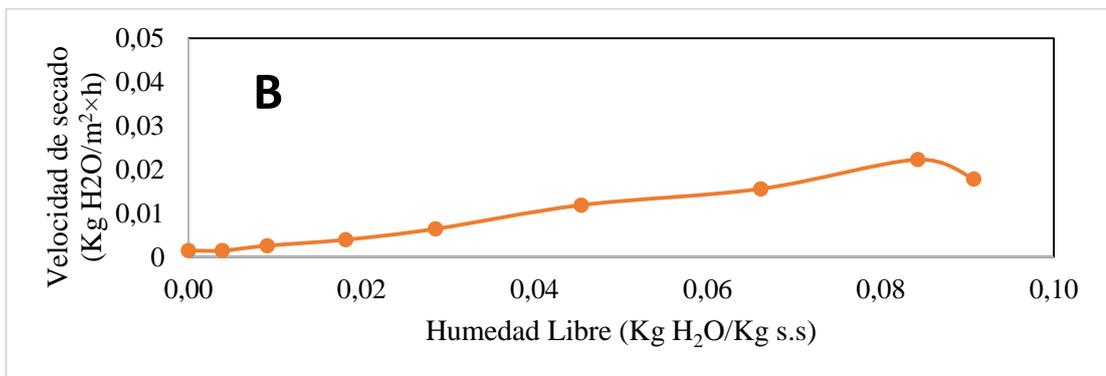
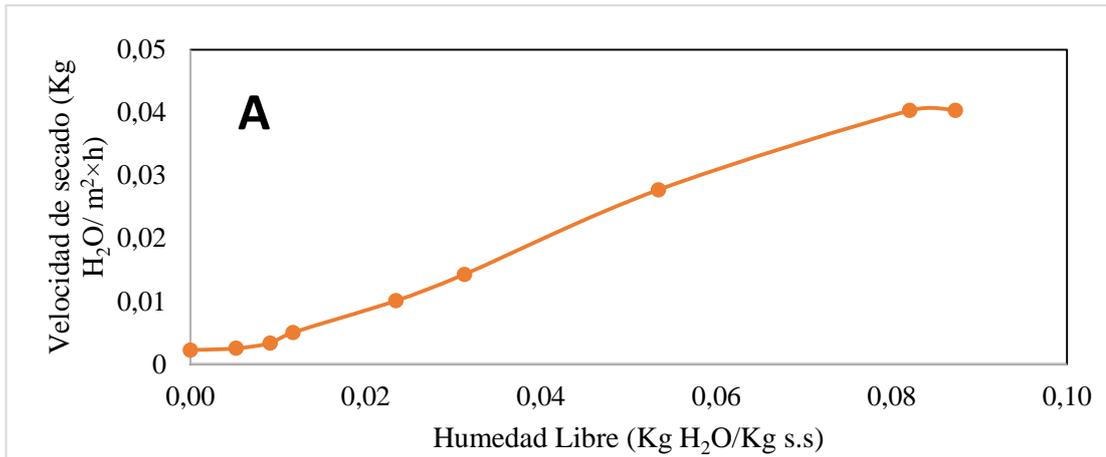


Figura 9. Curvas experimentales de velocidad de secado de cebada a 60 °C (A), 50 °C (B) y 40 °C (C).

4.1.2 Propiedades fisicoquímicas

Contenido de humedad

En la Figura 10 se muestra el contenido de humedad de los granos antes y después del secado. A la temperatura de 50 °C se obtuvieron los valores de humedad más bajos para el trigo y la cebada ($5,937 \pm 0,139$ % y $5,863 \pm 0,119$ %), sin embargo para el maíz el valor más bajo se observó con el secado a 60 ° C. Estos resultados se han mostrado diferentes en comparación con García (2013) y Soares et al. (2016) donde obtuvieron valores finales de 14,2 % para maíz y 11,74 % para la cebada en estado seco; esto se produjo debido a que utilizaron granos con diferente contenido de humedad inicial, (32.1% maíz y 13% cebada) que les permitieron ajustar a un contenido de humedad final en específico. Sin embargo Yildirim (2018) obtuvo valores de 9,1% 6,8% y 5,6% de contenidos de humedades finales para el trigo, que se asemejan a los obtenidos ya que trabajó con temperaturas de 50 °C, 60 °C y 70 °C con la aplicación de aire por convección forzada.

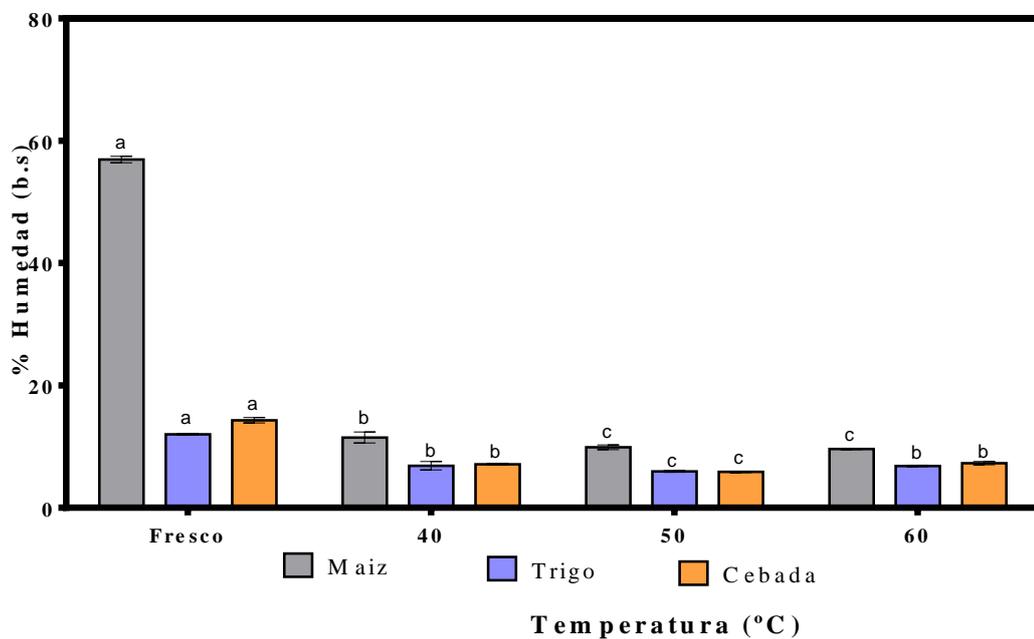


Figura 10. Efecto de la temperatura sobre el contenido de humedad durante el secado de maíz, trigo y cebada a 40, 50 y 60 °C. Diferentes letras (a, b, c) indican diferencias significativas en la misma muestra a diferentes temperaturas.

Peso Específico

En la Figura 11 se muestra el efecto de la temperatura sobre el peso específico de los granos después del secado. En el maíz no se obtuvo el valor de peso específico en estado fresco debido a que el analizador de granos no permite analizar muestras con contenidos de humedad superiores al 20%. En el resto de resultados, se observaron diferencias significativas en el maíz tras el secado a 50 y 60 °C. Este efecto de disminución del peso específico con relación a la temperatura concuerda con el trabajo de García-Jimenez y Vázquez (2016) para el maíz. Por otro lado, la cebada presentó diferencias significativas cuando las muestras se secaron a 50 y 60 °C. Resultados similares fueron observados por Vázquez-Chávez, Salazar, Guerrero, y Vizcarra (2001) para el trigo. Estos autores indicaron que la disminución en el peso específico está directamente relacionado con la dureza, tamaño y densidad del grano por lo que en estado base este es más voluminoso y al aumentar la temperatura el volumen va a disminuir conforme se extraiga el agua. Un comportamiento similar se observó en la cebada. La temperatura de 50 °C fue la que provocó una disminución más significativa en comparación con las otras temperaturas de secado los valores finales de $58,533 \pm 0,115$ kg/hl para el maíz, $74,33 \pm 0,115$ kg/hl para el trigo y $57,533 \pm 0,058$ kg/hl para la cebada.

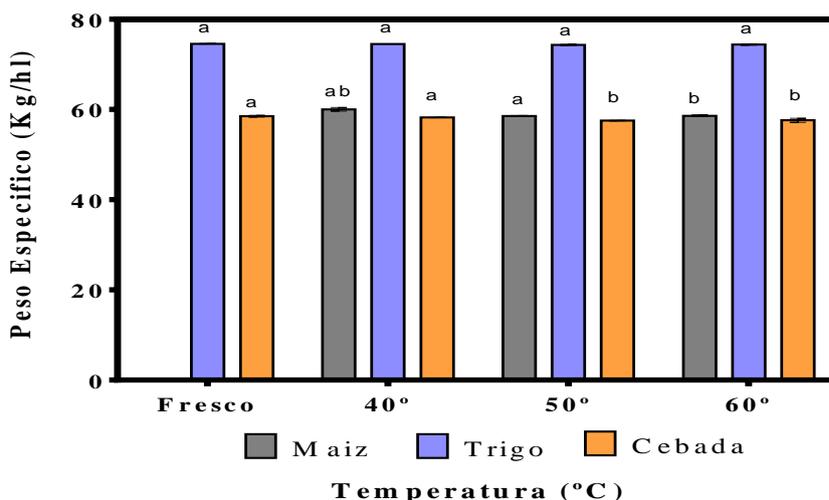


Figura 11. Efecto de la temperatura de secado sobre el peso específico. Diferentes letras (a, b, c) indican diferencias significativas en la misma muestra a diferentes temperaturas

Tamaño del grano

Respecto al tamaño del grano existieron diferencias significativas tanto en el largo (Figura 12A) como en el ancho (Figura 12B). Existe una disminución considerable del tamaño de los granos desde su estado inicial hasta el final del secado por el efecto de la temperatura. La temperatura de 50 °C fue la que más influyó en el proceso de secado, ya que los granos presentaron los valores más bajos en relación a las otras temperaturas de secado 0,659 ±0,004 cm largo y 0,345± 0,002 cm ancho para trigo y 0,918± 0,008 cm largo y 0,388± 0,010 cm en ancho para cebada; cada una en su estado final. No se encontraron diferencias significativas para el maíz en ningún caso este hecho indica que la temperatura no afecta las dimensiones del grano. De acuerdo con Saucedo, Villaseñor, Lugo, & Ruvalcaba (2017), el tamaño del grano depende de las características biológicas, principalmente de la variedad y la genética de la planta. Otro factor que tiende a afectar la reducción del tamaño del grano frente a la temperatura es la porosidad ya que esta genera una pérdida de carga en el proceso de secado; si el grano tiene menos espacios vacíos en su interior la salida del agua por difusión va a ser más difícil (Ordoñez et al., 2012).

Los resultados obtenidos son similares a los obtenidos para el maíz en estado fresco de (1,2 cm largo y 0,8 cm ancho), trigo (0,91 cm de largo y 0,86 cm ancho) y para la cebada (0,6 – 0,95 cm largo y 0,15 – 0,4 cm ancho) (Manfreda y Acosta, 2015; Ordoñez et al., 2012; SAGARPA, 2017).

