

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE
OPERACIÓN PARA EL SECADO DE MACA
(*Lepidium meyenii Walp.*) EN UN SECADOR
ROTATORIO DISCONTINUO EXPERIMENTAL”.**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
QUÍMICO

YESENIA NATHALÍE DÍAZ ZELADA

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Yesenia'.

Callao, 2021

PERÚ

A handwritten signature in blue ink, appearing to be a faculty member's name.

ACTA N° 326 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS SIN CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO

LIBRO 02 FOLIO N°145 ACTA N°326 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS SIN CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO

A los catorce días del mes octubre del año 2021, siendo las 10:00 a.m. horas, se reunió, en la sala meet: <https://meet.google.com/con-psoa-vfo>, el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS** para la obtención del título profesional de Ingeniero Químico de la **Facultad de Ingeniería Química**, conformada por los siguientes docentes ordinarios de la **Universidad Nacional del Callao**:

| | |
|--------------------------------------|--------------|
| Ing. CARLOS ERNESTO ANGELES QUEIROLO | : Presidente |
| Ing. VÍCTOR HUGO AVALOS JACOBO | : Secretario |
| Ing. FABIO MANUEL RANGEL MORALES | : Vocal |
| Ing. LUIS AMÉRICO CARRASCO VENEGAS | : Asesor |

Se dio inicio al acto público de sustentación de tesis, de manera no presencial a través de la Plataforma Virtual, de la Bachiller **DÍAZ ZELADA YESENIA NATHALÍE**, quién habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico, sustenta la tesis titulada "**OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN PARA EL SECADO DE MACA (*Lepidium meyenii Walp*) EN UN SECADOR ROTATORIO DISCONTINUO EXPERIMENTAL**"; en cumplimiento de la declaración de emergencia adoptada por el Poder Ejecutivo para afrontar la pandemia del COVID-19, a través del D.S. N°044-2020-PCM y lo dispuesto en el DU N°026-2020 y en concordancia con la Resolución del Consejo Directivo N°039-2020-SUNEDU-CD y la Resolución Viceministerial N°085-2020-MINEDU, que aprueba las "Orientaciones para la continuidad del servicio educativo superior universitario";

Con el quórum reglamentario de ley, se dio inicio a la sustentación de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente. Luego de la exposición, y la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado y efectuadas las deliberaciones pertinentes, acordó:

Dar por **aprobado** con la escala de calificación cualitativa **MUY BUENO** y calificación cuantitativa **dieciséis**, la presente tesis, conforme a lo dispuesto en el Art. 27 del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 245-2018-CU del 30 de Octubre del 2018

Se dio por cerrada la Sesión a las 11.20 horas del día catorce del mes y año en curso.



Ing. Carlos Ernesto Angeles Queirolo
Presidente



Ing. Víctor Hugo Avalos Jacobo
Secretario



Ing. Fabio Manuel Rangel Morales
Vocal



Ing. Luis Américo Carrasco Venegas
Asesor

FICHA DE OBSERVACIONES PARA SUSTENTACIÓN DE TESIS SIN CICLO DE TESIS

Observaciones de los señores miembros del Jurado de Sustentación para que subsane la sustentante

TESISTA Bachiller **DÍAZ ZELADA YESENIA NATHALÍE**

TEMA DE TESIS "OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN PARA EL SECADO DE MACA (*Lepidium meyenii* Walp) EN UN SECADOR ROTATORIO DISCONTINUO EXPERIMENTAL".

PRESIDENTE

.....
.....
.....

SECRETARIO

.....
.....
.....

VOCAL

Incluir limitante de la investigación referido a la velocidad del aire

.....
.....



Ing. Carlos Ernesto Angeles Queirolo
Presidente



Ing. Víctor Hugo Avalos Jacobo
Secretario



Ing. Fabio Manuel Rangel Morales
Vocal

Bellavista, 14 de octubre 2021

MPCI.



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
MESA DE PARTES
RECIBIDO
08-11-2021 - 14:27:14
REG. 003280

Bellavista, Noviembre 08 de 2021

Oficio N°001-2021-PJ

Referencia:

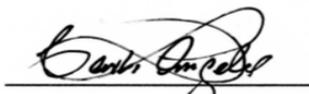
Resolución N° 0074-2021-DFAIQ

Señor
Dr. Julio César Calderón Cruz
Decano de la Facultad de Ingeniería Química

Es grato dirigirme a usted para saludarlo cordialmente y a la vez informar que la Srta. DIAZ ZELADA YESENIA NATHALIE ha remitido via el Despacho del Decano la tesis sustentada "OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN PARA EL SECADO DE MACA (*Lepidium Melleni* Walp) EN UN SECADOR ROTATORIO DISCONTINUO EXPERIMENTAL".

De la revisión de la tesis, se concluye que la recurrente HA CUMPLIDO CON LEVANTAR LAS OBSERVACIONES formuladas por el Jurado en el Acto de sustentación y en tal sentido, puede continuar con l, quien formuló las observaciones.os trámites correspondientes. Se adjunta el Informe favorable del Ing. Fabio Manuel Rangel Morales

Atentamente;



Ing. Carlos Ernesto Angeles Queirolo
Presidente
Jurado de Sustentación

*A Dios y
a mis padres Gladis y Fredy,
a quienes amo tanto.*

AGRADECIMIENTO

A Dios por acompañarme en todo momento, darme salud y permitirme lograr un objetivo más en la vida. A mis padres, Gladis y Fredy, por impulsarme a ser mejor cada día, por su dedicación y amor incondicional, por ser mi mayor inspiración.

A Rafael, por ser mi apoyo en cada momento, por su ayuda y motivación siempre.

A mi asesor, Dr. Luis Carrasco Venegas, por sus consejos y apoyo para el desarrollo de este trabajo, a mi jurado de tesis y a todos los que contribuyeron de una u otra manera.

Mi agradecimiento a mi familia, a mis abuelitos Cruz y Angel, a mi prima Cindy, por estar siempre y ser parte de mi vida.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| RESUMEN..... | 13 |
| ABSTRACT..... | 14 |
| INTRODUCCIÓN..... | 15 |
| I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 17 |
| 1.1. Descripción de la realidad problemática..... | 17 |
| 1.2. Formulación del problema..... | 18 |
| 1.3. Objetivos..... | 19 |
| 1.4. Limitantes de la investigación..... | 19 |
| II. MARCO TEÓRICO..... | 20 |
| 2.1. Antecedentes..... | 20 |
| 2.1.1. Antecedentes internacionales..... | 20 |
| 2.1.2. Antecedentes nacionales..... | 24 |
| 2.2. Bases teóricas..... | 28 |
| 2.2.1. Maca..... | 28 |
| 2.2.2. Secado..... | 40 |
| 2.2.3. Métodos de Optimización..... | 48 |
| 2.3. Conceptual..... | 50 |
| 2.3.1. Clasificación de los secadores..... | 50 |
| 2.3.2. Secadores Batch..... | 54 |

| | | |
|--------|--|----|
| 2.3.3. | Secador rotatorio discontinuo..... | 56 |
| 2.4. | Definición de términos básicos | 57 |
| III. | HIPÓTESIS Y VARIABLES..... | 59 |
| 3.1. | Hipótesis..... | 59 |
| 3.1.1. | Hipótesis general..... | 59 |
| 3.1.2. | Hipótesis específicas..... | 59 |
| 3.2. | Definición conceptual de variables | 59 |
| 3.2.1. | Operacionalización de variables..... | 60 |
| IV. | DISEÑO METODOLÓGICO..... | 61 |
| 4.1. | Tipo y diseño de investigación..... | 61 |
| 4.2. | Método de investigación | 63 |
| 4.3. | Población y muestra | 63 |
| 4.4. | Lugar de estudio y período desarrollado..... | 64 |
| 4.5. | Técnicas e instrumentos para la recolección de la información .. | 64 |
| 4.5.1. | Acondicionamiento de la materia prima | 64 |
| 4.5.2. | Secado de las muestras..... | 65 |
| 4.5.3. | Análisis de proteínas..... | 68 |
| 4.6. | Análisis y procesamiento de datos | 70 |
| V. | RESULTADOS..... | 71 |
| 5.1. | Resultados descriptivos..... | 71 |

| | |
|---|-----|
| 5.1.1. Proteínas de la maca fresca..... | 71 |
| 5.1.2. Secado de la maca..... | 71 |
| 5.1.3. Proteínas de la maca seca..... | 80 |
| 5.2. Resultados inferenciales..... | 81 |
| 5.3. Resultados estadísticos..... | 82 |
| 5.3.1. Superficie de respuesta para la cantidad de proteínas..... | 82 |
| 5.3.2. Superficie de respuesta para la humedad final | 83 |
| VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 86 |
| 6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados..... | 86 |
| 6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares..... | 89 |
| 6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes .. | 91 |
| CONCLUSIONES | 92 |
| RECOMENDACIONES..... | 94 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 95 |
| ANEXOS..... | 105 |

TABLAS DE CONTENIDO

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Tabla de valor nutricional de la maca (Por 100 g)..... | 34 |
| Tabla 2. Exportación maca harina Perú 2017 | 38 |
| Tabla 3. Exportación maca harina Perú 2019 | 39 |
| Tabla 4. Selección del secador vs. forma de la materia prima..... | 54 |
| Tabla 5. Operacionalización de variables | 60 |
| Tabla 6. Diseño experimental | 63 |
| Tabla 7. Concentración de proteínas totales en las muestras analizadas | 71 |
| Tabla 8. Concentración de proteínas totales en las muestras analizadas | 80 |
| Tabla 9. Humedad inicial, humedad de equilibrio y humedad crítica en las pruebas de secado (gH ₂ O/g ss)..... | 81 |
| Tabla 10. Velocidad de secado constante Nc (gH ₂ O/gss.min)..... | 81 |
| Tabla 11. Datos para condiciones de T = 50 °C y V _{aire} = 1.57 m/s..... | 110 |
| Tabla 12. Datos para condiciones de T = 55 °C y V _{aire} = 1.57 m/s..... | 111 |
| Tabla 13. Datos para condiciones de T = 60 °C y V _{aire} = 1.57 m/s..... | 112 |
| Tabla 14. Datos para condiciones de T = 65 °C y V _{aire} = 1.57 m/s..... | 113 |
| Tabla 15. Datos para condiciones de T = 50 °C y V _{aire} = 2.63 m/s..... | 114 |
| Tabla 16. Datos para condiciones de T = 55 °C y V _{aire} = 2.63 m/s..... | 115 |
| Tabla 17. Datos para condiciones de T = 60 °C y V _{aire} = 2.63 m/s..... | 116 |
| Tabla 18. Datos para condiciones de T = 65 °C y V _{aire} = 2.63 m/s..... | 117 |
| Tabla 19. Proporciones en la composición del reactivo de Bradford | 123 |
| Tabla 20. Composición de los puntos de la curva de calibración | 124 |

Tabla 21. Valores de absorbancia para los puntos de la curva de
calibración..... 127