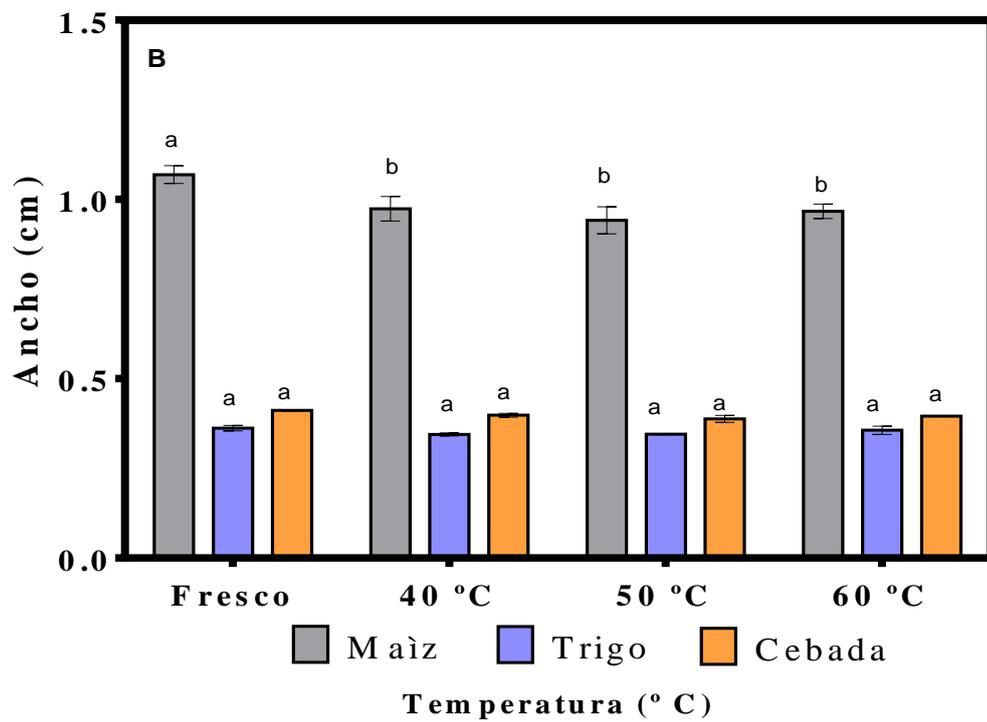
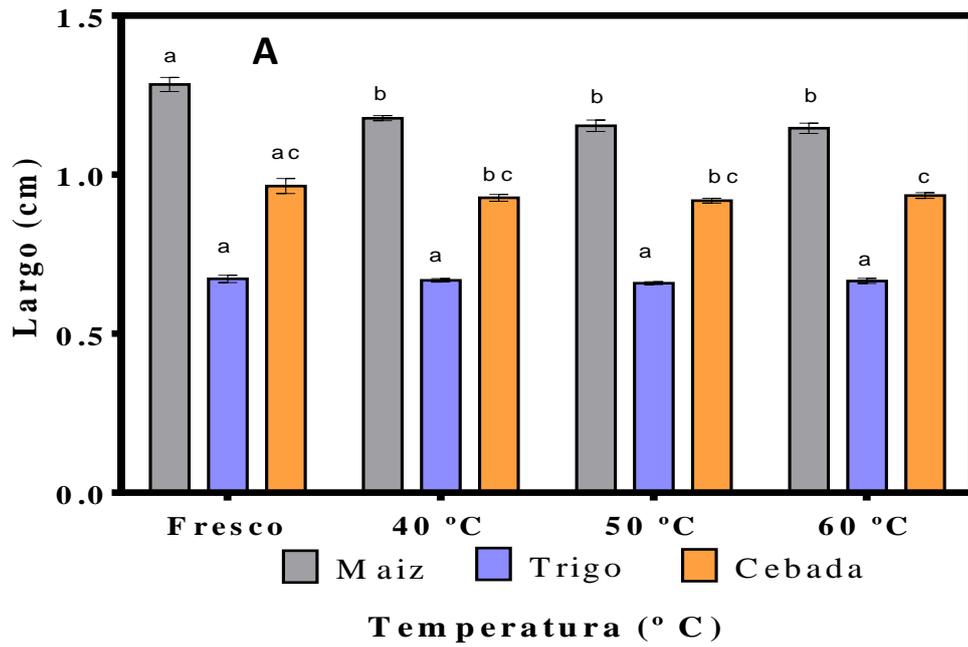


Figura 12. Efecto de la temperatura sobre el tamaño: largo (A) y ancho (B) del grano. Diferentes letras (a, b, c) indican diferencias significativas en la misma muestra a diferentes temperaturas.

Masa de 1000 granos

En la Figura 13 se puede observar una clara disminución de la masa de los granos con respecto a la temperatura de secado. No existieron diferencias significativas debidas al secado. Sin embargo si existió diferencia significativa para el caso del maíz cuando se comparó la muestra fresca y las muestras después del secado. Según Ponzio (2010) la masa de 1000 granos depende de la variedad de cada cereal ya que el porcentaje del endosperma es mayor en los granos con gran masa. Además, la masa de 1000 granos tiende a disminuir conforme exista cambios de temperatura (Degiovanni, Martínez, & Motta, 2010).

Algunas investigaciones han generado reducción en los valores de la masa de 1000 granos como en el caso del maíz blanco que pasó de 308 g a 305 g a 60 °C, el trigo de 38,39 g a 32,57 g en condiciones de almacenamiento controladas con temperaturas de 0 °C a 30 °C y humedades relativas de 60% a 72%; y para la cebada de 32,8 g a 30,2 g en un estudio donde la temperatura incrementaba en intervalos de 20 °C a 60 °C (García, Serrago, Dreccer, & Miralles, 2016; Kibar, 2015; García-Jimenez & Vázquez, 2016). En la presente investigación, el secado tuvo un efecto considerable únicamente para el maíz.

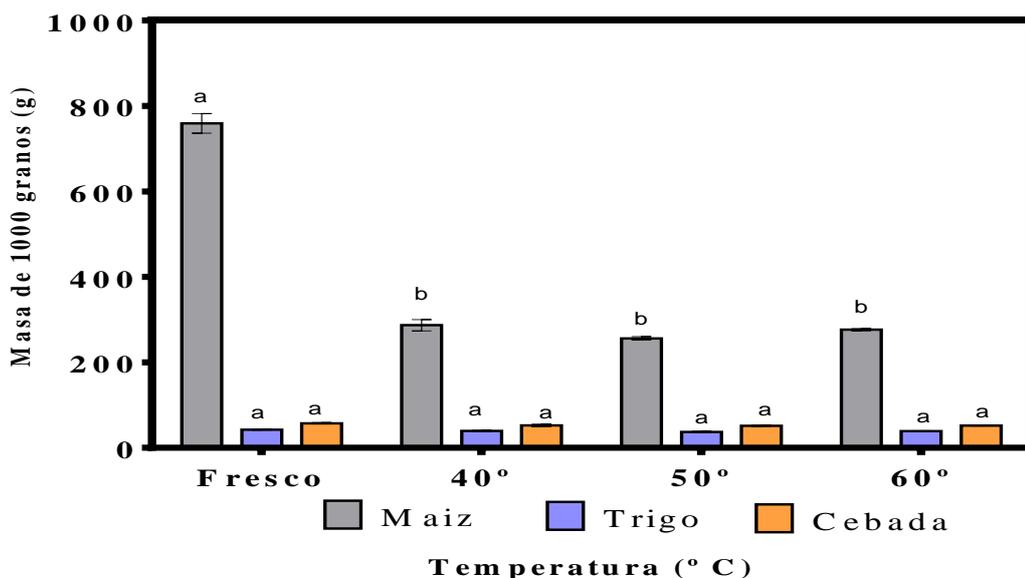


Figura 13. Efecto de la temperatura de secado sobre la masa de 1000 granos.

Contenido de proteína

En la Figura 14 se puede observar el efecto de la temperatura de secado sobre el contenido de proteína del grano. Respecto a la muestra fresca, se produjo una ligera reducción en el contenido de proteína de cada cereal. Los granos mostraron un contenido proteico inicial muy diferente entre sí. Al igual que en el peso específico no se obtuvo el valor para el maíz en estado fresco porque su contenido de humedad fue mayor que 20%. Runyon, Sunilkumar, Nilsson, y Rascon (2015) afirmaron que la reducción en el contenido de proteína está relacionada con la disminución de la solubilidad del mismo producto de su desnaturalización cuando se aplican altas temperaturas. Sin embargo Soares et al (2016) mencionaron que las temperaturas altas provocan tiempos de secado cortos por tanto los granos van a conservar mucho más el contenido de proteína, esto explicaría los resultados obtenidos en la presente investigación. Además, a 50 °C el contenido proteico fue relativamente más bajo en comparación a la temperatura de 60 °C donde se obtuvo contenidos más altos debido a que los tiempos de exposición fueron menores. Los valores de los contenidos de proteína en estado fresco obtenidos han sido similares en comparación con otros autores donde el maíz presentó valores entre 8% - 11 %, el trigo entre 8% - 10 % y en la cebada entre 9,8 % - 11 % (Magliano, Prystupa, & Gutiérrez, 2014; Odjo, Malumba, & Beckers, 2015; Caporaso, Whitworth, & Fisk, 2018).

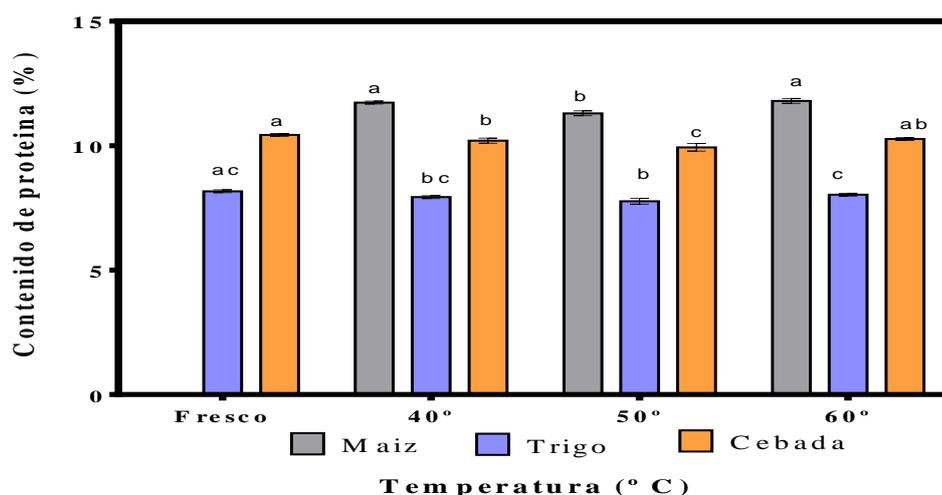


Figura 14. Efecto de la temperatura de secado sobre el contenido de proteína de los granos.

Actividad de agua

En la Figura 15 se muestran los resultados finales de actividad de agua (a_w). Se puede apreciar que la misma disminuyó considerablemente respecto al material fresco ($P < 0,05$). El efecto de la temperatura sobre la actividad de agua fue mayor en el trigo. En el maíz y la cebada se observaron diferencias significativas a los 40 °C. Como se esperaba, a 60 °C se obtuvieron los valores de a_w más bajos. De acuerdo con Nielsen (2010) cuando se aplicó calor en forma de energía se produjo un aumento en la presión de vapor de agua del alimento a tal nivel que el agua de la superficie se va evaporando, mientras el proceso continúa el agua del interior migra a través de procesos de difusión hasta que la presión de vapor del alimento sea igual a la de la atmósfera llegando al punto de equilibrio. Los resultados presentados a cada temperatura estuvieron dentro de los valores que aportan seguridad dentro del almacenamiento frente al ataque de microorganismos como *Salmonella* que se desarrolla con a_w de 0.92 y *Aspergillus flavus* que produce toxinas a 0.83 a_w (Equinlab, sin fecha).

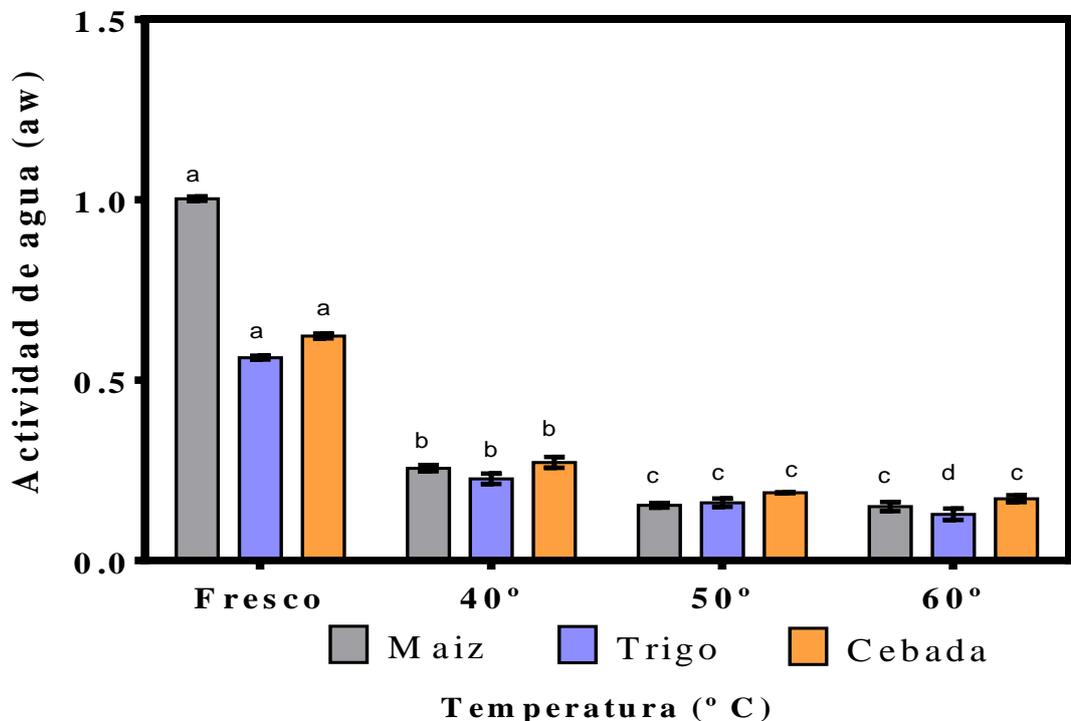


Figura 15. Efecto de la temperatura de secado sobre la actividad de agua (a_w)

4.1.3 Modelos de secado

En las Figuras 16, 17 y 18 se muestran los valores del logaritmo natural de la relación de humedad adimensional (MR) en función del tiempo obtenidos mediante la ecuación 9. A partir de estas figuras se obtuvo, por regresión lineal, las pendientes y los coeficientes de correlación (R^2) para cada cereal a cada temperatura. Se observó que los coeficientes de correlación obtenidos variaron para cada temperatura y para cada cereal respectivamente. Los valores más bajos de R^2 fueron para el maíz (Figura 16 C) y el trigo (Figura 17 C) a 40 °C con valores de R^2 de 0,9104 y 0,9743 respectivamente. Estos resultados aunque fueron los más bajos en comparación con la cebada, el modelo de Crank consiguió describirse de mejor manera ya que el R^2 fue mayor al 85% por consiguiente muestran un buen modelado en los datos experimentales (Gálvez, Aravena, & Mondaca, 2006).