TABLA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Maca | 28 |
| Figura 2. Distribución altitudinal de las raíces alimenticias nativas | 29 |
| Figura 3. Maca. Sus componentes botánicos. A. Planta, B. Raíz, C. Fruto, D. Semilla | 31 |
| Figura 4. Harina de maca y raíz de maca amarilla..... | 31 |
| Figura 5. Maca roja | 32 |
| Figura 6. Maca negra..... | 33 |
| Figura 7. Exportación maca 2016 | 37 |
| Figura 8. Exportación maca 2019 | 39 |
| Figura 9. Superficie de respuesta tridimensional | 49 |
| Figura 10. Secador rotatorio discontinuo | 56 |
| Figura 11. Relación de las variables de la investigación..... | 60 |
| Figura 12. Diseño de la investigación | 62 |
| Figura 13. Muestras acondicionadas para el secado..... | 64 |
| Figura 14. Muestras de maca molida..... | 66 |
| Figura 15. Secador rotatorio discontinuo experimental..... | 67 |
| Figura 16. Molino de laboratorio TE-650/1 tipo Wiley | 68 |
| Figura 17. Acomplejamiento de proteína con el colorante Azul de Coomasie G-250..... | 69 |
| Figura 18. Espectrofotómetro Thermo Scientific Genesys 10S UV-Vis ... | 70 |
| Figura 19. Curva de secado para 50°C y 1.57 m/s | 72 |
| Figura 20. Curva de secado para 55°C y 1.57 m/s | 72 |

| | |
|---|----|
| Figura 21. Curva de secado para 60°C y 1.57 m/s | 73 |
| Figura 22. Curva de secado para 65°C y 1.57 m/s | 73 |
| Figura 23. Curva de secado para 50°C y 2.63 m/s | 74 |
| Figura 24. Curva de secado para 55°C y 2.63 m/s | 74 |
| Figura 25. Curva de secado para 60°C y 2.63 m/s | 75 |
| Figura 26. Curva de secado para 65°C y 2.63 m/s | 75 |
| Figura 27. Curva de velocidad de secado decreciente para 50°C y 1.57 m/s | 76 |
| Figura 28. Curva de velocidad de secado decreciente para 55°C y 1.57 m/s | 77 |
| Figura 29. Curva de velocidad de secado decreciente para 60°C y 1.57 m/s | 77 |
| Figura 30. Curva de velocidad de secado decreciente para 65°C y 1.57 m/s | 78 |
| Figura 31. Curva de velocidad de secado decreciente para 50°C y 2.63 m/s | 78 |
| Figura 32. Curva de velocidad de secado decreciente para 55°C y 2.63 m/s | 79 |
| Figura 33. Curva de velocidad de secado decreciente para 60°C y 2.63 m/s | 79 |
| Figura 34. Curva de velocidad de secado decreciente para 65°C y 2.63 m/s | 80 |
| Figura 35. Superficie de respuesta para la cantidad de proteínas | 82 |

| | |
|---|-----|
| Figura 36. Superficie de contornos para la cantidad de proteínas | 83 |
| Figura 37. Superficie de respuesta para la humedad final..... | 84 |
| Figura 38. Superficie de contornos para la humedad final..... | 84 |
| Figura 39. Optimización de las condiciones de secado | 85 |
| Figura 40. Curvas de secado a diferentes temperaturas con velocidad de aire caliente de 1.57 m/s..... | 87 |
| Figura 41. Curvas de secado a diferentes temperaturas con velocidad de aire caliente de 2.63 m/s..... | 88 |
| Figura 42. Cantidad de proteínas (g/100g) | 89 |
| Figura 43. Datos para condiciones de $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 1.57\text{ m/s}$ | 119 |
| Figura 44. Datos para condiciones de $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 1.57\text{ m/s}$ | 119 |
| Figura 45. Datos para condiciones de $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 1.57\text{ m/s}$ | 120 |
| Figura 46. Datos para condiciones de $T = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 1.57\text{ m/s}$ | 120 |
| Figura 47. Datos para condiciones de $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 2.63\text{ m/s}$ | 121 |
| Figura 48. Datos para condiciones de $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 2.63\text{ m/s}$ | 121 |
| Figura 49. Datos para condiciones de $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 2.63\text{ m/s}$ | 122 |
| Figura 50. Datos para condiciones de $T = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 2.63\text{ m/s}$ | 122 |
| Figura 51. Muestra de la mezcla resultante del licuado de maca fresca | 125 |
| Figura 52. Alícuota diluida | 125 |
| Figura 53. Espectro del barrido a diferentes longitudes de onda para una muestra proteica | 126 |
| Figura 54. Curva de calibración para la cantidad de proteínas..... | 127 |

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como propósito optimizar los parámetros de secado de la maca, tales como temperatura y velocidad del aire en un secador rotatorio discontinuo experimental.

El secado se realizó por triplicado en muestras de maca, con velocidad de rotación constante del secador rotatorio (10 rpm), a cuatro temperaturas diferentes 50 °C, 55 °C, 60 °C y 65 °C, y dos velocidades de aire caliente 1.57 m/s y 2.63 m/s; teniendo como variable de respuesta para la optimización la cantidad de proteínas totales en las muestras que quedaron después de cada prueba de secado y la humedad.

Las curvas de secado y de velocidad de secado obtenidas nos muestran el efecto de la temperatura y la velocidad de aire caliente en el secador rotatorio discontinuo experimental sobre la humedad de la maca. Se logró reducir significativamente el contenido de humedad y el rango de tiempo utilizado; en las pruebas varió entre 3.65 h a 7.97 h. En cuanto a la cantidad de proteínas totales se obtuvo un rango de 7.3 - 9.3 g/100g muestra de maca para las muestras obtenidas de las pruebas de secado. Finalmente el rango de humedad de equilibrio de las muestras trabajadas estuvo entre 0.0071 - 0.1437 gH₂O/g ss.

La optimización se realizó con el programa Minitab 20, obteniéndose como resultados una $T_{\text{óptima}} = 53.48 \text{ °C}$ y $V_{\text{aire caliente óptima}} = 2.63 \text{ m/s}$.

ABSTRACT

The purpose of this research work was to optimize the drying parameters of the maca: temperature and air speed in an experimental discontinuous rotary dryer.

Drying was carried out in triplicate on maca samples, with constant rotation speed of the rotary dryer (10 rpm), at four different temperatures 50 ° C, 55 ° C, 60 ° C and 65 ° C, and two speeds of hot air 1.57 m / s and 2.63 m / s; having as a response variable for optimization the amount of total proteins in the samples that remained after each drying test and the humidity.

The drying curves and drying speed obtained show us the effect of the temperature and the speed of hot air in the experimental discontinuous rotary dryer on the humidity of the maca. It was possible to significantly reduce the moisture content and the range of time used; in the tests it ranged from 3.65 h to 7.97 h. Regarding the amount of total proteins, a range of 7.3 - 9.3 g / 100g maca sample was obtained for the samples obtained from the drying tests. Finally, the equilibrium humidity range of the worked samples was between 0.0071 - 0.1437 gH₂O / g ss.

The optimization was carried out with the Minitab 20 program, obtaining as results a T_{óptima} = 53.48 ° C and an optimal hot Vaire = 2.63 m / s.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la sociedad sigue buscando nuevas formas de conservar los alimentos, es así que surgen métodos que permiten lograr condiciones adecuadas de tratamiento y conservación.

Los alimentos se deterioran con el tiempo debido a la acción de los microorganismos, que se forman principalmente en presencia de agua. Teniendo en cuenta las pérdidas que esto ocasiona en la industria alimentaria, se desarrolla una forma de disminuir la humedad de los alimentos por medio del secado, que consiste en eliminar el agua, deteniendo el deterioro de estos y obteniendo un producto de menor perecibilidad (Ecured, 2018). De forma más precisa, el secado es una operación unitaria que consiste en hacer fluir aire caliente sobre la superficie del material para ir eliminando la humedad poco a poco y que puede reemplazar el secado tradicional de la maca, que normalmente es exponiéndola al sol por tiempos muy prolongados.

Debido a los beneficios que esta operación ofrece, se busca conocer los parámetros óptimos para el secado de la maca en un secador rotatorio discontinuo experimental; el contenido proteico de los productos de secado nos ayudará a determinar los parámetros adecuados para el secado de la maca y así contribuir a la investigación de un alimento ancestral que nos brinda la naturaleza, beneficioso para la salud, que mejora la fuerza en situaciones de estrés, así como la resistencia del cuerpo ante el debilitamiento físico y mental (Saludeo, 2019), además de considerar que

en el mercado mundial cada vez existe una mayor demanda por consumir productos naturales.

El desarrollo de la presente tesis se plantea en 3 etapas, empezando con las corridas de secado a diferentes condiciones para obtener curvas de secado y de velocidad de secado. La segunda etapa consiste en caracterizar la materia prima, centrándonos en la cantidad de proteínas totales para tener un nivel referencial y después del secado realizar el análisis de proteínas utilizando el método de Bradford - UV VIS y tener un criterio más para la optimización de los parámetros de operación. Finalmente, la tercera etapa de investigación, que consiste en realizar el análisis estadístico de superficie de respuesta de los datos encontrados por experimentación, para poder determinar los parámetros óptimos de operación.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

La conservación de productos sigue siendo un problema y el secado es un método de conservación en la industria de alimentos que se basa en la eliminación del agua que los alimentos contienen.

El secado de plantas medicinales, granos y carnes es desde tiempos antiguos hasta la actualidad una práctica habitual de conservación en el campo, para asegurar la disponibilidad de los productos alimenticios y medicinales durante todo el año (Unesco, 2005).

Es utilizado principalmente para aumentar la vida útil de los alimentos, conservando sus propiedades y valor nutricional ya que reduce el contenido de agua, lo que permite obtener un producto más estable microbiológicamente, pues evita que se desarrollen mohos, bacterias y que las enzimas provoquen reacciones químicas que deterioren el producto.

Con el paso de los años esta técnica de conservación se ha desarrollado no solo para abastecernos de un producto por más tiempo, sino también ofrece una alternativa comercial para el mercado nacional e internacional que demanda cada vez más productos naturales y sanos.

La necesidad de consumir alimentos naturales nos hace estudiar los parámetros óptimos de secado de la maca que permite obtener un producto nutritivo con una vida útil prolongada.

Debido a las propiedades de la maca que indican que esta raíz proporciona energía y contiene valiosos minerales como el hierro, cobre, zinc, manganeso y otros micronutrientes que explican su acción revitalizante, así como una cantidad importante de proteínas, es que surge la idea de obtener sus parámetros óptimos de secado, contribuyendo así a conservar un producto nutritivo y natural por más tiempo, contribuyendo a una alternativa de consumo (Superalimentos, 2018).

Considerando que es importante el desarrollo de nuevos productos que permitan ampliar las alternativas de mercado que el país ofrece y teniendo en cuenta la demanda de productos naturales, ya que la sociedad humana se sustenta en el aprovechamiento ellos, surgió el tema de investigación.

Por lo tanto, existe la necesidad de determinar los parámetros óptimos de operación para el secado de maca en un secador rotatorio discontinuo experimental.

1.2. Formulación del problema

Problema General:

¿Cuáles son los parámetros óptimos de operación para el secado de la maca (*Lepidium meyenii Walp?*) en un secador rotatorio discontinuo experimental?

Problemas específicos:

a) ¿Cómo influirá la temperatura y la velocidad de aire caliente del secador rotatorio discontinuo experimental sobre la humedad de la maca (*Lepidium meyenii Walp?*)?

- b) ¿Cuál será el efecto de la temperatura sobre las proteínas totales de la maca (*Lepidium meyenii Walp.*)?

1.3. Objetivos

Objetivo General:

Determinar los parámetros óptimos de operación para el secado de la maca (*Lepidium meyenii Walp.*) en un secador rotatorio discontinuo experimental.

Objetivos Específicos:

- a) Obtener la humedad final de la maca (*Lepidium meyenii Walp.*) a diferentes condiciones de temperatura y velocidad de aire caliente en el secador rotatorio discontinuo experimental.
- b) Cuantificar las proteínas totales de la maca (*Lepidium meyenii Walp.*) antes y después del secado.

1.4. Limitantes de la investigación

Entre las limitantes de la investigación con las que nos podemos encontrar, durante el desarrollo del trabajo planteado, se considera lo siguiente:

- a) El tamaño de muestra y tipo de muestra, ya que, al elegir un tipo específico de muestra, no permite generalizar los resultados obtenidos.
- b) La complejidad de la preparación de la muestra para realizar los análisis de proteínas.
- c) Las variables del equipo como la regulación de la velocidad de aire caliente, pues nos limitan el rango de trabajo para el análisis.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

García, M.; Hernández, F.; Hernández, W.; Rodríguez, G. y Vargas, Z. (2013). Revista mexicana de ingeniería química. Optimización del secado de granos de café en un secador rotatorio.

El objetivo de este trabajo fue determinar las condiciones de operación de un secador de café tipo Guardiola que minimicen el consumo de energía (Q) y maximicen la eficiencia térmica del proceso. Para simular el secado utilizaron un modelo mecanístico para secado de café, resolviéndolo de acuerdo a la suposición de mezclado completo. Los resultados de la simulación reprodujeron la conducta experimental obtenida de un secador tipo Guardiola de 7.60 m³ cargado con 2675 kg de granos de café verde húmedo. Calcularon la eficiencia térmica de segunda Ley del secado con una expresión que toma en cuenta la energía que el aire posee antes de entrar al secador. Para encontrar las condiciones óptimas de secado, para la misma carga de café y con restricciones de temperatura ($T_{\beta} < 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$), humedad final ($X_{\beta} < 11 \text{ } \%$) y actividad de agua del grano ($a_w < 0.80$), se simuló el secado para diferentes flujos y temperaturas de aire. Al comparar las condiciones óptimas encontradas ($T_{\gamma} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and $G_{\gamma} = 6560 \text{ kg aire}\cdot\text{h}^{-1}$) con las normalmente utilizadas en el beneficio se logró una reducción del 15.80 % en el consumo de energía.