Para el caso del trigo a 60 °C (Figura 17A) con R^2 de 0,9915, y a 50 °C (Figura 17B) con R^2 0,9881 el modelado fue bueno. En la cebada a 40 °C (Figura 18 C) se obtuvo un R^2 de 0,985, lo que indicó que el 99% de los datos se adaptan al modelo de Crank. De acuerdo con Ochoa-Martínez & Ayala (2009) el modelo de Crank fue desarrollado a partir de la segunda ley de Fick y ha sido el más empleado por muchos investigadores como un modelo fenomenológico para la representación de la difusividad del agua.

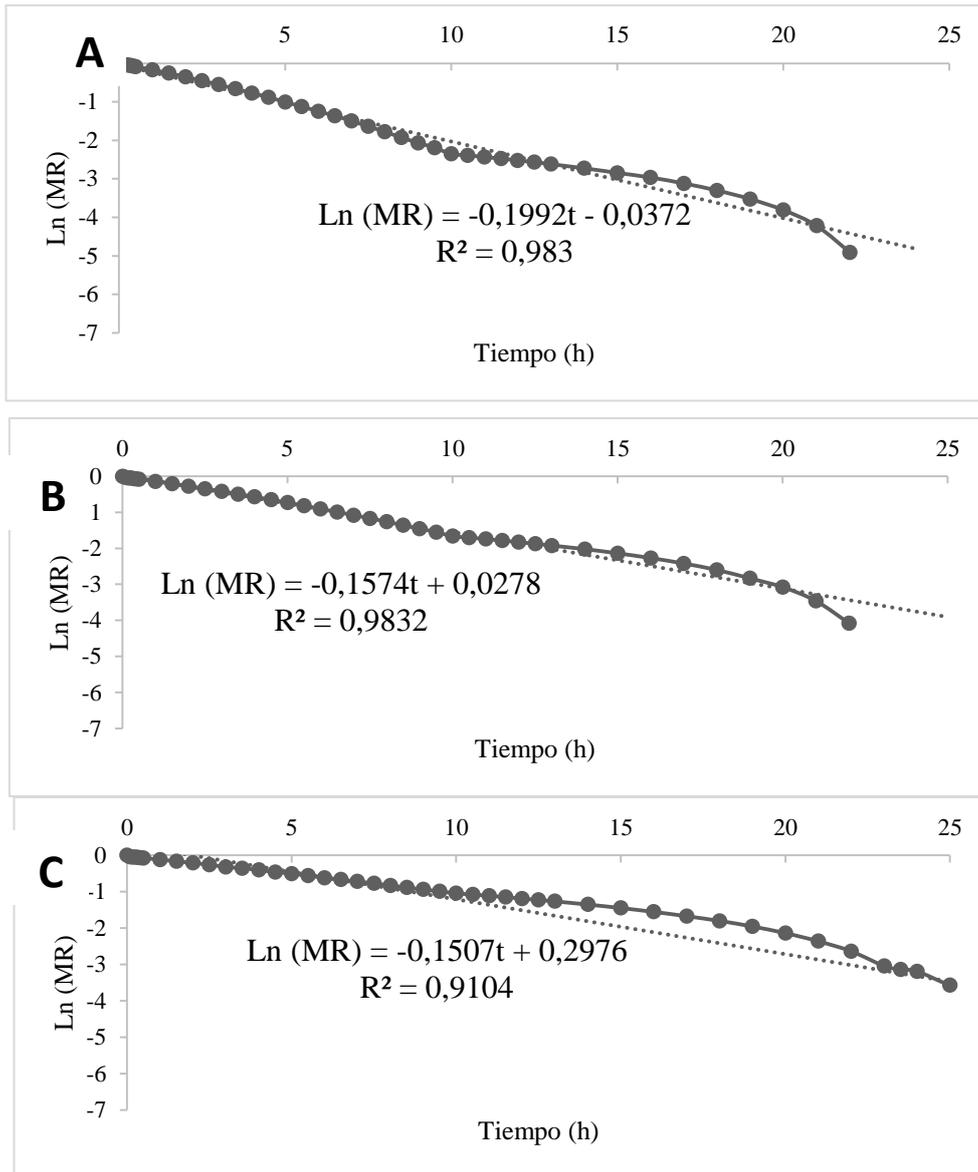


Figura 16. Representación de los datos experimentales de humedad del maíz al modelo de Crank durante el secado a 60 °C (A), 50 °C (B) y 40 °C (C).

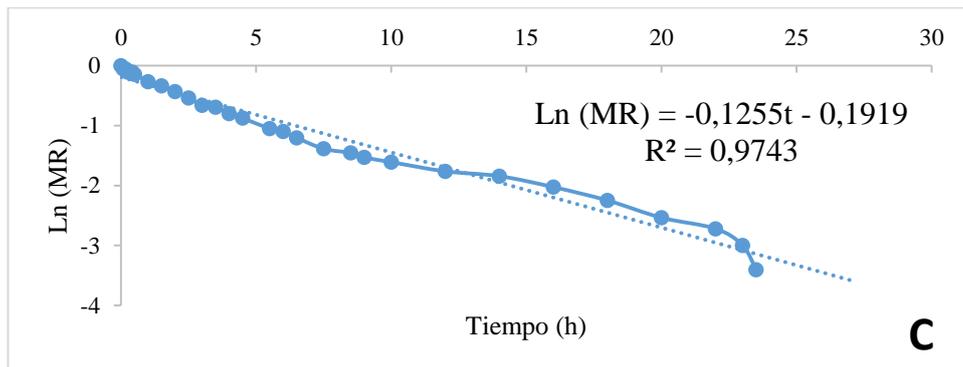
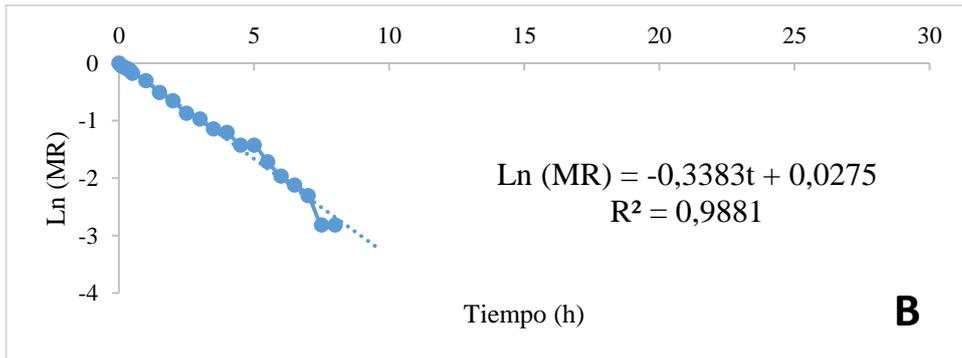
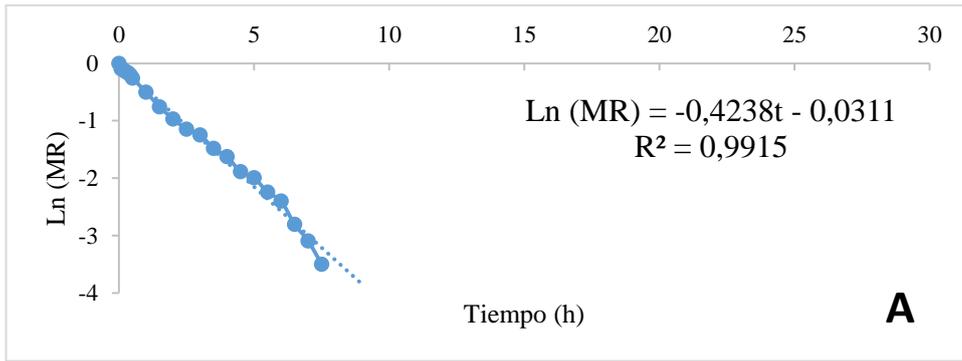


Figura 17. Representación de los datos experimentales de humedad del trigo al modelo de Crank durante el secado a 60 °C (A), 50 °C (B) y 40 °C (C).

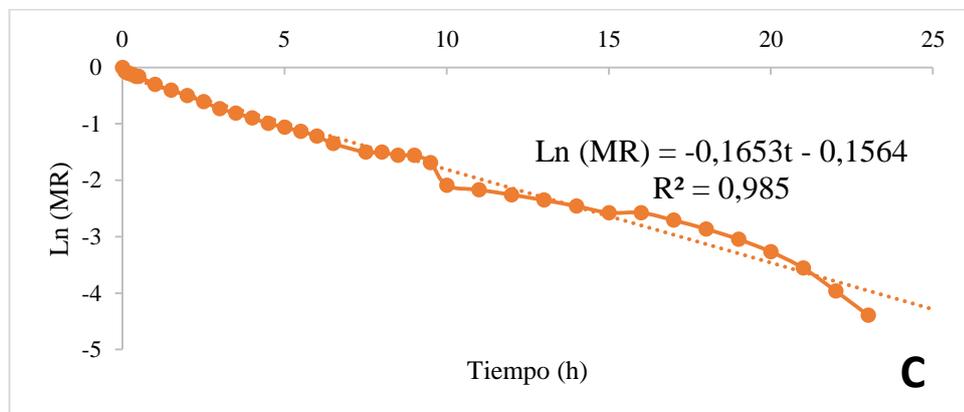
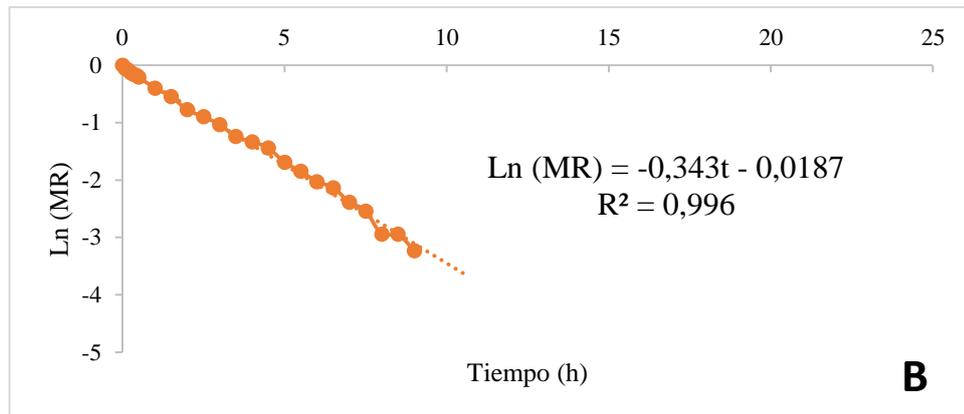
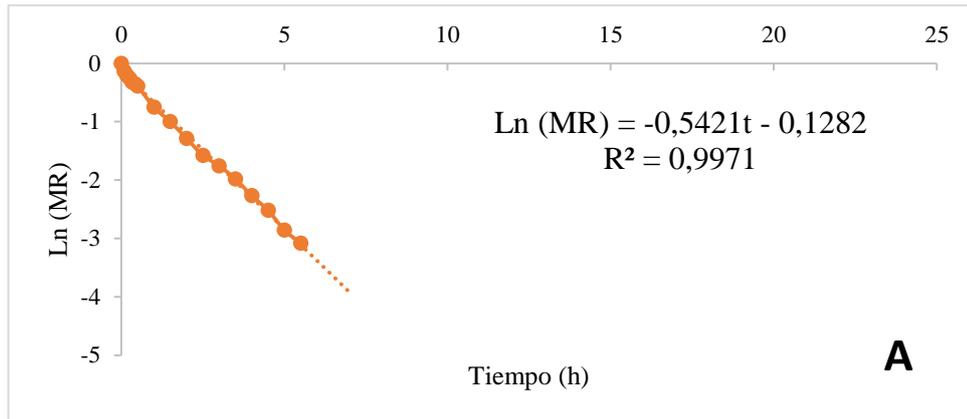


Figura 18. Representación de los datos experimentales de humedad de la cebada al modelo de Crank durante el secado a 60 °C (A), 50 °C (B) y 40 °C (C).