Arrieta, Y.; Granados C.; León, G.; Padilla, K. y Torrenegra M. (2018).
Universidad de Pamplona. Colombia. *Evaluación de la influencia de la temperatura en procesos de secado.*

En este trabajo se hace mención a diferentes estudios de secado de alimentos: Barajas-Ortiz et al., 2011 evaluaron el efecto de la temperatura en el secado de polen apícola procedente de dos zonas de Cundinamarca, sobre las características físicas, químicas, y nutricionales del polen seco. Los resultados confirman que el secado de polen a una temperatura de 45 °C es el más adecuado debido a que presenta un menor tiempo de proceso y no se afectan sus propiedades fisicoquímicas y nutricionales. Los contenidos de proteína, fibra y ceniza del polen no se afectan por la temperatura de secado.

Hincapié-Llanos et al., 2010, determinaron la cinética de secado del residuo proveniente de la extracción del jugo de naranja. Concluyendo que a 50 °C se conservan mejor las propiedades funcionales de la fibra dietaria y que se requieren 19.75 horas para lograr una humedad de 0.12 kg agua/kg Muestra Seca (MS). Belén-Camacho et al., 2004, evaluaron el efecto de la temperatura de secado sobre el contenido de carotenoides totales del mesocarpio de la coroba (fruto de un árbol de tipo palma). El secado de los frutos maduros se realizó hasta reducir la humedad a 12 ± 2 % utilizando tratamientos a 30, 40, 50, 60, 70 o 80 °C. Evidenciando que no se observaron cambios significativos en el contenido de carotenoides totales hasta 40 °C, por lo que se consideró este valor como el más adecuado para

el secado del mesocarpio de la coroba. Con lo mencionado concluyen que se pueden controlar variables influyentes como la temperatura con el propósito de obtener el grado de secado adecuado. En todos los casos antes mencionados, se experimentó utilizando secadores de bandejas.

Hernández, C.; Herrera, W.; Karina Z. y Ramírez, L. (2011). Universidad de la Amazonía. Colombia. *Influencia del espesor y la temperatura en el secado de carambola (Averrhoa carambola L.)*

Rodajas de carambola con diferentes espesores (0,5; 1,0 y 1,5 cm) fueron secadas a diferentes temperaturas de bulbo seco (50, 55 y 60 °C), utilizando un secador de bandejas. Se evaluó el efecto de la temperatura y el espesor sobre tiempo de secado, coeficiente de difusión, características fisicoquímicas y análisis proximal del fruto seco. Con los datos obtenidos se construyeron curvas de secado; se observó que el secado tiene lugar durante el periodo descendente, indicando que la difusión es el mecanismo involucrado en el secado de carambola. Los coeficientes difusivos oscilaron entre $7,8 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (50 °C y 0,5 cm) y $41,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (60 °C y 1,5 cm). El tiempo de secado osciló entre 2,74 h (60 °C y 0,5 cm) y 12,41 h (50 °C y 1,5 cm). Los resultados indican que a medida que la temperatura de secado aumenta y el espesor de rodaja disminuye, mayor es la velocidad de secado y menor el tiempo de secado. En conclusión, el espesor de las rodajas tuvo efecto significativo sobre el tiempo de secado, el coeficiente de difusión, los sólidos solubles y el extracto etéreo en el fruto

seco. La temperatura afectó significativamente el coeficiente de difusión, las propiedades fisicoquímicas y el análisis proximal del fruto seco.

Figueredo, M. y González, R. (2017). Tecnología química. Venezuela.
Evaluación del secado de la Musa Paradisiaca (plátano) utilizando el aparato de laboratorio SBAN.

En este trabajo se evalúa el secado de la *Musa Paradisiaca* (plátano) utilizando el aparato de laboratorio SBAN ubicado en la Universidad Politécnica Territorial José Antonio Anzoátegui (UPTJAA), El Tigre, Edo. Anzoátegui, Venezuela. Se logró la puesta en marcha del secador (SBAN) operando de manera discontinua mediante secado directo en un flujo axial desde el ambiente hasta 96 °C y con un control de velocidad del aire caliente de 0 m/s a 9,1 m/s. El proceso de secado del plátano con un espesor de 0,002 m, temperatura de 50 °C a velocidad de 9,1 m/s, en el primer periodo de secado presentó una pérdida de humedad de 0,516 kg de agua /kg de sólido seco en un tiempo anticrítico de 1,34 h (4824 s) hasta llegar al punto crítico de 0,558 kg de agua/kg de sólido seco, en el segundo periodo de secado de 1,667 h (6001,2 s) la velocidad decrece perdiendo un contenido de humedad de 0,473 kg de agua/kg de sólido seco hasta alcanzar la humedad de equilibrio de 0,053 kg de agua/ kg de sólido seco. En la curva experimental de la velocidad en función de la humedad libre alcanza una humedad final de 6,3 %. Estos estudios experimentales a escala de laboratorio permitieron seleccionar un equipo de secado con

capacidad de cada lote 60 kg, fuente de energía 9 kW, número de bandejas 24 y de dimensiones 1,38 m x 1,2 m x 2 m para una planta piloto.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Osorio, C. y Segura, C. (2018). Universidad Nacional del Callao. *Proceso de secado de arracacha (Arracacia Xanthorriza) para la obtención de parámetros óptimos en un secador rotatorio discontinuo.*

En este trabajo el secado de arracacha (*Arracacia Xanthorriza*) fue realizado en un secador rotatorio discontinuo a escala de laboratorio. Las muestras de arracacha con espesores de 1,5 mm, 2 mm y 5 mm fueron colocadas en el equipo en contacto directo con un flujo de aire caliente, bajo distintas condiciones de operación. Se evaluó el efecto de la temperatura (55 °C, 65 °C y 75 °C) y flujo del aire (480 y 750 L/min) trabajando a una velocidad de rotación constante de 13,20 rpm, pesando las muestras en intervalos de 10 min hasta obtener un peso constante. Los resultados obtenidos indicaron que, a un espesor de 1,5 mm, temperatura de 65 °C y flujo de aire de 480 L/min, el tiempo de secado fue de 45,5 min para obtener una humedad de 10 %. Los datos derivados de las curvas de secado fueron ajustados a los modelos de Newton, Page, Henderson, Logarítmica, Dos términos exponenciales, Wang y Singh, el de Henderson y Pabis modificado, Verma y el de Midilli. De acuerdo con los resultados el modelo matemático que describió mejor el comportamiento de las curvas de secado fue el modelo de Midilli con una regresión no lineal con $R^2 = 0,9997933$ y Varianza = 0,0001154, obteniendo una mejor calidad de ajuste

en cada curva de secado, representando así un excelente modelo para estimar el tiempo de secado de este producto, así como la velocidad de secado.

Capcha, K.; Naventa, E.; Ríos, C. y Sisa, N. (2020). Universidad San Ignacio de Loyola, Lima – Perú. *Evaluación de tres niveles de temperatura de secado del Cushuro (Nostoc Sp) en el color y porcentaje de proteína.*

Esta investigación, busca evaluar el efecto que causa el secado por bandejas en las proteínas y en el color del *Nostoc Sp*. Se utilizó cuatro muestras; una muestra fresca y tres muestras secas a tres temperaturas (50, 60 y 70) °C, con el objetivo de encontrar la temperatura óptima para mantener el contenido proteico, así mismo determinar el índice de color del *Nostoc*. Concluyen que en los tres niveles de temperaturas de secado en la cuantificación final de proteínas se ha incrementado el porcentaje de proteínas conforme la temperatura ascendía siendo la temperatura de 70 °C en la que se obtuvo mejores resultados. Además, la temperatura no afecta significativamente en las coordenadas de color en las temperaturas de 60 °C y 70 °C mientras que si se encontró una diferencia significativa en la muestra de 50 °C.

Daga, L. y García, R. (2017). Universidad Nacional del Callao. *Proceso de secado del alga Lessonia Nigrescens (Aftacanto negro) en un secador rotatorio discontinuo.*

En este trabajo, se desarrolló el proceso para el secado del alga *Lessonia nigrescens* en un secador rotatorio discontinuo, lográndose determinar a tres temperaturas (30, 50 y 60 °C), tiempos de secado de 360, 130 y 126 minutos respectivamente, con una velocidad de rotación de 13.20 rpm y un flujo de aire 7.9693 m³/s. De acuerdo al análisis estadístico que se utiliza (R²), se muestra la mejor calidad de ajuste sobre los datos experimentales, otorgando así una buena herramienta para el modelado de la cinética de secado industrial de la *Lessonia nigrescens* y el cálculo del tiempo de secado a diferentes temperaturas, con el fin de alcanzar un contenido de humedad comercial 18 % b.h. (0.2199 agua/g m.s.) aceptable internacionalmente. Además, comprobándose que el secado del alga *Lessonia nigrescens* en un secador rotatorio discontinuo es el más recomendable.

Obando, L. y Vega, E. (2019). Universidad Nacional del Callao. Proceso de secado de pituca (*Colocasia esculenta*) en un secador rotatorio discontinuo.

El proceso de secado de pituca (*Colocasia esculenta*) fue realizado en un secador rotario discontinuo a escala de Laboratorio, donde se trabajó con tres variables de análisis: el grosor de corte de la rodaja de pituca 2 mm, 4 mm y 6 mm, la otra variable fue la temperatura en el secador las cuales fueron: 60 °C, 70 °C y 80 °C; y la última variable fue el flujo de aire la cual ingresa al secador de 28.8 m³ /h y 45.5 m³ /h. Estas variables sirven para poder optimizar el proceso de secado. Con los datos obtenidos se obtuvo

que el modelo matemático que mejor se ajusta al proceso de secado de Pituca fue el de Midilli, con una regresión lineal de 0.9987. Adicionalmente con el programa Minitab se obtuvo el punto óptimo del proceso: espesor de rodaja de 6 mm, para una temperatura de 60 °C y un flujo de aire de 28.8 m³ /h. Para una humedad del 15 % que recomienda el MINSA para los tubérculos, dando un tiempo de 10.02 minutos.

Baca, E. y Moran, A. (2018). Universidad Nacional del Callao. *Proceso de secado de semilla de papaya (Carica papaya) para la obtención de aceite.*

El secado de semillas de papaya (*Carica papaya*) fue realizado en un secador rotatorio discontinuo de vidrio, para una mejor visualización del proceso, a escala de laboratorio. Las semillas de papaya previamente lavadas y seleccionadas por número de malla (4 000; 3 150 y 2 500) fueron ingresadas al secador, bajo ciertas condiciones de temperatura que fueron 40 °C, 55 °C y 70 °C a distintas velocidades de rotación (10, 20 y 30 rpm), pesando dichas muestras en un intervalo de 30 minutos o hasta peso constante. De acuerdo con las corridas experimentales, las condiciones óptimas fueron las semillas de la malla N° 4 000, secado a una temperatura de 55 °C, a una velocidad de rotación de 10 rpm, con un flujo constante de aire a 450 L/min hasta un tiempo de 3 horas y 30 minutos. Los datos obtenidos fueron ajustados a distintos modelos matemáticos para secado de alimentos como Newton, Wang and Singh, Page, Midilli, Logarítmico, Henderson y Pabis, de dos términos exponencial. El modelo matemático

que mejor se ajustó a la curva con los datos experimentales fue el modelo de Midilli, aplicando una regresión no lineal obteniendo una correlación promedio R^2 igual a 0,9997 y una varianza de 0,0000480661, obteniendo una mejor calidad de ajuste en la curva de secado.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Maca

La maca (*Lepidium meyenii* Walp.) es una planta que pertenece a la familia Brassicaceae (figura 1) cuyo hábitat natural se encuentra a una altura típica de la puna andina que pocas plantas pueden soportar debido a los vientos constantes y a su gélido e inhóspito clima (Cosio, et al, 2015).

Figura 1

Maca



Fuente: Superalimentos (2018)

La maca es una planta herbácea bianual. La pulpa de la maca es blanco-perla y tiene apariencia marmórea. La parte subterránea (hipocótilo) es comestible y se aprecia mucho por su valor nutritivo (Porres, 2008).

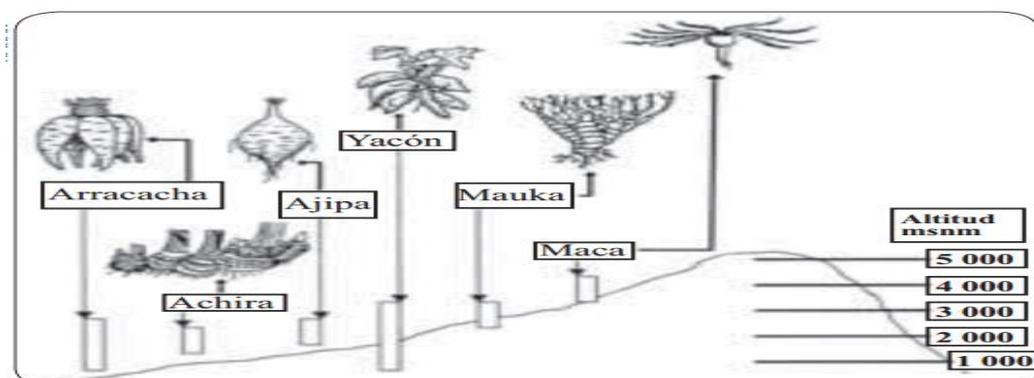
El nombre científico de la maca se encuentra en cuestión, pues se confunde *Lepidium Meyenii Walpers* o *Lepidium Peruvianum Chacón*, a partir de la descripción taxonómica de Gloria Chacón quien en 1962 la estudió y estableció sus propiedades. Sin embargo, en su comercialización todavía es común encontrarla con la denominación de *Lepidium meyenii* o *Lepidium sp* (Salcines, 2009). El Ministerio de desarrollo agrario y riego (MIDAGRI) del Perú, considera como nombre científico de la maca: *Lepidium Meyenii Walpers*. (MIDAGRI, 2018).

Origen y características de la maca

Es una raíz tuberosa, domesticada por los Pumpush de Junín, una Cultura Pre-Inca, allá por los 700 años A.C., quienes habitaban en las riberas del Lago Chinchaycocha, como demuestran los restos encontrados en las cuevas de Pachamachay, del ahora anexo de San Blas, Distrito de Ondores, Provincia de Junín y que tuvieron a la maca como su principal alimento y fuente de subsistencia (Macainka, 2010).

Figura 2

Distribución altitudinal de las raíces alimenticias nativas



Fuente: Fries, et al, (2007)

Es así que la maca (*Lepidium meyenii* o *Lepidium Peruvianum*) es un producto que se cultiva en los Andes desde el tiempo de los Incas, en altitudes comprendidas entre 3,800 a 4,500 m.s.n.m. (León, et al, 2015). Se puede observar la distribución altitudinal de las raíces alimenticias en la figura 2. Así mismo la maca es resistente a las heladas, granizadas, nevadas, factores climatológicos propios de la zona Alto Andina, lo que son negativos para otros cultivos, bajas temperatura como las existentes en el altiplano de Junín o Meseta de Bonbóm ubicado en la sierra alta de la zona central del Perú, no existe evidencia encontrada fuera de este ámbito y mucho menos en otros países de la región andina (Macainka, 2010).

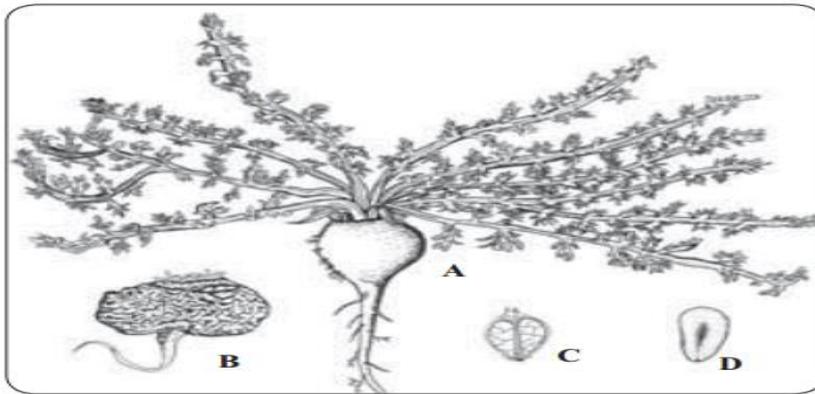
Respecto al secado, en Junín: La raíz en forma madura la limpian primero, la someten a rayos solares durante 15 días, para las características dulzonas ya que la maca posee un sabor propio, algo amargo y picante al paladar (Giurfa y Sandoval, 2000).

a. Descripción botánica de la maca

Es una planta de crecimiento postrado, similar al rabanito (figura 3). Las hojas en la base son de forma arrosetada, pegadas al suelo y con pecíolos largos de más de 20 cm y 2 a 3 cm de ancho. Las flores son muy pequeñas, al igual que las semillas. Desde hace más de 20 años se han iniciado actividades de selección de ecotipos más productivos y que corresponden a ocho diferentes coloraciones de la raíz, las que van desde blanco hasta morado (Fries y Tapia 2007).

Figura 3

Maca. Sus componentes botánicos. A. Planta, B. Raíz, C. Fruto, D. Semilla



Fuente: Fries y Tapia (2007)

b. Tipos de maca

- **Maca amarilla**

Esta variedad (*Lepidium peruvianum* o *Lepidium meyenii* Walp.) es la más conocida (figura 4) y utilizada dentro de los otros tipos de maca, posee unas extraordinarias propiedades como antioxidantes, revitalizantes y nutricionales. Su consumo mejora los procesos de aprendizaje y la memoria (Enmujer salud, 2016).

Figura 4

Harina de maca y raíz de maca amarilla



Fuente: Enmujer salud (2016)

- **Maca roja**

Esta variedad denominada maca roja (figura 5), es recomendada y utilizada principalmente para tratar problemas de osteoporosis y próstata. Esta variedad es la que contiene una mayor concentración de antioxidantes (Enmujer salud, 2016).

Figura 5

Maca roja



Fuente: Enmujer salud (2016)

- **Maca negra**

Tiene abundante contenido de fósforo, hierro, yodo y calcio, rejuvenece el sistema endocrino en hombres y mujeres. La maca negra (figura 6) es altamente utilizada y recomendada para tratar problemas de fertilidad y capacidad cognitiva.

Esta variedad crece en zonas muy altas de los Andes Peruanos, y su principal propiedad ha sido lograr mejorar la calidad y producción de espermatozoides, según investigaciones. Otras de las propiedades la maca

negra son la disminución del estrés y la ansiedad, puede revertir daños causados por enfermedades degenerativas como el Alzheimer, mejorando y potenciando las funciones cognitivas como la memoria y concentración (Enmujer salud, 2016).

Figura 6

Maca negra



Fuente: Enmujer salud (2016)

c. Composición de la maca y valor nutritivo

El análisis de los compuestos químicos derivados del carbono revela que la raíz de la maca contiene concentraciones cercanas al 60 % de carbohidratos, 10 % de proteínas, casi un 9 % de fibra, y poco más de 2 % de lípidos. Asimismo, las vitaminas B1, B2, C y E. El contenido proteico de la maca se manifiesta principalmente bajo la forma de cadenas polipeptídicas y aminoácidos (Tadeo, 2013).

La maca es también un importante depósito de diversos ácidos grasos (linoleico, palmítico y oleico, entre otros), esteroides (stigmasterol, sitosterol

y camosterol), saponinas, taninos y alcaloides, los cuales actúan como una importante fuente energética y estructural. Por otra parte, la composición mineral de la raíz de la maca, previamente desecada, reveló altas concentraciones de potasio, superando largamente a otros vegetales, también contiene calcio y hierro, cuya concentración supera en más del doble a la leche y lentejas, respectivamente. Por esta razón, ha sido usada tradicionalmente para el tratamiento de la osteoporosis (García, 2010).

La raíz de la maca es una excelente fuente de vitaminas y minerales. Los estudios nutricionales realizados indican que contiene excelentes propiedades nutricionales: proteínas, aminoácidos esenciales, carbohidratos, fibras; vitaminas: B1, B2, B6, B12, ácido ascórbico, caroteno; minerales: hierro, calcio, fósforo, potasio, sodio (Inkanat, 2013). En la tabla 1 se muestra el valor nutricional de la maca por cada 100 gramos.

Tabla 1

Tabla de valor nutricional de la maca (Por 100 g)

| Parámetro | Rango |
|------------------|--|
| Proteínas | de 10.0 a 17.0 g |
| Grasa | 0.80 a 0.90 g. |
| Fibra | 4.95 a 5.45 g. |
| Carbohidratos | 62.60 a 62.82 g. |
| Energía | 325.00 Kcal. |
| Vitaminas | B1, B2, B12, C, D3, E, P. |
| Minerales | Calcio, fósforo, hierro, magnesio, zinc, potasio, sodio, cobre, boro, manganeso. |
| Otros | Aminoácidos esenciales, alcaloides y otros elementos beneficiosos para la salud. |

Fuente: Macaperuana (2016)

La composición química elemental aproximada del cuerpo humano es similar a la composición química de la maca, por lo que puede ser considerada una planta "adaptogénica" por sus efectos selectivos según las necesidades del organismo. A la maca se le atribuyen muchas propiedades nutracéuticas, entre ellas el incremento de la fertilidad, el aumento de la capacidad espermática, la mejora del rendimiento sexual y la reducción del tamaño de próstata inflamada. Además, se le usa como reemplazo hormonal en mujeres menopáusicas y se ha observado que mejora la memoria y la resistencia ante el esfuerzo (Inkanatura, 2018).

d. Estadísticas de consumo de maca

Según Semanario Comexperu (2018) la venta al exterior de este tubérculo peruano, que se cultiva en zonas por encima de 4,400 metros sobre el nivel del mar, aumentó a una tasa promedio anual de 28 % entre 2006 y 2011 (Voz Regional, 2012). Y la exportación de maca en el año 2015 se incrementó en 35 % alcanzando los U\$ 6.1 millones a un precio de U\$ 8.88 por kilo en promedio (Koo, 2017).

Durante la crisis de 2009, mientras la compra internacional de otros productos nacionales disminuía y se registraba cifras negativas, los envíos de maca crecieron un vigoroso 32 %, detalla Semanario Comexperu.

Debido a las cualidades de la maca para disminuir el estrés, aumentar el vigor y el estado de ánimo, son los países con altos niveles de ingreso los que más la consumen, aseguró el subdirector de Promoción Comercial de

Promperú, José Quiñones (2012). El 52 % de la venta total de maca se realiza en polvo, el restante se hace en cápsulas y extractos, según Promperú. Estados Unidos, Japón y Alemania son los que mayores compras realizaron de maca en el año 2012. De acuerdo con Semanario Comexperu, en este mismo año, las importaciones estadounidenses se expandieron al 72 %, las japonesas aumentaron 165 % y las alemanas, 30 %. Hay otros destinos como Australia y Sudáfrica que también están demandando cada vez más maca, lo cual significa que ya se exporta a los cinco continentes (Perú 21, 2012).

Sin embargo, posiblemente debido a que ciudadanos chinos se han estado llevando toneladas de maca a su país, la exportación peruana ha bajado, como lo muestran las estadísticas y China se ha convertido en un país exportador de maca.

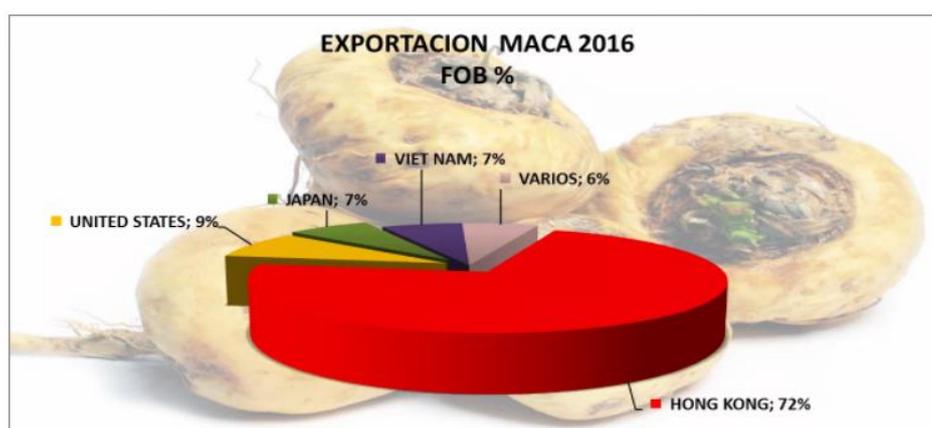
La maca (*Lepidium meyenii Walp.*), una raíz endémica del Perú, estaría siendo objeto de biopiratería en la República Popular China, según denunciaron diversas instituciones peruanas tras conocerse los intentos de siete empresas chinas de patentar métodos de propagación y mejoramiento genético del cultivo. Andrés Valladolid, presidente de la Comisión Nacional de Biopiratería concuerda: “no nos oponemos a las patentes, pero este caso evidencia que en China se está sembrado maca que ha salido ilegalmente del país, porque no hay un contrato de acceso ni un acuerdo de transferencia de materiales” (Scidev, 2014).