Difusividad efectiva de agua (D_{eff})

En la Figura 19 se muestran los valores del coeficiente de difusividad efectiva de agua (D_{eff}) para cada cereal en función de la temperatura. Estos fueron obtenidos mediante los valores de la pendiente de cada una de las rectas con la ecuación 9. Se obtuvieron valores de entre $1,39 \times 10^{-10}$ a $1,83 \times 10^{-10}$ m^2/s para el maíz, $2,32 \times 10^{-11}$ a $7,84 \times 10^{-11}$ m^2/s para el trigo y $4,30 \times 10^{-11}$ a $1,41 \times 10^{-10}$ m^2/s para la cebada. Los resultados fueron similares a los encontrados por Paquita (2015), donde los coeficientes de difusividad varían desde 10^{-12} a 10^{-8} m^2/s . En la Tabla 1 se pudo observar que en estudios anteriores han obtenido valores de D_{eff} que han variado en un 7,11% para el maíz para los valores más altos y un 2,52% para el trigo en los valores más bajos con respecto a los obtenidos experimentalmente, sin embargo en la cebada se obtuvo valores relativamente bajos en comparación con los bibliográficos porque la temperatura más alta que utilizan en su proceso de secado fue 80 °C.

En todas las figuras se observó linealidad con pendientes positivas, lo cual permite inferir que cuanto mayor es la temperatura mayor es el coeficiente de difusividad (D_{eff}), esto se debe a que el aumento de la temperatura favorece la velocidad de secado y provoca que la transferencia de masa desde el interior hasta la superficie del material se incremente y por lo tanto la difusividad efectiva será mayor (Giraldo-Zuñiga et al., 2010).

Tabla N1. Coeficientes de Difusividad Efectiva (D_{eff})

| D_{eff} obtenidos por el modelo de Crank | | |
|--|--|---|
| Cereal | Valores Experimentales (m^2/s) | Valores Bibliográficos (m^2/s) |
| Maíz | $1,39 \times 10^{-10}$ a $1,83 \times 10^{-10}$ | $0,8 \times 10^{-10}$ a $1,7 \times 10^{-10}$ (Pumacahua-Ramos & Limaylla, 2011) |
| Trigo | $2,32 \times 10^{-11}$ a $7,84 \times 10^{-11}$ | $2,38 \times 10^{-11}$ a $5,84 \times 10^{-11}$ (Yildirim, 2018) |
| Cebada | $4,30 \times 10^{-11}$ a $1,41 \times 10^{-10}$ | $4,55 \times 10^{-8}$ a $5,43 \times 10^{-8}$ m^2/s (Soares et al., 2016) |

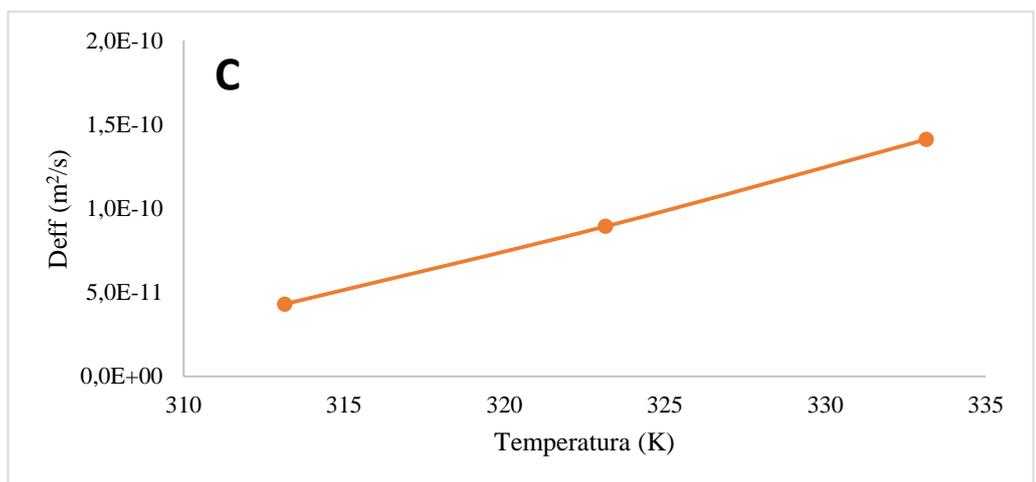
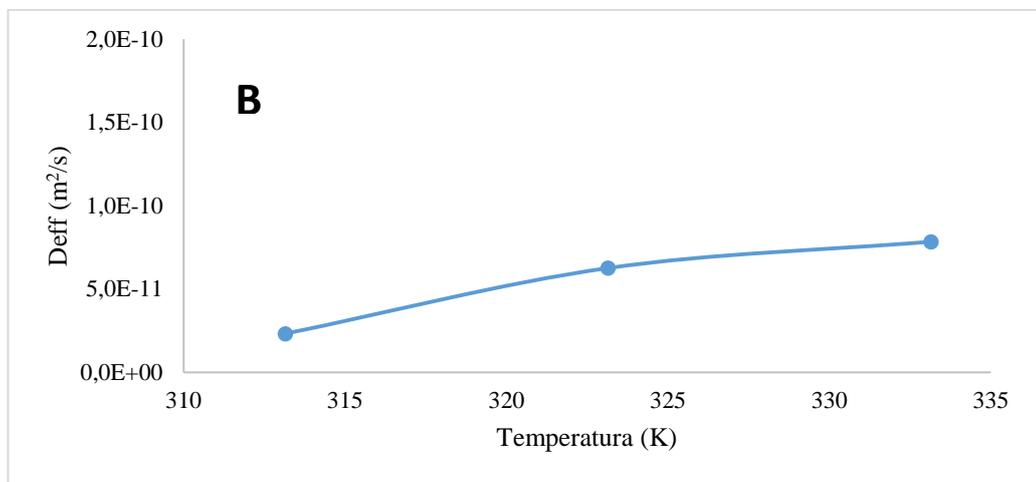
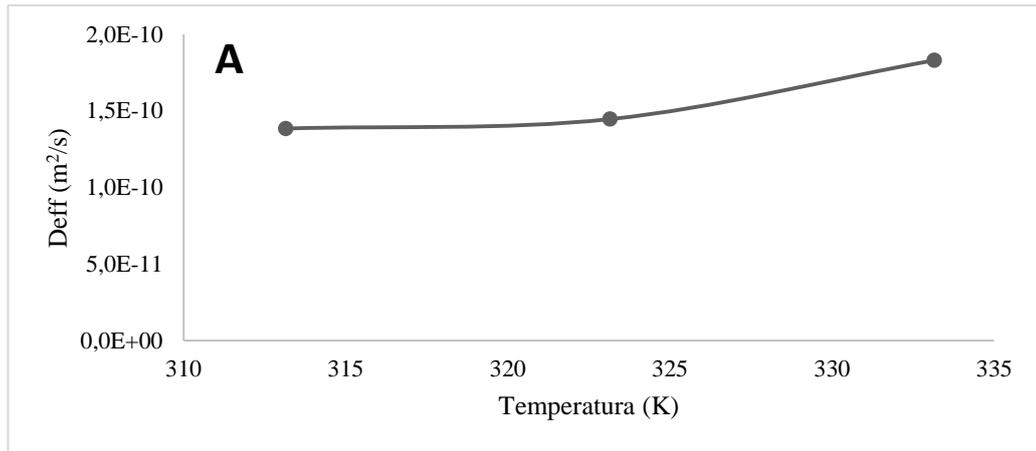


Figura 19. Coeficiente de difusividad efectiva (Deff) en función de la temperatura para maíz (A), trigo (B) y cebada (C).

Energía de Activación

La energía de activación (E_a) es la energía que se requiere para diseñar un proceso de secado ideal y junto con el cálculo de D_{eff} , permite modelar el proceso de transferencia de masa durante el almacenado. La E_a se calculó a partir de la linealización de la ecuación de Arrhenius (ecuación 10) las que están representadas en la figuras 20A, 20B y 20C. A partir de las pendientes de cada recta se obtuvieron los valores de las energías de activación para cada cereal, donde presentaron ligeras variaciones entre sí. Los valores del coeficiente de correlación (R^2) (0,8512 para el maíz, 0,8945 para el trigo y 0,9871 para la cebada) mostraron la dependencia del D_{eff} con la temperatura. De acuerdo con Paquita (2015), valores altos de E_a indican baja sensibilidad del coeficiente de difusión con respecto a la temperatura, por lo tanto la cebada y el trigo presentó una menor sensibilidad en comparación con el maíz que tiene una E_a mucho menor. En la Tabla 2 observó que se produjo una variación en un 32,43% para el maíz en comparación con el dato bibliográfico debido a que utilizó temperaturas entre 30 °C y 90 °C para su proceso de secado, en el trigo se produjo una variación de 21,93 % donde usó temperaturas de secado entre 50 °C a 70 °C y en la cebada se produjo un 32,19% de variación porque usaron temperaturas entre 33 °C a 56 °C para el secado por lecho de chorro espumoso.

Tabla N2. Energías de Activación (E_a)

| E_a obtenidas por el modelo de Crank | | |
|--|--|--|
| Cereal | Valores Experimentales (KJ/mol) | Valores Bibliográficos (KJ/mol) |
| Maíz | 12,010 | 17,774 (Ordoñez et al., 2012) |
| Trigo | 53,103 | 41,46 (Yildirim, 2018) |
| Cebada | 51,613 | 35 (Markowski et al., 2010) |

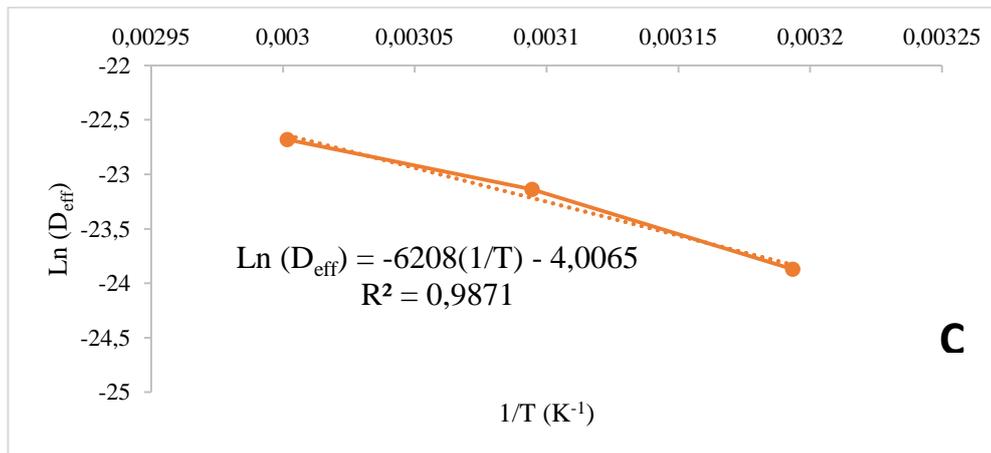
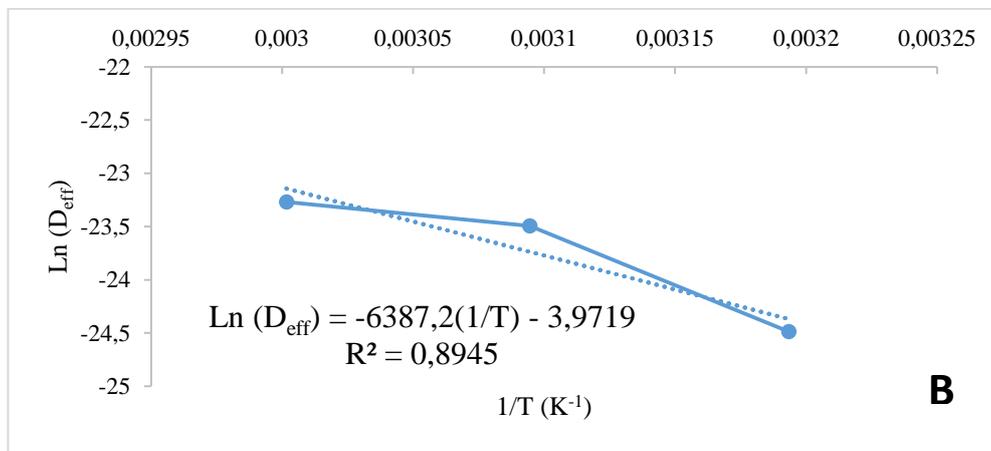
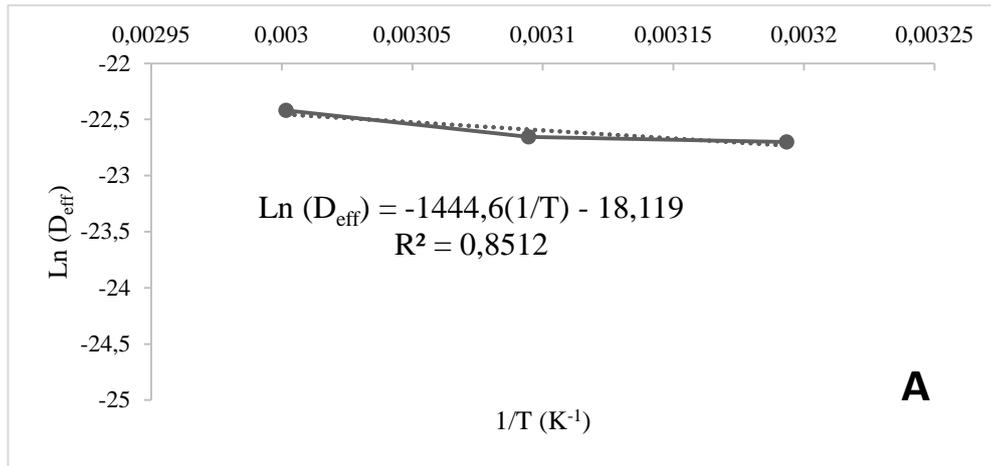


Figura 20. $\ln D_{\text{eff}}$ vs $1/T$ para maíz (A), trigo (B) y cebada (C) durante el secado a 40, 50 y 60 °C.

Modelo de Omoto

En las Figuras 21, 22 y 23 se puede observar la representación del logaritmo natural de los valores de la concentración de agua adimensional (θ) de maíz, trigo y cebada respectivamente en función del tiempo de secado, los que se obtuvieron con la aplicación de la ecuación 14. Los coeficientes de correlación (R^2) obtenidos para todos los cereales fueron similares a los obtenidos por el modelo de Crank a cada temperatura de secado, con lo cual se puede asumir que los datos experimentales obtenidos pueden ser representados por ambos modelos matemáticos. Los valores fueron similares a los obtenidos por Soares et al (2016) donde con la cebada obtuvo coeficientes de correlación entre 0,936 a 0,959 con buen ajuste al modelo de Omoto (Carvalho & Jorge, 2018).

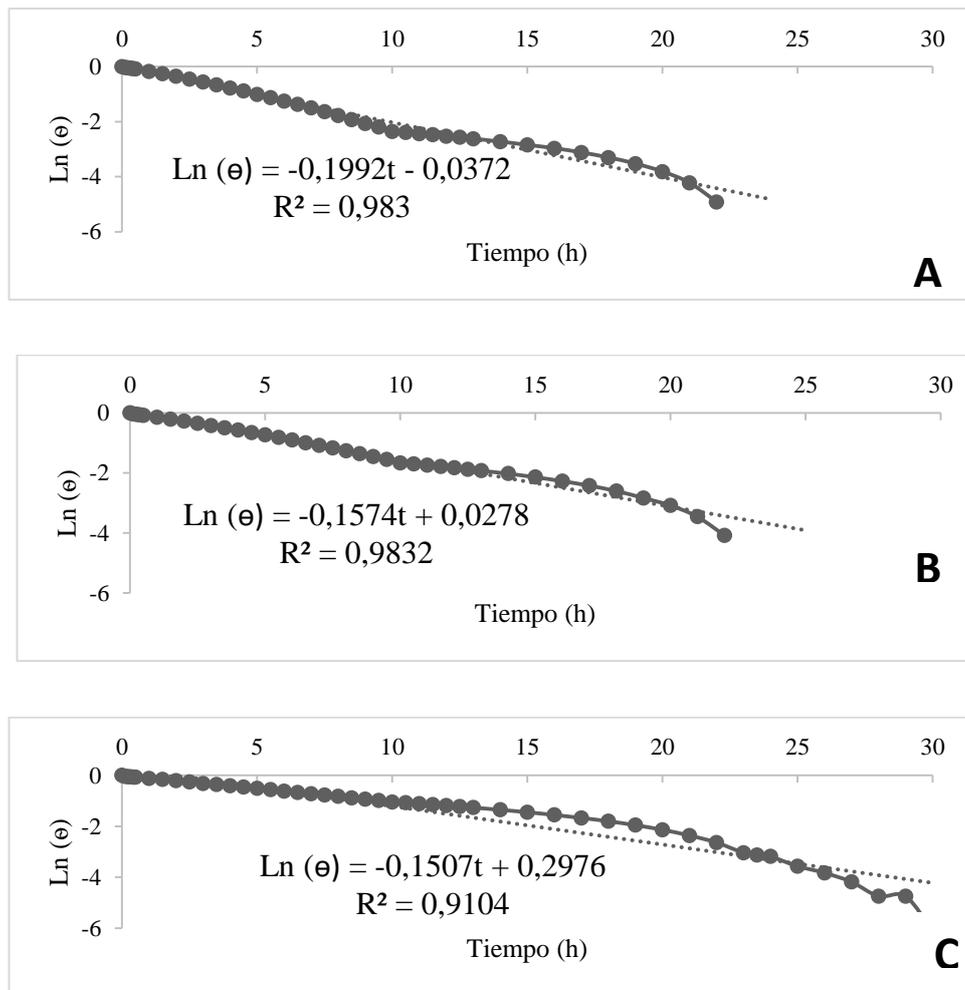


Figura 21. Representación de los datos experimentales de humedad del maíz al modelo de Omoto durante el secado a 60 °C (A), 50 °C (B) y 40 °C (C).

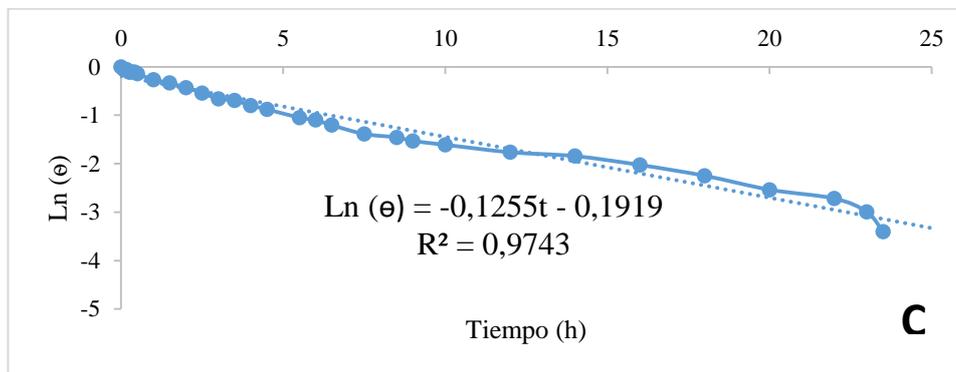
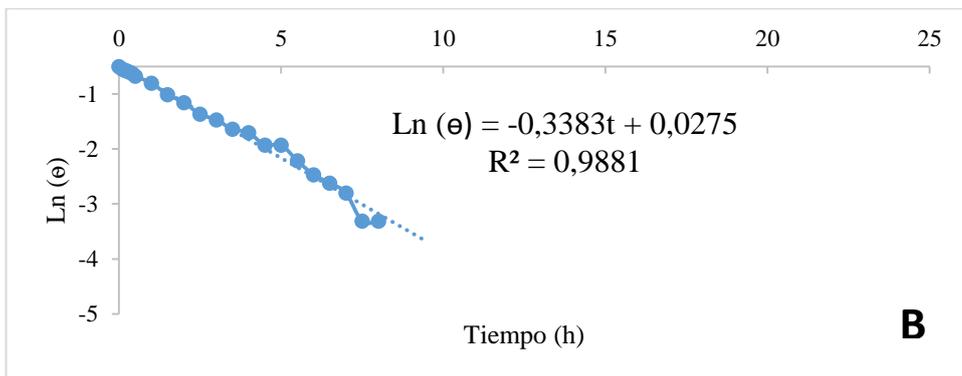
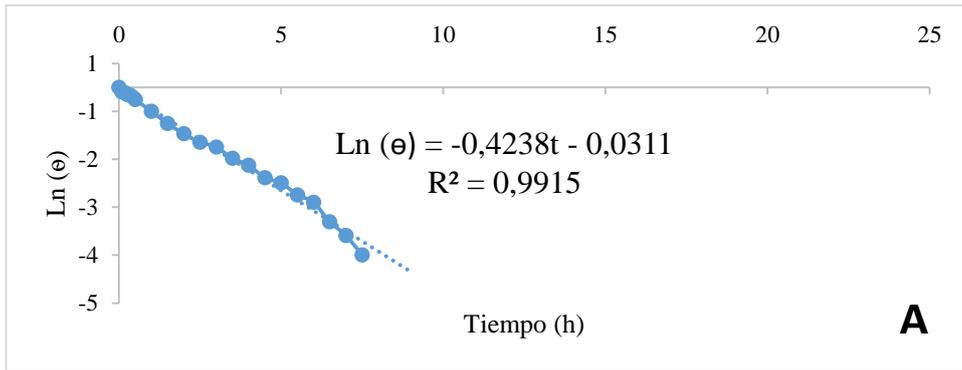


Figura 22. Representación de los datos experimentales de humedad del trigo al modelo de Omoto durante el secado a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (A), $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (B) y $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (C).

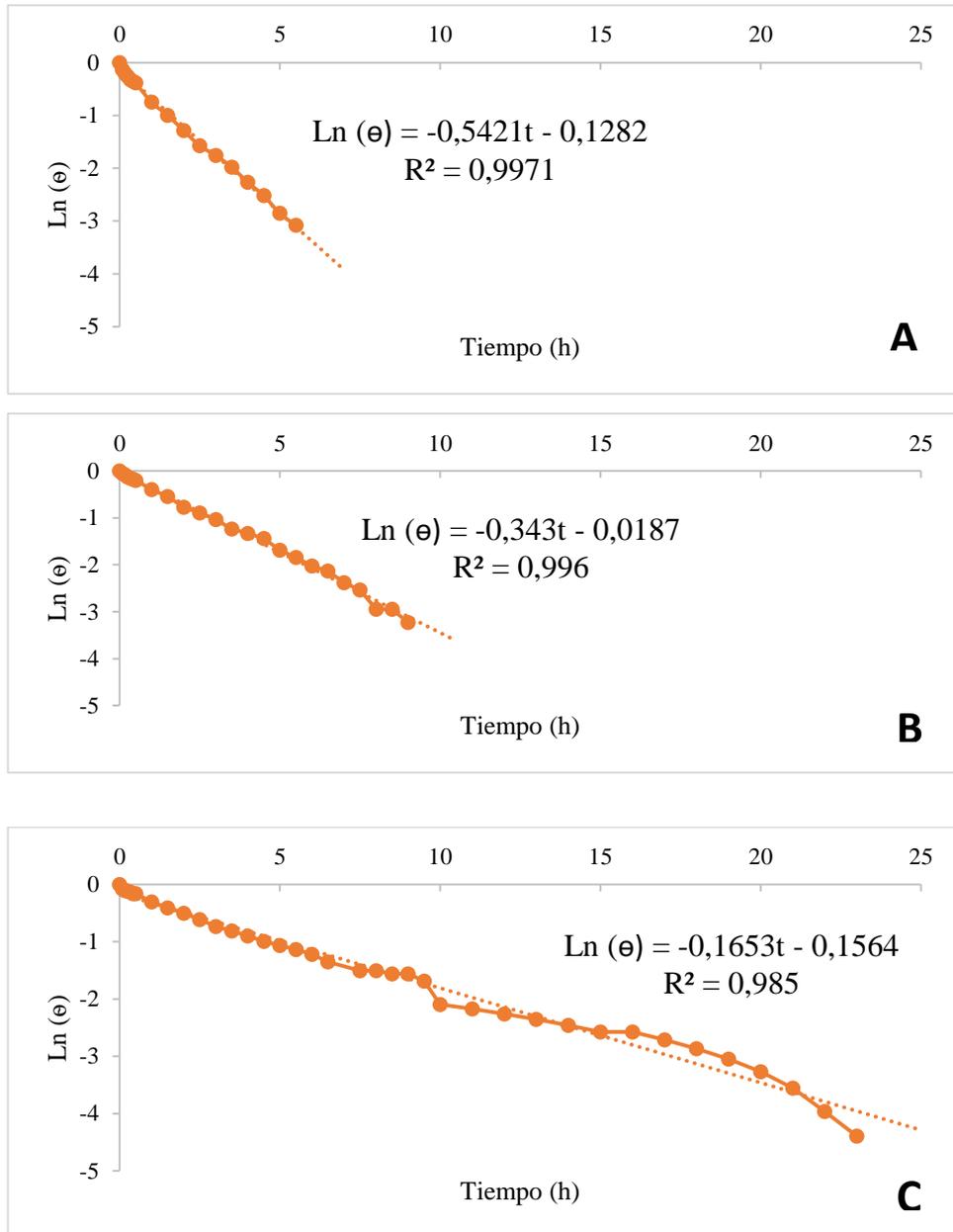


Figura 23. Representación de los datos experimentales de humedad de la cebada al modelo de Omoto durante el secado a 60 °C (A), 50 °C (B) y 40 °C (C).