Los ciudadanos chinos trabajaron la maca y empezaron a sembrar en su país. “Ahora siembran con esquejes o sea hacen invitro y siembran maca por maca, semilla por semilla. Ellos han sembrado el año pasado (2015) 15 mil hectáreas de maca y nosotros hemos sembrado 5 mil (3 mil en Junín). Lo peor de esto es que están haciendo un trabajo tan tecnificado que están sacando 6 mil kilos por hectárea versus 1 500 kilos de nosotros”, señaló el alcalde de Junín, Percy Chagua, en entrevista a un medio nacional en Julio del 2016 (Diario correo, 2016).

En el año 2016 (figura 7) a Hong Kong se exportó U\$ 4.7 millones (72 % del total), le sigue Estados Unidos con el 9 % y Japón con el 7 % (Koo, 2017).

Figura 7

Exportación maca 2016



Fuente: Koo (2017)

En el año 2017 (tabla 2) las exportaciones llegaron a U\$ 12.03 millones a un precio promedio de U\$ 4.92 por kilo.

Tabla 2

Exportación maca harina Perú 2017

| MES | 2017 | | | 2016 | | |
|--------------------------|-------------------|------------------|-------------|-------------------|------------------|-------------|
| | FOB | KILOS | PREC. PROM. | FOB | KILOS | PREC. PROM. |
| ENERO | 644,437 | 127,420 | 5.06 | 1,830,185 | 177,707 | 10.30 |
| FEBRERO | 708,677 | 155,102 | 4.57 | 1,465,392 | 164,842 | 8.89 |
| MARZO | 1,063,890 | 238,192 | 4.47 | 1,747,043 | 199,615 | 8.75 |
| ABRIL | 1,482,187 | 242,320 | 6.12 | 1,100,036 | 145,672 | 7.55 |
| MAYO | 1,572,526 | 317,285 | 4.96 | 1,231,342 | 135,430 | 9.09 |
| JUNIO | 986,720 | 188,507 | 5.23 | 1,151,444 | 143,611 | 8.02 |
| JULIO | 846,708 | 216,462 | 3.91 | 1,182,751 | 174,501 | 6.78 |
| AGOSTO | 1,053,827 | 237,151 | 4.44 | 965,179 | 126,551 | 7.63 |
| SETIEMBRE | 1,077,634 | 173,633 | 6.21 | 991,518 | 162,946 | 6.08 |
| OCTUBRE | 750,260 | 164,831 | 4.55 | 1,215,960 | 177,160 | 6.86 |
| NOVIEMBRE | 1,005,066 | 191,231 | 5.26 | 542,037 | 115,085 | 4.71 |
| DICIEMBRE | 839,191 | 194,845 | 4.31 | 1,264,350 | 219,951 | 5.75 |
| TOTALES | 12,031,123 | 2,446,979 | 4.92 | 14,687,237 | 1,943,071 | 7.56 |
| PROMEDIO | 1,002,594 | 203,915 | | 1,223,936 | 161,923 | |
| MES | | | | | | |
| % | -18% | 26% | -35% | -45% | 39% | -60% |
| CRECIMIENTO ANUAL | | | | | | |

Fuente: Koo (2018)

En el año 2019 (tabla 3) las exportaciones llegaron a U\$ 10.96 millones a un precio promedio de U\$ 5.34 por kilo.

En la exportación de la maca, en el año 2019 (figura 8), Estados Unidos es el principal destino con U\$ 3.3 millones (30% del total), le sigue Japón con U\$ 1.2 millones (11%).

Tabla 3

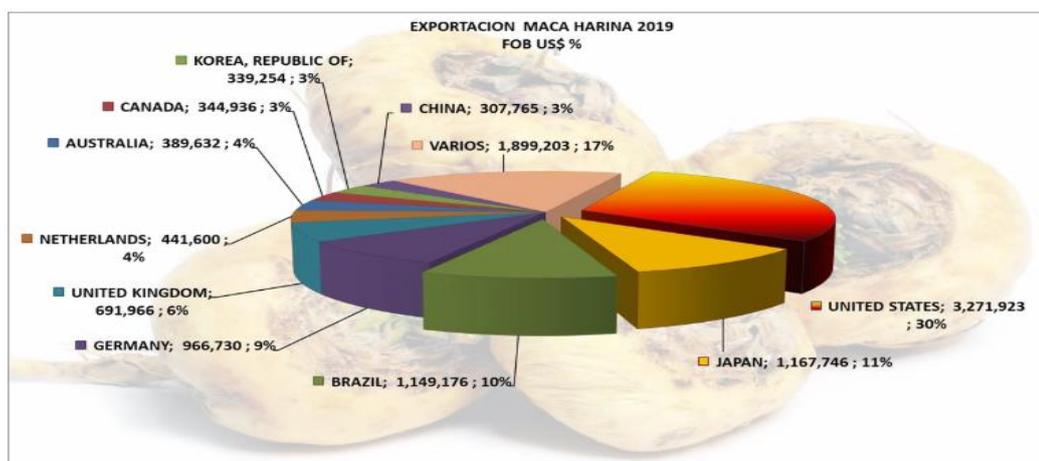
Exportación maca harina Perú 2019

| MES | 2019 | | | 2018 | | |
|---------------------|-------------------|------------------|-------------|-------------------|------------------|-------------|
| | FOB | KILOS | PREC. PROM. | FOB | KILOS | PREC. PROM. |
| ENERO | 1,136,794 | 258,978 | 4.39 | 754,493 | 145,278 | 5.19 |
| FEBRERO | 1,259,025 | 227,928 | 5.52 | 693,366 | 184,807 | 3.75 |
| MARZO | 1,407,700 | 228,142 | 6.17 | 945,026 | 211,585 | 4.47 |
| ABRIL | 872,006 | 180,762 | 4.82 | 707,847 | 177,062 | 4.00 |
| MAYO | 957,769 | 189,767 | 5.05 | 1,054,765 | 252,447 | 4.18 |
| JUNIO | 905,835 | 175,536 | 5.16 | 935,106 | 219,666 | 4.26 |
| JULIO | 658,834 | 133,520 | 4.93 | 1,075,808 | 183,705 | 5.86 |
| AGOSTO | 628,892 | 117,377 | 5.36 | 794,940 | 230,642 | 3.45 |
| SETIEMBRE | 714,084 | 160,049 | 4.46 | 788,967 | 128,385 | 6.15 |
| OCTUBRE | 879,820 | 112,657 | 7.81 | 1,281,987 | 330,262 | 3.88 |
| NOVIEMBRE | 551,691 | 106,386 | 5.19 | 805,572 | 213,937 | 3.77 |
| DICIEMBRE | 997,481 | 164,242 | 6.07 | 1,142,011 | 230,044 | 4.96 |
| TOTALES | 10,969,931 | 2,055,344 | 5.34 | 10,979,888 | 2,507,820 | 4.38 |
| PROMEDIO MES | 914,161 | 171,279 | | 914,991 | 208,985 | |
| % CRECIMIENTO ANUAL | 0% | -18% | 22% | -9% | 2% | -11% |

Fuente: Koo (2020)

Figura 8

Exportación maca 2019



Fuente: Koo (2020)

2.2.2. Secado

El secado, es una operación con transferencia de masa de contacto gas-sólido, que se caracteriza por la separación o eliminación (generalmente parcial) de la humedad de sólidos, mediante la vaporización de ésta, ya sea en el seno de una corriente gaseosa o no, para arrastrar el vapor producido (Ángeles, 2014).

Cuando un sólido húmedo es sometido a un proceso de secado térmico ocurren dos procesos simultáneamente: Transferencia de energía (calor) de los alrededores para evaporar la humedad de la superficie y transferencia de la humedad interna hacia la superficie del sólido (Universidad de las Américas de Puebla, 2019).

El secado de alimentos es un proceso de remoción de humedad. Su objetivo consiste en mejorar la estabilidad de un producto al estar éste almacenado, con un mínimo de requerimientos de empaque y reduciendo los pesos para su transportación (Quiminet, 2010).

a. Objetivos del secado

- Permitir el almacenamiento de un producto.
- Conservar el producto por un mayor tiempo.
- Permitir el aprovechamiento de los subproductos.
- Disminuir los costos de transporte.
- Facilitar procesos posteriores.

b. Características del secado

Cuando las partículas contienen humedad, y ésta ha sobrepasado el 30 %, esto quiere decir que la humedad ha llenado completamente todos los micro y macro capilares, la humedad excede el espacio libre de los capilares y forma una capa delgada de agua sobre la superficie de la partícula.

Cuando comienza el secado y el contenido de humedad es mayor que el contenido de humedad higroscópico, la velocidad de secado es casi constante debido a que la intensidad del secado es igual a la intensidad de evaporación de la superficie libre del líquido. Cuando la capa superficial de líquido está completamente evaporada, el proceso termina en los capilares. Así la intensidad de secado puede ser mayor, esto es porque la evaporación actual en la superficie puede ser mayor.

Si el contenido de humedad es menor que el higroscópico, la velocidad de secado decrece, principalmente debido a la retención de la superficie de evaporación (control de la difusión interna).

Se debe tomar en cuenta que el efecto de enfriamiento por evaporación cesa y la temperatura de la superficie del material empieza a incrementarse gradualmente casi hasta la temperatura del agente de secado (Universidad de las Américas de Puebla, 2018).

c. Velocidad de secado

Se define la velocidad de secado como la pérdida de humedad del sólido húmedo por unidad de tiempo, y más exactamente por el cociente diferencial $(-dX/d\theta)$ operando en condiciones constantes de secado, es decir con aire a las condiciones de temperatura, presión, humedad y velocidad constantes en el tiempo (Universidad Politécnica de Catalunya, 2016).

Analíticamente, la velocidad de secado se refiere por unidad de área de superficie de secado, de acuerdo con la ecuación:

$$N = \frac{L_s}{A} \left(-\frac{dX}{d\theta} \right) \quad (1)$$

Donde:

L_s = Masa del sólido seco;

A = Área de la superficie expuesta;

N = Velocidad de secado;

$-\frac{dX}{d\theta}$ = Diferencia de humedad respecto del tiempo.

d. Tiempo de secado

El tiempo de secado de un sólido húmedo se determina por la integración entre las humedades iniciales y finales de la ecuación de la velocidad de secado. Hecha la integración mencionada obtenemos:

$$\theta = \left(-\frac{L_s}{A}\right) \int_{x_f}^{x_i} \frac{dX}{N} \quad (2)$$

Para resolver esta ecuación, tenemos que conocer la velocidad de secado N que es función de la humedad (X). (Universidad Politécnica de Catalunya, 2017)

Si se desea determinar el tiempo de secado de un sólido bajo las mismas condiciones para las que se determinó experimentalmente una curva de secado, solo se necesita leer en la curva la diferencia en los tiempos que corresponden a los contenidos inicial y final de humedad.

Dentro de ciertos límites, es posible a veces estimar el aspecto de una curva de velocidad de secado para condiciones diferentes de aquellas fijadas o existentes en los experimentos.

En estos casos, para determinar el tiempo de secado se puede partir de la expresión que define la velocidad de secado (Ángeles, 2014):

$$N = -\left(\frac{L_s}{A}\right) \frac{dx}{d\theta} \quad (3)$$

Ordenando la ecuación y separando variables:

$$d\theta = -\left(\frac{L_s}{A}\right) \frac{dx}{N} \quad (4)$$

Tomando en cuenta que L_s y A son constantes e integrando en el lapso en que cambia el contenido de humedad desde su valor inicial X_1 hasta su valor final X_2 (Ángeles, 2014):

$$\begin{aligned}
\theta_1 = 0 &\rightarrow X = X_1 \\
\theta_2 = \theta &\rightarrow X = X_2 \\
\int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta &= -\left(\frac{L_s}{A}\right) \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{N} \\
\theta_{\text{secado}} &= -\left(\frac{L_s}{A}\right) \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{N} \tag{5}
\end{aligned}$$

Si no existe una expresión matemática que correlacione la velocidad de secado con el contenido de humedad, la integral deberá resolverse gráficamente, al calcular el área bajo la curva resultante de llevar $1/N$ como ordenada y X como abscisa, cuyos datos se obtienen de la curva de velocidad de secado (Ángeles, 2014).

Otra forma de calcular tiempo de secado, es tomando en cuenta los dos períodos de secado: el período ante-crítico o de velocidad constante y el período post-crítico o de velocidad decreciente (Ángeles, 2014).

$$\theta_{\text{secado}} = \theta_C + \theta_{PC} \tag{6}$$

$$\text{Si } X_{\text{inicial}} > X_C > X_{\text{final}} \rightarrow \theta_{\text{secado}} = \theta_C + \theta_{PC}$$

$$\text{Si } X_{\text{inicial}} \geq X_C \rightarrow \theta_{\text{secado}} = \theta_C$$

$$\text{Si } X_{\text{inicial}} \leq X_C \rightarrow \theta_{\text{secado}} = \theta_{PC}$$

Período ante-crítico: θ_C

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta = -\left(\frac{L_s}{A}\right) \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{N}$$

Como en este período la velocidad de secado es constante: $N = N_c$

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta = -(L_s/A) \cdot \frac{1}{N_c} \int_{X_1}^{X_2} dX$$

$$\theta_c = (L_s/A) \cdot \frac{1}{N_c} (X_1 - X_2) \quad (7)$$

Período post-crítico: θ_{PC}

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta = -(L_s/A) \cdot \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{N}$$

$$\theta_{PC} = -(L_s/A) \cdot \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{N} \quad (8)$$

Cuando la velocidad de secado varía linealmente con el contenido de humedad (Ángeles, 2014):

$$N = m X + b$$

$$\theta_{PC} = -(L_s/A) \cdot \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{mX + b}$$

$$\theta_{PC} = (L_s/A) \cdot \frac{1}{m} \cdot \ln \frac{mX_1 + b}{mX_2 + b} \quad (9)$$

Siendo $N_1 = m X_1 + b$ y $N_2 = m X_2 + b$, la pendiente está dada por:

$$m = \frac{N_1 - N_2}{X_1 - X_2}$$

$$\theta_{PC} = (L_s/A) \cdot \frac{X_1 - X_2}{N_1 - N_2} \cdot \ln \frac{N_1}{N_2} \quad (10)$$

Definiendo $N_m = \frac{N_1 - N_2}{\ln N_1 / N_2}$

$$\theta_{PC} = (L_s/A) \cdot \frac{1}{N_m} \cdot (X_1 - X_2) \quad (11)$$

Cuando la velocidad de secado varía linealmente con el contenido de humedad hasta alcanzar la humedad de equilibrio (Ángeles, 2014):

$$N = m (X - X^*)$$

$$\theta_{PC} = -(L_s/A) \cdot \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{m(X - X^*)}$$

$$\theta_{PC} = (L_s/A) \cdot \frac{1}{m} \cdot \ln \frac{X_1 - X^*}{X_2 - X^*}$$

$$m = \frac{N_C}{X_C - X^*}$$

$$\theta_{PC} = (L_s/A) \frac{X_C - X^*}{N_C} \cdot \ln \frac{X_1 - X^*}{X_2 - X^*} \quad (12)$$

e. Variables que influncian el tiempo de secado

Para la fase sólida (Ángeles, 2014):

- Estado de agregación de la fase sólida (estados o fases).
- Propiedades de transporte.

Para la fase gaseosa (Ángeles, 2014):

- Temperatura del gas
- Velocidad del gas.
- Humedad del gas.
- Dirección del flujo del gas.
- Propiedades de transporte.
- Temperaturas de bulbo húmedo, seco y rocío.

- **Transferencia de masa**

Si las operaciones cambian la composición de soluciones, entonces se conocen como operaciones de transferencia de masa.

Las operaciones de transferencia de masa se caracterizan por transferir una sustancia a través de otras a escala molecular. Por ejemplo, cuando el agua, por evaporación, pasa de una alberca a una corriente de aire que fluye sobre la superficie del agua, las moléculas de vapor de agua se difunden, a través de las moléculas de aire en la superficie, dentro de la masa de la corriente de aire, la cual las arrastra consigo. El fenómeno que nos interesa, principalmente, no es el movimiento como resultado de una diferencia de presión, como sucede cuando se bombea un líquido a través de una tubería. En los problemas por tratar, la transferencia de masa es un resultado de la diferencia de concentraciones, o gradiente, en donde la sustancia que se difunde abandona un lugar en que está muy concentrada y pasa a un lugar de baja concentración (Treybal, 1990).

- **Transferencia de calor**

El requisito básico para la transferencia de calor es la presencia de una diferencia de temperatura. No puede haber transferencia neta de calor entre dos medios que están a la misma temperatura. La diferencia de temperatura es la fuerza impulsora para la transferencia de calor. La velocidad de transferencia de calor en cierta dirección depende de la magnitud del gradiente de temperatura (la diferencia de temperatura por unidad de longitud o la razón de cambio de la temperatura en esa

dirección). A mayor gradiente de temperatura, mayor es la velocidad de la transferencia de calor (Cengel, 2004).

2.2.3. Métodos de Optimización

Los métodos de optimización nos permiten encontrar el valor que deben tener las variables para hacer óptima la función objetivo satisfaciendo las restricciones.

Los problemas de optimización se componen generalmente de:

- **Función Objetivo**

Medida cuantitativa del funcionamiento del sistema que se desea optimizar (maximizar o minimizar).

- **Variables**

Representan las decisiones que afectan el valor de la función objetivo.

- **Restricciones**

Conjunto de relaciones que se representan mediante ecuaciones e inecuaciones y ciertas variables están obligadas a satisfacer (Barquín, et al, 2010).

a. Superficie de Respuesta

La metodología de Superficie de Respuesta (figura 9) tiene como propósito obtener valores razonables de la variable respuesta y, además determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos. Tiene como objetivo final establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta (Sánchez, D., 2019).

El valor real esperado, η , que toma la variable de interés considerada está influido por los niveles de k factores cuantitativos, X_1, X_2, \dots, X_k esto significa que existe alguna función de X_1, X_2, \dots, X_k (que se supone continua en $X_i, \forall i = 1, \dots, k$) que proporciona el correspondiente valor de η para alguna combinación dada de niveles:

$$\eta = f(X_1, X_2, \dots, X_k) \quad (13)$$

de tal forma que la variable respuesta puede expresarse como:

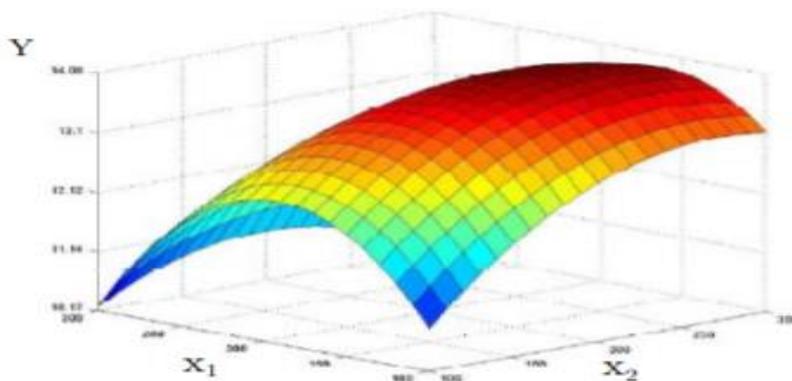
$$Y = \eta + \varepsilon = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + \varepsilon \quad (14)$$

donde ε es el error observado en la respuesta.

La relación $\eta = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$ existente entre η y los niveles de los k factores puede representarse a través de una hipersuperficie (subconjunto de un espacio euclídeo $(k+1)$ - dimensional) a la que llamaremos superficie de respuesta (Sánchez, 2019).

Figura 9

Superficie de respuesta tridimensional



Fuente: Sánchez, D. (2019)

2.3. Conceptual

2.3.1. Clasificación de los secadores

Con muy pocas excepciones, la mayoría de los productos de la industria actual experimenta secado en algún momento u otro. Un producto debe ser adecuado para el procesamiento o venta. Los materiales necesitan tener un contenido de humedad particular para el procesamiento, moldeo, o granulación. Los polvos deben ser secados a un contenido de humedad para un embalaje satisfactorio. Cuando los productos se calientan a altas temperaturas, como procesos metalúrgicos y de cerámica, el pre secado a temperaturas más bajas por delante de los hornos de cocción es ventajosa para ahorrar energía. Coste de transporte (como en el caso del carbón) depende del contenido de humedad del producto, y debe establecerse un equilibrio entre el coste de transporte y el coste de secado. El secado excesivo es un desperdicio; no sólo es más calor, es decir, es más gasto involucrado de lo que es necesario, pero a menudo resulta en un producto degradado, como en el caso del papel y madera. Se deben considerar los métodos involucrados en el ahorro de energía en los secadores. Ejemplos de productos y los tipos de precauciones que deben darse durante el secado. (Mujumdar, 2006).

El secador más utilizado es el tipo de recirculación y el compartimento de la bandeja secadora. La mayoría de los productos farmacéuticos y productos químicos finos requieren secado antes del envasado. Se utilizan grandes turbo-bandeja y secadores de circulación. Los productos

excesivamente sensibles al calor, como los antibióticos y el plasma sanguíneo, exigen un tratamiento especial, como la liofilización o el secado en bandeja de alto vacío. Los secadores rotativos continuos se usan generalmente para manejar grandes tonelajes de minerales naturales, minerales y productos químicos pesados. La mayor demanda de equipos de secado es para el secado continuo de papel, que se realiza en cilindros o secaderos. Las condiciones de temperatura y humedad son importantes para la consistencia del papel (Mujumdar, 2006).

El secado térmico es esencial en los productos alimenticios y campos agrícolas. El secado por pulverización y la liofilización también son ampliamente utilizados. En la industria cerámica, el secado es una operación vital. Se debe tener mucho cuidado debido a la retracción considerable que ocurre en el secado. Por lo tanto, el control de la humedad es importante. Para muchos productos químicos a granel, las consideraciones de manejo determinan los requisitos de contenido de humedad. Para alimentos, retención de sabor, palatabilidad y las propiedades de rehidratación son importantes (Mujumdar, 2006).

La madera debe conservar su resistencia y propiedades decorativas después del secado. La elección del contenido final de humedad está dictada en gran medida por los requisitos de almacenamiento y estabilidad. El contenido de humedad final determina el tiempo y las condiciones de secado requeridos para el secado. Se debe evitar el secado excesivo. Los

gradientes internos de humedad dentro de las partículas y la variación del contenido de humedad entre partículas son importantes (Mujumdar, 2006). Las restricciones de temperatura pueden surgir debido a degradación, cambios de fase, decoloración y manchas, inflamabilidad del polvo y otros factores. La sensibilidad térmica fija la temperatura máxima a la cual la sustancia puede ser expuesta durante el tiempo de secado. En los secadores por pulverización y neumáticos, el tiempo de retención de unos segundos permite secar materiales sensibles al calor a temperaturas más altas. Muchos materiales higroscópicos se contraen al secarse. El grado de contracción está linealmente relacionado con el cambio del contenido de humedad por debajo del límite higroscópico (Mujumdar, 2006).

La primera subdivisión se basa en métodos de transferencia de calor, a saber: (a) calentamiento por conducción, (b) calentamiento por convección, (c) calentamiento radiante, y (d) calentamiento dieléctrico. La liofilización se clasifica como un caso especial de calentamiento por conducción. La siguiente subdivisión es el tipo de recipiente de secado: bandeja, tambor rotatorio, lecho fluidizado, neumático o pulverizador. También se ha realizado la clasificación del secador según la forma física del pienso (Mujumdar, 2006).

Sloan (1985) ha identificado unos 20 tipos de secadores y los ha clasificado según sean discontinuos o continuos, conduzca el intercambio de calor a través del contacto directo con los gases o por intercambio de calor a través de las paredes del recipiente y de acuerdo con el movimiento del equipo.

Tal clasificación, aunque útil para distinguir y describir sistemas discretos, no va mucho en relacionar los sistemas discretos con los problemas del proceso que se supone que deben manejar (Mujumdar, 2006).

McCormick (1985) ha tratado de abordar el problema desde el punto de vista del usuario. Un total de 19 tipos de secadores se clasificaron de acuerdo a lo bien que manejan diferentes materiales (Mujumdar, 2006).

Schlünder (1984) ha dado una clasificación de secadores que abarca el estado físico del producto, así como el tiempo de permanencia del producto en el secador. Para tiempos de secado muy cortos (< 1 min), se utilizan secadores de flash, spray o tambor. Para tiempos de secado muy largos (> 1 h), sólo son apropiados los secadores de túneles, camiones o transportadores. La mayoría de los secadores operan en el rango intermedio, para lo cual hay disponible un surtido muy amplio de secadores (Mujumdar, 2006).

La tabla 4 da un resumen del tipo de secador frente al tipo de materia prima, que puede ser una suspensión, pasta, torta de filtro, polvo, gránulos, cristal, gránulo o material fibroso o conformado (Mujumdar, 2006).