Coefficiente de difusividad (K_s)

En la Figura 24 se muestran los coeficientes de difusividad (K_s) calculados a partir de la ecuación 14 propuesta por el modelo de Omoto en función de la temperatura. En cada figura se observó que a medida que la temperatura aumenta, también lo hace el coeficiente de difusividad, esto se debe a que las altas temperaturas provocan un incremento en la desorción del agua desde el interior del grano como fue explicado anteriormente en el modelo de Crank. Los valores de K_s obtenidos para cada cereal fueron de $2,87 \times 10^{-4}$ a $3,8 \times 10^{-4}$ m/h en maíz, $1,05 \times 10^{-4}$ a $3,62 \times 10^{-4}$ m/h en trigo y $1,68 \times 10^{-4}$ a $5,5 \times 10^{-4}$ m/h en la cebada. Estos valores fueron similares a los obtenidos por Soares et al (2016) que presentaron valores entre $1,07 \times 10^{-4}$ a $2,05 \times 10^{-4}$ m/h para la cebada a temperaturas de 40 °C, 60°C y 80 °C, además, en el estudio realizado por Omoto et al (2009) que trabajaron con hidratación de guisantes los valores de K_s obtenidos fueron de $6,02 \times 10^{-4}$ a $2,56 \times 10^{-3}$ m/h a un intervalo de temperaturas de 20 °C a 60 °C.

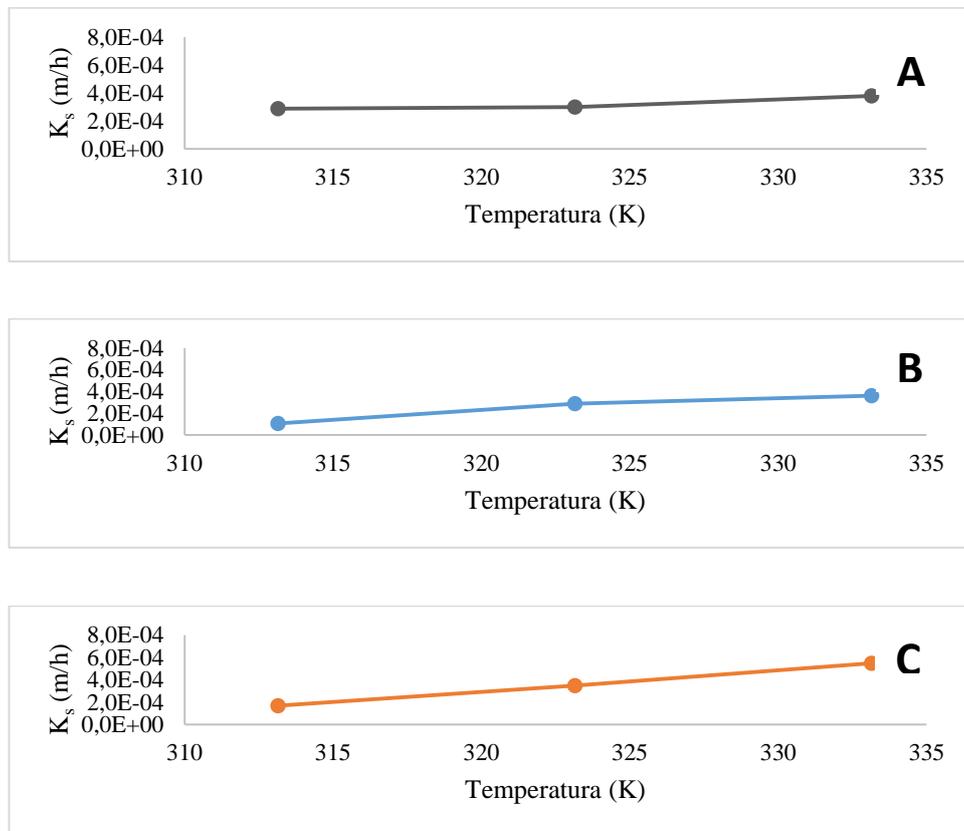


Figura 24. Coeficiente de difusividad (K_s) vs temperatura para el maíz (A), trigo (B) y cebada (C) durante el secado a 60 °C, 50 °C y 40 °C.

Energía de activación (E)

Al igual que en el modelo de Crank, para la obtención del valor de la energía de activación se realizó una linealización del modelo propuesto por Omoto (ecuación 15), similar a la ecuación de Arrhenius, donde se puede observar en las figuras 25A, 25B y 25C. Los valores obtenidos de acuerdo al modelo matemático descrito resultaron ser las pendientes de cada recta con signo positivo. Los resultados fueron de $1444,6 \text{ K}^{-1}$ para el maíz, $6514,7 \text{ K}^{-1}$ para el trigo y 6208 K^{-1} para la cebada. Como se indicó en el modelo de Crank, la energía de activación puede presentar variaciones de acuerdo a las propiedades del material a secar y de los métodos usado para provocar su deshidratación; por lo tanto otros autores han presentado valores diferentes a los obtenidos como Fracasso et al (2015) que trabajaron con la hidratación de la soya y obtuvieron un valor de $2289,3 \text{ K}^{-1}$ y Omoto et al (2009) con 3521 K^{-1} para los guisantes. Es importante recalcar que no se han documentado valores de E utilizando el modelo de Omoto para trigo, maíz y cebada.

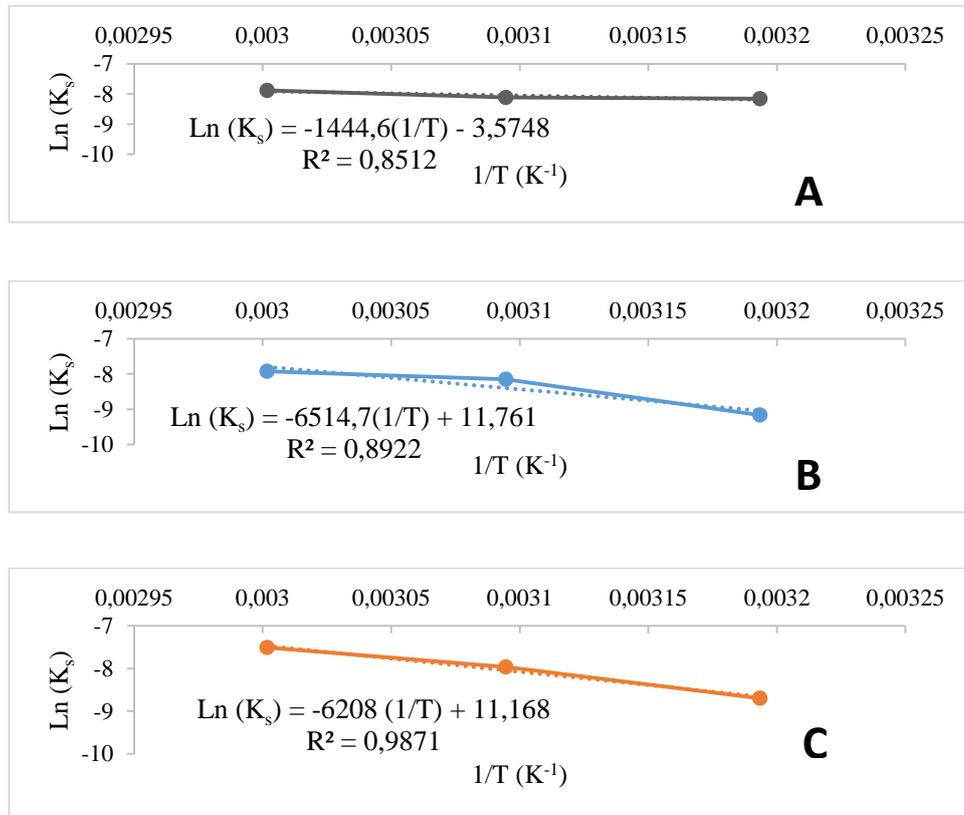


Figura 25. $\text{Ln } K_s$ de cada cereal con respecto a $1/T$ a cada temperatura de secado (60, 50 y 40 °C) para maíz (A), trigo (B) y cebada (C).

Modelo B.E.T

En la Figura 26 se muestra las isotermas de desorción de agua en maíz (A), trigo (B) y cebada (C) a la temperatura de 60 °C, obtenidas a través de los valores del contenido de humedad en base seca (% b.s) en función de la actividad de agua (a_w). De acuerdo con Ramírez-Miranda, Cruz, Vizcarra, & Anaya (2014), las isotermas muestran un comportamiento tipo II de forma sigmoidea predominante en los modelos para alimentos que, además, representa eficientemente al modelo BET. Tanto para el trigo como la cebada, se obtuvieron valores inferiores de a_w ($\sim 0,55$). Las isotermas se representan mejor a contenidos de humedad bajos. Por el contrario, en el maíz al contener una humedad inicial mucho mayor, el comportamiento de las isotermas se torna dificultoso en el ajuste al modelo BET. En todos los casos el contenido de humedad y la actividad de agua disminuyen por efecto del secado (Ayala-Aponte, Serna, & Rodríguez, 2012). La representación de los datos experimentales al modelo BET se puede observar en la Figura 27 con coeficiente de correlación para el trigo y en la cebada de 0,9786 y 0,9685 respectivamente. De acuerdo con Ramírez et al (2014), este modelo solo se aplica para valores de a_w entre 0 a 0.55, esto explica porque se obtuvo una correlación menor en el maíz. El valor de M_0 , que representa el contenido de humedad en la monocapa, para el trigo fue de 5,36 y 5,72 en la cebada, la constante C , característica del material y relacionada con el calor desprendido en el proceso de desorción, fue de 20,06 y 14,79 respectivamente. Estos resultados fueron similares a los obtenidos por Montes et al (2009) con 6,397 en el secado de ñame y una C de 6,892 a obtenido a través de isotermas de desorción a 70 °C. Sin embargo no se ha encontrado resultados sobre desorción para estos granos utilizando el modelo BET.

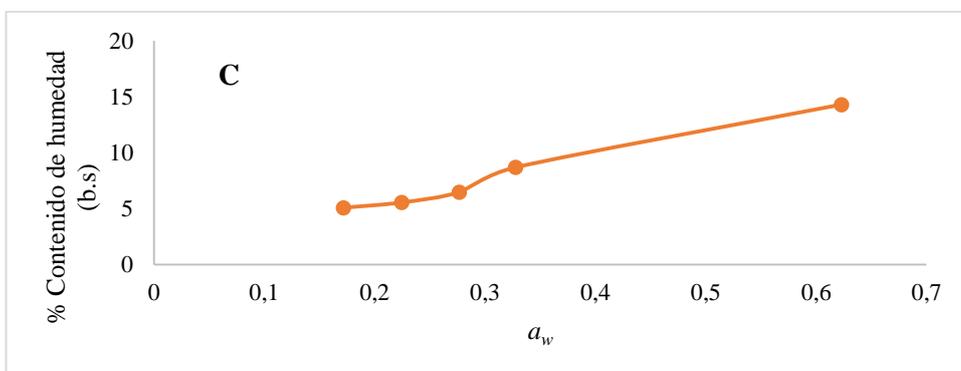
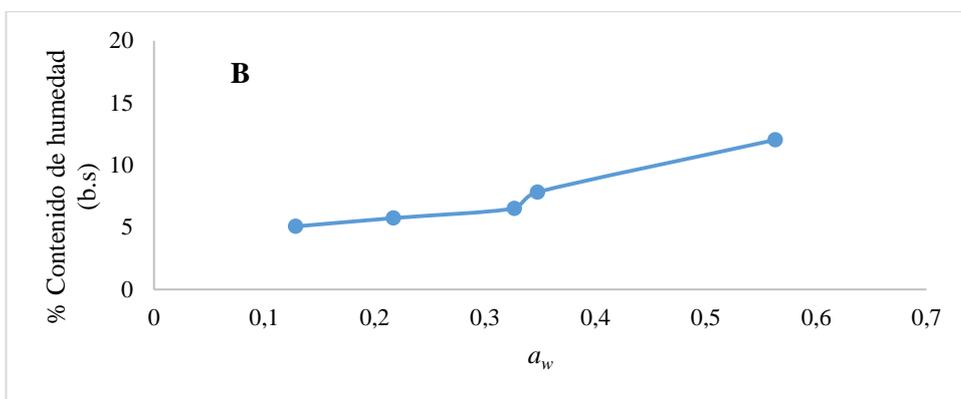
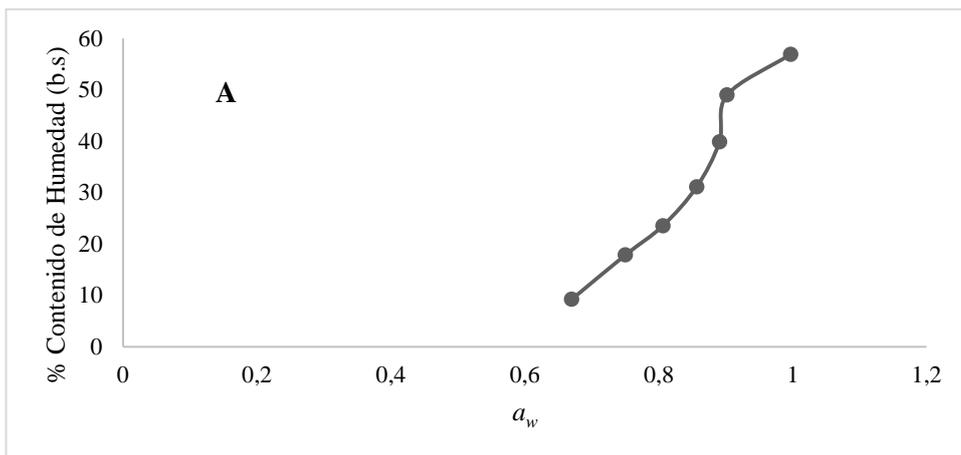


Figura 26. Isothermas de desorción de agua de maíz (A), trigo (B) y cebada (C) a 60 °C.

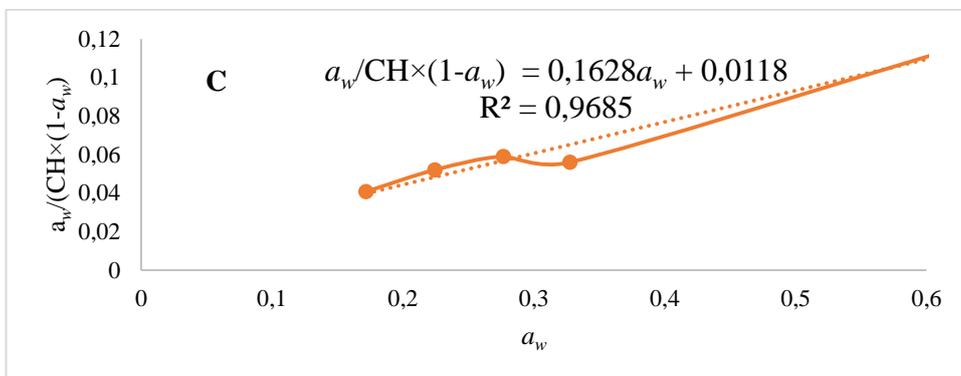
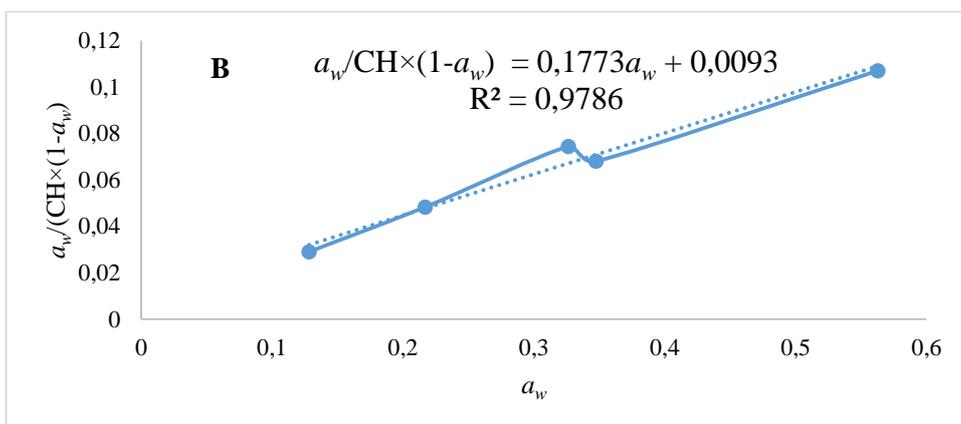
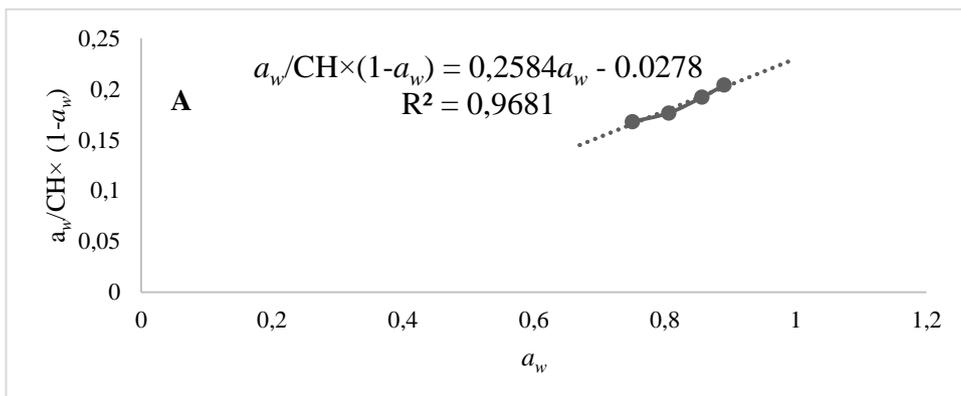


Figura 27. Representación de los datos experimentales al modelo BET durante el secado a 60 °C de maíz (A), trigo 50 °C (B) y cebada 40 °C (C).

4.2 Verificación de hipótesis

Con base a los resultados obtenidos se acepta la hipótesis alternativa ya que al desarrollar las curvas de fracción de agua removida (Kg H₂O/Kg s.s) por unidad de tiempo a una temperatura y humedad relativa de aire si permitió determinar la cinética de secado en cereales.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El desarrollo de la cinética de secado de cereales permitió la obtención de curvas de secado a 60 °C, 50 °C y 40 °C, donde se pudo apreciar que la temperatura de 60 °C alcanzó con mayor rapidez su humedad en equilibrio en comparación con las temperaturas de 50 °C y 40 °C, porque mientras mayor energía calórica se aplicó en el proceso de secado se logró una mayor remoción de agua, producto del incremento de la movilidad de las moléculas de agua dentro de los granos para su salida mediante difusión.

Los modelos matemáticos de Crank y Omoto fueron utilizados para describir el comportamiento del secado de maíz, trigo y cebada, donde se pudo representar adecuadamente los datos experimentales a cada temperatura porque se obtuvieron coeficientes de correlación (R^2) entre 0,91 y 0,99 para ambos modelos. En cambio el modelo BET representó eficientemente solo para los datos del trigo y de la cebada porque sus contenidos de humedad iniciales presentaron bajos valores de actividad de agua (a_w), con valores de R^2 de 0,9786 y 0,9685 respectivamente.

Se identificó el efecto que produjo la temperatura en las propiedades fisicoquímicas de los cereales, donde se observaron diferencias significativas ($P < 0,05$) en el contenido de humedad, peso específico, contenido de proteína y actividad de agua, tanto en los granos en estado fresco como en estado seco; siendo la temperatura de 50 °C la más influyente porque presentó los valores más bajos en cada una de las propiedades mencionadas.

Las condiciones idóneas que pueden ser usadas como referencia para establecer un almacenamiento seguro y que minimizan la pérdida de calidad de los granos fue la temperatura de 60 °C y una humedad relativa inferior a 6% con tiempos de exposición de 24,5 horas para el maíz, 9 horas para el trigo y 7 horas para la cebada porque se obtuvieron los valores más bajos en actividad de agua (a_w) y el contenido proteico se conservó mucho mejor al estar expuestos a tiempos de secado relativamente cortos.

5.2 Recomendaciones

Utilizar un secador con una balanza incorporada que brinde los valores de pérdida de peso de forma directa porque al abrir la compuerta se produce pérdidas de temperatura en el proceso y se gana humedad ambiental.

Complementar el desarrollo de la cinética de secado con valores de actividad de agua en función del contenido de humedad en cada intervalo de tiempo establecido en el proceso con las temperaturas restantes.

BIBLIOGRAFIA

- Abadía, B., & Bartosik, R. (2013). *Manual de buenas prácticas en postcosecha de granos*. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Ajala, A., Tunde-Akintunde, & T. (2012). Study on Drying Kinetics of Fermented Corn Grains. *Food Science and Quality Management*, 10-18.
- Alvarado, J. (1996). *Principios de ingeniería aplicado a los alimentos*. Ambato: Universidad Técnica de Ambato.
- Ayala-Aponte, A., Serna, L., & Rodríguez, G. (2012). Isotermas de desorción de humedad en pitahaya amarilla (*Selenicereus megalanthus*). *Bioteología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 135-143.
- Barnola, P., Alarcón, P., & Maza, M. (21 de Agosto de 2017). *Botanical-Online*. Obtenido de El mundo de las plantas: <http://www.botanical-online.com/botanica2.htm>
- Blancas, M. (2007). Manejo de Granos en Almacenamiento, Causas de Deterioro y Prevención. *Archivo Latinoamericano de Produccion Animal. Volumen 15*, 180-184.
- Borah, A., Hazarika, K., & Khayer, S. (2015). Drying kinetics of whole and slice tumeric rhizomes (*curcuma longa* L.) in a solar conduction dryer. *Information Processing In Agriculture 2*, 85-92.
- Brennan, J. (1998). *Las operaciones de la ingeniería de los alimentos*. Acribia S.A.
- Brigid, M. (2004). Nutritional aspects of cereals. *British Nutrition Foundation*, 111-142.
- Brooker, D., Bakker, F., & Hall, C. (1993). *Drying and storage of grains and oilseeds*. USA: Springer US.
- Caporaso, N., Whitworth, M., & Fisk, I. (2018). Protein content prediction in single wheat kernels using hyperspectral imaging. *Food Chemistry*, 32-42.
- Caro-Greiffenstein. (1998). *Breves normas de control de calidad en granos almacenados*. Quito - Ecuador: MAG - FAO.
- Carvalho, T., & Jorge, L. (2018). Mathematical modeling of paddy (*Oryza sativa*) hydration in different thermal conditions assisted by Raman spectroscopy. *Journal of cereal science*, 390-398.
- Castro, M. (2016). *Rendimientos de Maíz Duro Seco en Verano 2016*. Quito: Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura, y Pesca.
- Cerrón, F. (2013). *EFFECTOS DE TEMPERATURA Y TIEMPO EN EL DESAMARGADO Y SECADO DE QUINUA (Chenopodium quinoa Willd)*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro de Perú.
- Condorhuamán, C., Armijo, J., & Reyna, L. (2004). Secado de granos cereales en lecho surtidor convencional. *Revista Peruana de Ingeniería Química*, 7-13.
- De Oliveira, V., Santos, R., Aparecido, H., Melegari, S., & Secco, D. (2016). Economic and financial analysis of the implementation of a water tube boiler in the process of grain drying using a column dryer. *African journal of agricultural research*, 100-104.