Tabla 4

Selección del secador vs. forma de la materia prima

| | Líquidos | | | Tortas | | Sólidos de flujo libre | | | | | Sólidos de forma dura |
|---|------------|------------|-----------|--------|---------|------------------------|----------|-----------|---------|--------|--------------------------------|
| | Suspensión | Suspensión | Pastillas | Ceñas | Filtros | Polvos | Gránulos | Crustales | Pellets | Fibras | |
| Secadores convectivos | | | | | | | | | | | |
| Secador de faja transportadora | | | | | | | X | X | X | X | X |
| Secador Flash | | | | X | X | X | X | | | X | |
| Secador de lecho fluidizado | X | X | | X | X | X | X | | X | | |
| Secador rotatorio | | | | X | X | X | X | | X | X | |
| Secador spray | X | X | X | | | | | | | | |
| Secador de bandejas (Batch) | | | | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Secador de bandejas (continuo) | | | | X | X | X | X | X | X | X | |
| Secadores conductivos | | | | | | | | | | | |
| Secador de tambor | X | X | X | | | | | | | | |
| Secador rotatorio con chaqueta de vapor | | | | X | X | X | X | | X | X | |
| Secador rotatorio de tubos de vapor | | | | X | X | X | X | | X | X | |
| Secador de bandejas (Batch) | | | | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Secador de bandejas (continuo) | | | | X | X | X | X | X | X | X | |

Fuente: Mujumdar (2006)

2.3.2. Secadores Batch

En los secadores batch o por lotes, como los secadores de bandejas o rotatorios, los alimentos se cargan en bandejas en una cámara y se dejan hasta que se completa el secado. En las secadoras de armario, una serie de bandejas que contienen los alimentos se apilan en un armario aislado, con suficiente espacio entre las bandejas para permitir el flujo de aire. El aire ingresa al gabinete, se calienta y se fuerza en paralelo a las bandejas, luego sale (Kerr, 2009).

Los deflectores generalmente se proporcionan para dirigir el aire y evitar la mezcla de las corrientes de aire de entrada y salida. Aunque de diseño simple, los secadores de armario tienen un rendimiento limitado y el secado a menudo no es uniforme en todo el espacio de secado. En algunos casos, las bandejas se giran manualmente para fomentar un secado más uniforme. Son más adecuados para recorridos de producción pequeños o medianos o para instalaciones piloto. Los tiempos de secado están determinados por el período entre la carga y la descarga del producto. Los productos relativamente delgados que incluyen frutas, verduras, carnes o dulces se secan en bandeja. Los secadores de aire deshumidificados con bomba de calor intentan mejorar la eficiencia energética y la calidad del producto. El corazón del sistema utiliza una bomba de calor, un dispositivo que utiliza un compresor y refrigerante en circulación para eliminar el calor de un espacio de temperatura relativamente baja y transferirlo a un espacio de temperatura relativamente alta. A medida que un evaporador elimina el calor de una corriente de aire, el agua se condensa y reduce la humedad del aire. El refrigerante transfiere el calor y lo libera en un condensador a medida que cambia de gas a líquido. Este calor se usa para calentar la corriente de aire que entrará en contacto con los alimentos. El aire con menor humedad promueve una mejor transferencia de masa de agua lejos del producto (Kerr, 2009).

2.3.3. Secador rotatorio discontinuo

Un secador rotatorio discontinuo (figura 10) puede ayudar a promover un secado uniforme y más rápido, para partículas sólidas. El equipo en general consta de un cilindro de vidrio o acero inoxidable (cámara de secado), acoplado horizontalmente a un motor que permitirá controlar la velocidad de rotación (sin ángulo de inclinación, ya que es un equipo discontinuo) y a una fuente de suministro de aire caliente.

En el caso de tener una cámara de secado de acero, cuenta con paletas soldadas en las paredes, con el fin de hacer caer el producto en el aire. En una variante, se utilizan persianas para que el producto se mezcle y enrolle en lugar de soltarlo. En los secadores rotatorios directos, el aire pasa a través de quemadores y entra directamente en contacto con el producto. Los secadores rotatorios se han utilizado para secar semillas, gluten de maíz, granos de destilería y algunas frutas (Kerr, 2009).

Figura 10

Secador rotatorio discontinuo



2.4. Definición de términos básicos

Cinética del secado: Pérdida de humedad del sólido húmedo en la unidad de tiempo, por unidad de área de la superficie del sólido expuesta al secado, trabajando en condiciones constantes (Ángeles, 2014).

Humedad en base húmeda (x): Es la humedad contenida en un sólido, expresada como la fracción masa de la humedad en el sólido húmedo (Ángeles, 2014).

Humedad en base seca (X): Es la humedad contenida en un sólido, expresada como la relación entre la masa de la humedad y la del sólido seco (Ángeles, 2014).

Humedad crítica: La humedad crítica de un sólido es el punto que separa los dos periodos de secado antecrítico y postcrítico (Universidad Politécnica de Catalunya, 2021).

Humedad de equilibrio: Es el límite al cual puede llevarse el contenido de humedad de un sólido, cuando éste se pone en contacto con un gas por un tiempo suficiente y en condiciones determinadas (Ángeles, 2014).

Periodo antecrítico: Es el periodo de tiempo en el que la velocidad de secado es constante, desde la humedad inicial hasta la humedad crítica. (Universidad Politécnica de Catalunya, 2021).

Periodo postcrítico: Es el periodo de tiempo en el que la velocidad de secado disminuye hasta llegar a un valor de cero. Este periodo empieza

con la humedad crítica hasta la humedad de equilibrio (Universidad Politécnica de Catalunya, 2021).

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

Los parámetros óptimos de operación para el secado de la maca nos permitirán reducir significativamente la humedad de la materia prima.

3.1.2. Hipótesis específicas

- a. Las curvas obtenidas nos mostrarán el efecto de la temperatura y la velocidad de aire caliente del secador rotatorio discontinuo experimental sobre la humedad final de la maca (*Lepidium meyenii Walp.*).
- b. La cantidad de proteínas totales en la maca (*Lepidium meyenii Walp.*) nos ayudará a determinar los parámetros óptimos de secado.

3.2. Definición conceptual de variables

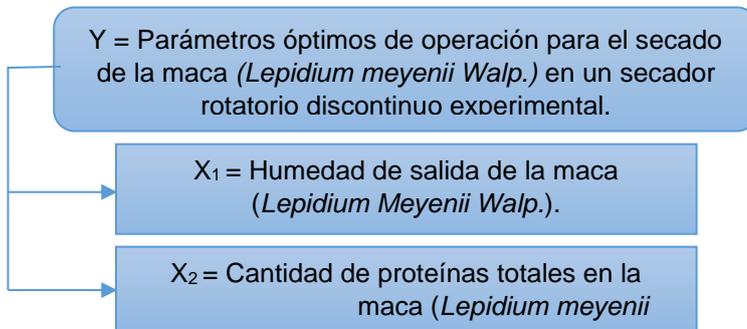
La presente investigación se caracteriza por ser longitudinal, estudiando la variable a lo largo del tiempo establecido, por ser este el determinante en la relación causa efecto.

Por su naturaleza, todas las variables identificadas son del tipo cualitativas, por su dependencia, Y es dependiente, y las variables X_1 y X_2 son independientes.

Es decir: $Y=f(X_1, X_2)$. La figura 11 muestra la relación entre las variables.

Figura 11

Relación de las variables de la investigación



3.2.1. Operacionalización de variables

En la tabla 5 presenta la operacionalización de las variables de investigación.

Tabla 5

Operacionalización de variables

| VARIABLE DEPENDIENTE | DIMENSIONES | INDICADORES | MÉTODO |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| Y = Parámetros óptimos de operación para el secado de la maca (<i>Lepidium Meyenii Walp.</i>) en un secador rotatorio discontinuo experimental. | -Temperatura - Velocidad de aire | - °C - m/s | - Análisis estadístico: superficie de respuesta |
| VARIABLES INDEPENDIENTE | DIMENSIONES | INDICADORES | MÉTODO |
| X ₁ = Humedad de salida de la maca (<i>Lepidium Meyenii Walp.</i>). | - Humedad | - gH ₂ O/gss | - Corridas de secado a diferentes condiciones. |
| X ₂ = Cantidad de proteínas totales en la maca (<i>Lepidium Meyenii Walp.</i>). | - Cantidad de proteínas totales | - g de proteínas / 100g de producto | - Análisis de proteínas utilizando el método de Bradford - UV VIS. |

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1. Tipo y diseño de investigación

A continuación, se detallará el tipo de investigación utilizado, así como el diseño de la investigación.

4.1.1 Tipo de investigación

Los tipos de investigación que se realizarán en el presente trabajo de tesis son:

Por su finalidad, es de tipo aplicada, pues sus resultados tienen una aplicación práctica.

Por su diseño interpretativo es experimental porque permitirá manipular el factor causal para determinar el efecto deseado.

Por el énfasis de la naturaleza de los datos manejados es del tipo cuantitativo porque las variables de la investigación son cuantitativas.

Para la elaboración de la tesis se plantea tres etapas de investigación, en las cuales inicialmente se identificarán las dos variables específicas (X_1 y X_2) y se modelará la variable principal (Y).

4.1.2. Diseño de la investigación

Las etapas de investigación y el diseño experimental se explican en los apartados siguientes.

a. Primera etapa de la investigación

Inicialmente, se acondicionó la materia prima (maca), para posteriormente utilizar las muestras en las pruebas de secado. Para ello se realizaron

registros del peso hasta obtener un valor constante. Las muestras secas se molieron.

b. Segunda etapa de la investigación

En esta etapa se analizaron las muestras provenientes del secado. Para esto se utilizó el análisis instrumental y se hizo uso del método de Bradford para la cuantificación de proteínas.

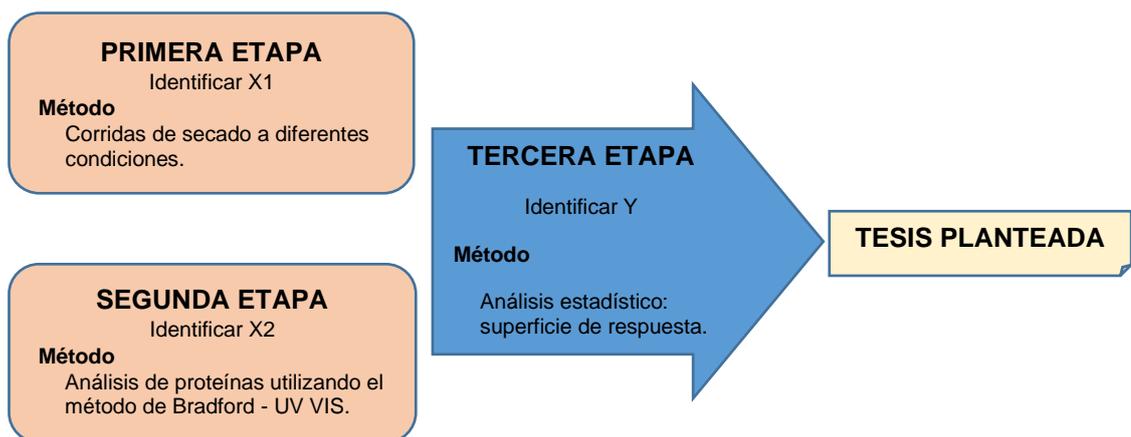
c. Tercera etapa de la investigación

Finalmente, se relacionaron los parámetros de secado con la variable de respuesta (contenido de proteínas) a través de la metodología de superficie de respuesta, que permitió conocer las condiciones óptimas de secado.

El esquema de las etapas de investigación se muestra en la figura 12.

Figura 12

Diseño de la investigación



Se realizó un diseño experimental factorial completo para 2 factores (temperatura y velocidad de aire caliente) con 4 y 2 niveles respectivamente. El diseño se hizo a través del programa Minitab y el

número de experimentos que se realizaron se detallan en la tabla 6, los cuales se hicieron por triplicado. En total se realizaron 24 pruebas de secado.

Tabla 6

Diseño experimental

| Prueba | T (°C) | v (m/s) |
|--------|--------|---------|
| 1 | 50 | 1.57 |
| 2 | 50 | 2.63 |
| 3 | 55 | 1.57 |
| 4 | 55 | 2.63 |
| 5 | 60 | 1.57 |
| 6 | 60 | 2.63 |
| 7 | 65 | 1.57 |
| 8 | 65 | 2.63 |

4.2. Método de investigación

Los métodos utilizados fueron los siguientes:

- Método observacional.
- Método experimental.
- Método analítico.

4.3. Población y muestra

La población está representada por la maca amarilla que se cultiva en el distrito de Carhuamayo, provincia de Junín, departamento de Junín.

En el caso del presente trabajo, no es aplicable la determinación del tamaño de muestra mediante algún método estadístico, ya que la cantidad de muestra está limitada a la cantidad que puede ingresarse por la cámara de secado del equipo disponible. La cantidad de muestra que puede

ingresarse al equipo es de 20 g de maca fresca (cortada en cubos) por triplicado.