- Degiovanni, B., Martínez, C., & Motta, F. (2010). *Producción eco-eficiente de arroz en America Latina*. Cali: CIAT.
- Equinlab. (sin fecha). *La importancia de la aw - Actividad del agua*. Lavalle: NOVASINA.
- Espinoza, C., & Quispe, M. (2011). *Tecnología de Cereales y Leguminosas*. Lima.
- Fito, P., Andrés, A., & Barat, J. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
- Fracasso, A., Tobaldini, C., Jorge, L., & Jorge, R. (2015). Hydration kinetics of transgenic soybeans. *Acta Scientiarum*, 141-147.
- Gálvez, A., Aravena, E., & Mondaca, R. (2006). Isotermas de adsorción en harina de maíz (*Zea mays L.*). *Ciencia y Tecnología de Alimentos Campina*, 821-827.
- García, G., Serrago, R., Dreccer, M., & Miralles, D. (2016). Post-anthesis warm nights reduce grain weight in field-grown wheat and barley. *Field Crops Research*, 50-59.
- García, M. (2013). *Diseño de un secador de bandejas para el secado de maíz, quinua y amaranto en la hacienda San Jorge*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- García-Jimenez, A., & Vázquez, C. (2016). Secado de maíz propiedades del grano. *Investigación y desarrollo en ciencia y tecnología de alimentos*, 73-77.
- García-Lara, S., & Bergvinson, D. (2007). Programa integral para reducir pérdidas postcosecha en maíz. *Revista de Agricultura y Tecnología Mexicana*, 181-189.
- Garófalo, J., Ponce, L., & Abad, S. (2011). *Guía del cultivo de trigo*. Quito - Ecuador: INIAP.
- Gatica, S. (2015). *Cinética de secado convectivo de maqui (Aristotelia chilensis (Mol) Stuntz)*. Valdivia-Chile: Universidad Austral de Chile.
- Geankoplis, C. (2006). *Proceso de transporte y Operaciones Unitarias* (Tercera ed.). México: Continental S.A.
- Giraldo-Zuñiga, A., Arévalo, A., Silva, A., & Valdéz, J. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuacu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 179-182.
- Grolleaud, M. (2017). *Pérdidas postcosecha: un concepto mal definido o mal utilizado*. Obtenido de FAO: <http://www.fao.org/docrep/004/AC301S/ac301s00.htm#Índice>
- Haq, R., Kumar, P., & Prasad, K. (2016). Effect of microwave treatment on dehydration kinetics and moisture diffusivity of Asiatic Himalayan black carrot. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Science*, 1-8.
- Heldman, D., & Singh, P. (2009). *Introducción a la ingeniería de los alimentos*. Acribia S.A.
- Hugo, W., & Godiño, M. (2000). *Tecnología de almacenamiento de granos de trigo*. Montevideo: Unidad de Difusión e Información Tecnológica de INIA.
- INCAP/OPS. (2005). Cereales y sus productos. *Contenidos Actualizados de Nutrición y Alimentación*, 15.
- Kibar, H. (2015). Influence of storage conditions on the quality properties of wheat varieties. *Journal of Stored Products Research*, 8-15.

- Larrosa, V., Lorenzo, G., & Zaritzky, N. (2016). Modelado matemático del secado de pastas libres de gluten en relación a la temperatura. *Revista del Laboratorio Tecnológico de Uruguay*, 54-58.
- Lema, A., Basantes, E., & Pantoja, J. (2017). Producción de cebada (*hordeum vulgare L.*) con urea normal y polimerizada en Pintag, Quito, Ecuador. *Agronomía Mesoamericana*, 97.
- Lule, F., & Koyuncu, T. (2015). Convective and microwave drying characteristics of sorbus fruits (*Sorbus domestica L.*). *Social and Behavioral Sciences*, 2634-2643.
- Magliano, P., Prystupa, P., & Gutiérrez, F. (2014). Contenido proteico en granos de distinto tamaño en cebada cervecera. *IHA 14*, 14-18.
- Maldonado, R., & Pacheco, E. (2003). Curvas de deshidratación del brócoli (*Brassica oleraceae L* var. *Italica* Plenck) y coliflor (*Brassica oleraceae L* var. *Botrytis L.*). *Revista de la Facultad de Agronomía*, 378-384.
- Manfreda, V., & Acosta, M. (2015). Variables de tamaño y forma de granos y embriones de trigo (*Triticum aestivum L.*): análisis y propuestas. *FCA UNCUYO*, 43-58.
- Markowski, M., Bialobrewski, I., & Modrzejuska, A. (2010). Kinetics of spouted-bed drying of barley: Diffusivities for sphere and ellipsoid. *Journal of Food Engineering*, 380-387.
- Monteros, A., Sumba, E., & Salvador, S. (2013). Productividad Agrícola en el Ecuador. *Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca*, 1-12.
- Montes, E., Torres, R., Andrade, R., & Marimon, J. (2009). Modelado de las isoterms de desorción del ñame (*Dioscorea rotundata*). *Universidad Nacional de Colombia*, 145-152.
- Moreno, B., & Salvador, S. (2014). *Determinantes del Rendimiento del Cultivo de Maíz Duro Seco*. Quito: Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca.
- Mrema, G., Gumbe, L., & Chepete, H. (2011). *Rural structures in the topics. Designs and development*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Nielsen, S. (2010). *Food Analysis*. West Lafayette: Springer.
- Ochoa-Martínez, C., & Ayala, A. (2009). Modelos matemáticos de transferencia osmótica. *CYTA-Journal of Food*, 330-342.
- Odjo, S., Malumba, P., & Beckers, Y. (2015). Impact of drying and heat treatment on the feeding value of corn. A review. *Biotechnological Agronomic Social Environment*, 301-312.
- Omoto, E., Andrade, C., & Jorge, R. (2009). Modelagem matemática e análise da hidratação de grãos de ervilha. *Ciencia y Tecnologia de Alimentos*, 12-18.
- Ordoñez, M., Gely, M., & Pagano, A. (2012). Estudio de las propiedades físicas y de la cinética de secado de granos de maíz colorado duro. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 153-171.
- Ospina, J. (2001). *Características físico mecánicas y análisis de calidad de granos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

- Paquita, R. (2015). *EFFECTO DEL ESCALDADO Y TEMPERATURA EN LA CINÉTICO DE SECADO DE LAS HOJAS DE QUINUA (Chenopodium quinoa Willd), VARIEDAD SALCEDO INIA*. Puno : Universidad Nacional del Altiplano.
- Pérez, D., & Zárate, M. (2013). Determinación de flora micológica de maíz seco y su harina en la Parroquia San Juan - Cantón Gualaceo. *Universidad de Cuenca*, 2-8.
- Ponzio, N. (2010). *Calidad panadera de variedades de trigo puras y sus mezclas. Influencia del agregado de aditivos*. La Plata: Universidad Nacional de La Plata.
- PROECUADOR. (2016). *Perfil Sectorial de Agroindustria*. Guayaquil: Instituto de Promoción de Exportaciones e Inversiones.
- Pumacahua-Ramos, A. L., & Limaylla, K. (2011). Determinación del coeficiente de difusión del agua mediante maceración de dos variedades de quinua (*Chenopodium quinoa willdenow*). *Ciencia y Tecnología de Alimentos*.
- Ramírez-Miranda, M., Cruz, M., Vizcarra, M., & Anaya, I. (2014). Determinación de las isotermas de sorción y las propiedades termodinámicas de harina de maíz nixtamalizada. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 165-178.
- Rodríguez, J., & Bartosik, R. (2006). Secado de granos. *PRECOP*, 1-4.
- Runyon, J., Sunilkumar, B., Nilsson, L., & Rascon, A. (2015). The effect of heat treatment on the soluble protein content of oats. *Journal of cereal science*, 119-124.
- Sacilik, K., Konuralp, A., & Unal, G. (2006). Drying kinetics of Uryani plum in a convective hot-air dryer. *Journal of Food Engineering* 76, 362-368.
- SAGARPA. (2017). *Cebada Grano Mexicana*. México: Planeación Agrícola Nacional.
- Sauceda, C., Villaseñor, H., Lugo, G., & Ruvalcaba, L. (2017). Tamaño y número de granos de trigo analizados mediante procesamiento de imagen digital. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 517-529.
- Smaniotto, T., Resende, O., & de Sousa, K. (2017). Drying kinetics of sunflower grains. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 203-208.
- Soares, M., Jorge, L., & Montanuci, F. (2016). Drying kinetics of barley grains and effects on the germination index. *Food Science and Technology*, 638-645.
- SURATEP, C. (13 de 05 de 2004). Almacenamiento en silos. págs. 1-6.
- Talens, P. (2017). *Determinación de la isoterma de sorción de agua de un alimento*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Tames, S. (19 de 10 de 2010). *Cereal Grain Drying and Storage*. Obtenido de Alberta Agriculture and Forestry: <http://www1.agric.gov.ab.ca>
- Torres, J. (2016). Proceso de secado en lotes de granos de trigo en un sistema de lecho fluidizado. *Universidad Autónoma del Estado de México*, 34-45.
- Vásquez-Chávez, L., & Vizcarra-Mendoza, M. (2008). Secado por lecho fluidizado del trigo y su calidad. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 131-137.

- Vásquez-Chávez, L., Salazar, A., Guerrero, I., & Vizcarra, M. (2001). Efecto de la temperatura de secado por lecho fluidizado en las propiedades fisicoquímicas y de panificación en dos variedades de trigo. *Revista Fitotecnológica Mexicana*, 189-195.
- Villacrés, E. (Mayo de 1996). *La cebada: un cereal nutritivo*. Obtenido de Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias:
<http://www.iniap.gob.ec/nsite/images/documentos/RECETAS-%20LA%20CEBADA%20UN%20CEREAL%20NUTRIVO.PDF>
- Virgen-Navarro, L., Herrera, E., & Espinoza, H. (2016). Estimación del coeficiente de difusividad durante el tostado de café en un lecho fuente utilizando un modelo difuso. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 513-524.
- Wankhade, P., & Sapkal, R. (2013). Drying characteristics of Okra slices on drying in Hot Air Dryer. *Chemical, Civil and Mechanical Engineerig Tracks of 3rd Nirma University International Conference on Engineering*, 371-374.
- Yildirim, A. (2018). Kinetics and thermodynamic properties of parboiled burgos wheat (*Triticum durum*) in Turkey during drying. *Applied Ecology and Environment Research*, 495-510.

ANEXOS

ANEXO A: Evidencia fotográfica



Recolección de los granos de cereales



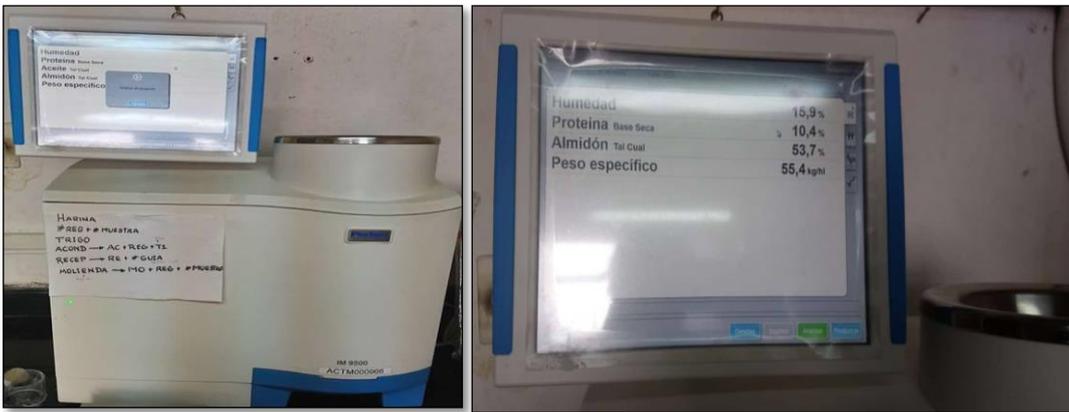
Proceso de secado de los granos



Medición del contenido de humedad



Medición de Tamaño y Masa de 1000 granos.



Analizador de granos NIR para medición del contenido de proteína y peso específico.



Medidor de actividad de agua.