4.4. Lugar de estudio y período desarrollado

Las pruebas experimentales se desarrollaron en el Laboratorio de Investigación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao, en el período diciembre 2019 – marzo 2020.

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

4.5.1. Acondicionamiento de la materia prima

La materia prima se recolectó y se acondicionó para las pruebas. Los frutos de maca se lavaron, se secaron y se seleccionaron (se eliminaron algunos frutos en malas condiciones). Seguidamente se pelaron y cortaron en cubos de 0.5 cm de lado para realizar las pruebas de secado (figura 13). La muestra correspondiente a cada prueba fue de 20 g y se colocó en una bolsa de organza.

Figura 13

Muestras acondicionadas para el secado



4.5.2. Secado de las muestras

Seguidamente se procedió a realizar los ensayos experimentales con el secador rotatorio discontinuo experimental en el laboratorio de investigación, y se realizó mediante el método de secado y pesadas, hasta encontrar un peso constante en las tres últimas tomas de datos.

El control de la temperatura se hizo de forma manual, a través de un controlador de temperatura digital, se trabajó con una termocupla adaptada a dicho controlador. Se verificó que la termocupla se mantenga en la parte central de la cámara de secado para que de esta forma se lleve correctamente el control de temperatura en la operación de secado. Existieron fluctuaciones en la temperatura de secado de ± 0.5 °C.

Se realizaron mediciones de la velocidad de aire caliente antes y al final de cada prueba de secado. La verificación de la velocidad de aire se realizó a través de un anemómetro digital (con fluctuaciones de ± 0.05 m/s) y dio como resultado los valores numéricos mencionados a lo largo de la presente investigación.

Posteriormente se construyeron las curvas de secado y velocidad de secado con los datos obtenidos a diferentes condiciones de temperatura (50 °C, 55 °C, 60 °C y 65 °C), velocidad de aire caliente (1.57 m/s y 2.63 m/s) y velocidad de rotación del secador rotatorio discontinuo experimental (10 rpm).

Posteriormente, las muestras correspondientes a cada prueba de secado fueron molidas (figura 14) y tamizadas en un tamaño de malla # 20.

Figura 14

Muestras de maca molida



Las especificaciones de las partes del secador rotatorio discontinuo experimental utilizado se muestran a continuación (Ávalos y Carrillo, 2019)

Carcasa

- Longitud de la cámara de secado: 62 cm
- Diámetro de la cámara de secado: 12 cm
- Capacidad de carga: 1141.3 cm³ (es el 15 % de la capacidad del equipo)
- Material: Vidrio
- Bridas laterales con espesor de 5 mm
- Diámetro del eje de la cámara de secado: 1 ¼"
- Válvulas: 3 tipo bola

Motor

- Marca: Siemens
- Potencia: 0.75 HP
- Frecuencia: 60 Hz
- Voltaje: 220 V

Pistola de aire caliente

- Marca: Stanley
- Potencia: 1800 W
- Boquilla: Cilíndrica
- Número de interruptores: 2
- Temperatura: 50-450 °C
- Flujo de aire: 300/500 L/min
- Velocidad de aire: 1.57/2.63 m/s

Figura 15

Secador rotatorio discontinuo experimental



El molino utilizado fue de tipo Wiley, y se muestra a detalle en la figura 16.

Figura 16

Molino de laboratorio TE-650/1 tipo Wiley



Los instrumentos utilizados en esta parte de la investigación se listan a continuación:

- Cronómetro
- Cuchillo
- Guantes
- Balanza digital con tres dígitos decimales
- Controlador digital de temperatura con termocupla
- Anemómetro digital Benetech GM 816

4.5.3. Análisis de proteínas

Este método involucra la unión del colorante Azul Brillante de Coomassie G-250 a las proteínas, provocando un cambio en el máximo de absorción de 465 a 595 nm. El ensayo es muy reproducible y rápido, puede ser empleado

para procesar un gran número de muestras y es adaptable a la automatización (García, H. y Vázquez R., 1998).

El método está basado en la observación de que el colorante Azul Brillante de Coomasie G-250 presenta dos formas coloreadas, azul y rojo. El color rojo pasa a azul cuando el colorante se une a la proteína (figura 17). La formación del complejo colorante-proteína toma aproximadamente 2 minutos y permanece estable por 1 hora, por lo que el procedimiento es muy rápido y el tiempo para el ensayo no es limitante.

Figura 17

Acomplejamiento de proteína con el colorante Azul de Coomasie G-250

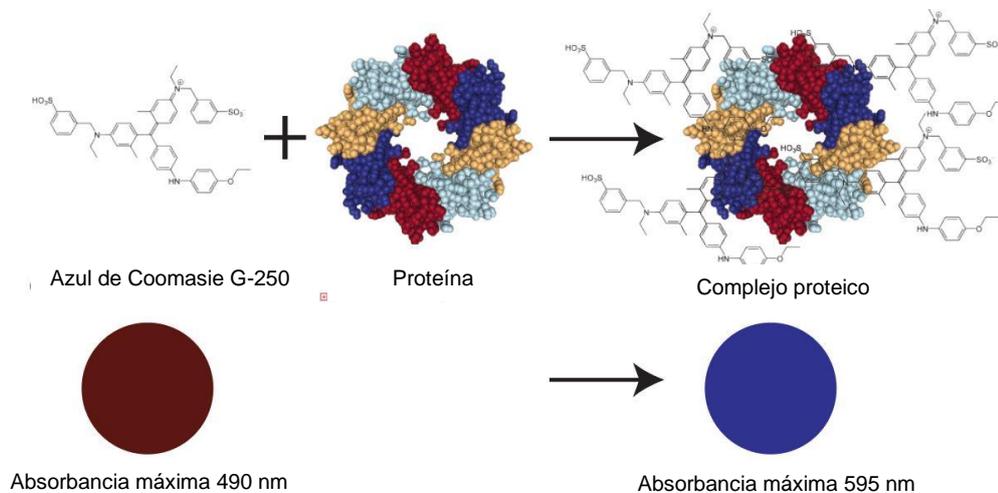


Figura 18

Espectrofotómetro Thermo Scientific Genesys 10S UV-Vis



- Azul de Coomasie G-250 (Sigma-Aldrich)
- Metanol absoluto (Sigma-Aldrich)
- Ácido fosfórico (Sigma-Aldrich)
- Agua destilada

4.6. Análisis y procesamiento de datos

Con los datos recopilados en la parte experimental (pruebas de secado y análisis de proteínas) se realizó un análisis estadístico de dicha información para determinar cuáles son los parámetros óptimos de operación para el secado de la maca (*Lepidium meyenii Walp.*) en un secador rotatorio discontinuo experimental. El método de análisis que se utilizó es el de superficie de respuestas, apoyado en el software Minitab 20. Adicionalmente se presentan los cuadros del análisis de varianza (ANOVA) correspondientes a las optimizaciones.

V. RESULTADOS

5.1. Resultados descriptivos

5.1.1. Proteínas de la maca fresca

Se realizó el análisis de proteínas mencionado en la sección metodológica, en la muestra de maca fresca, para tener el valor como un indicador de este parámetro por efecto de la aplicación de aire caliente. El resultado del valor promedio (que se hizo por triplicado) se muestra en la tabla 7.

Tabla 7

Concentración de proteínas totales en las muestras analizadas

| Prueba | C (g/100g) |
|----------------|-------------------|
| Muestra fresca | 15.240 |

5.1.2. Secado de la maca

En las figuras 19-26, mostradas a continuación se presentan las curvas de secado para las pruebas realizadas. Los datos utilizados para la construcción de estas curvas se encuentran en el Anexo 3.

Figura 19

Curva de secado para 50°C y 1.57 m/s

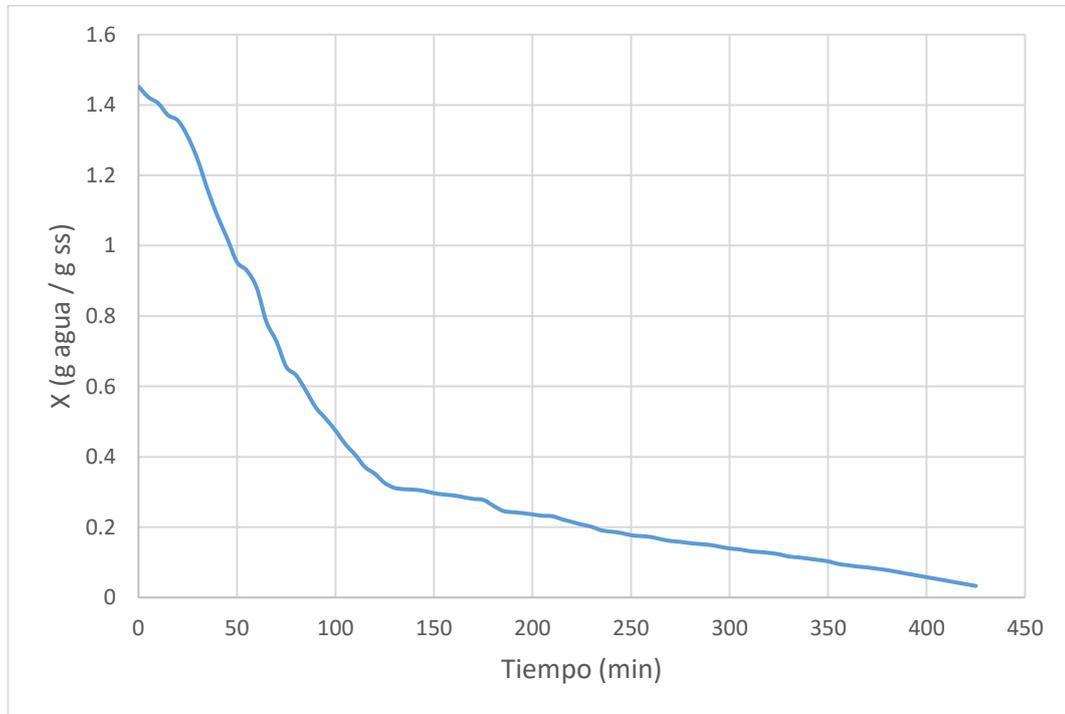


Figura 20

Curva de secado para 55°C y 1.57 m/s

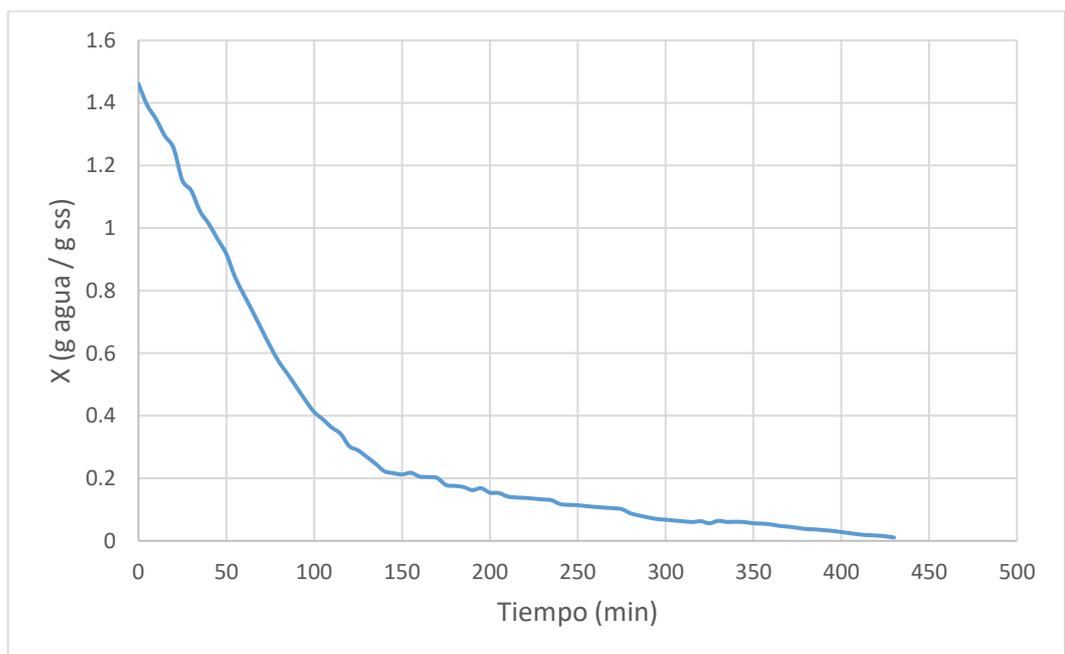


Figura 21

Curva de secado para 60°C y 1.57 m/s

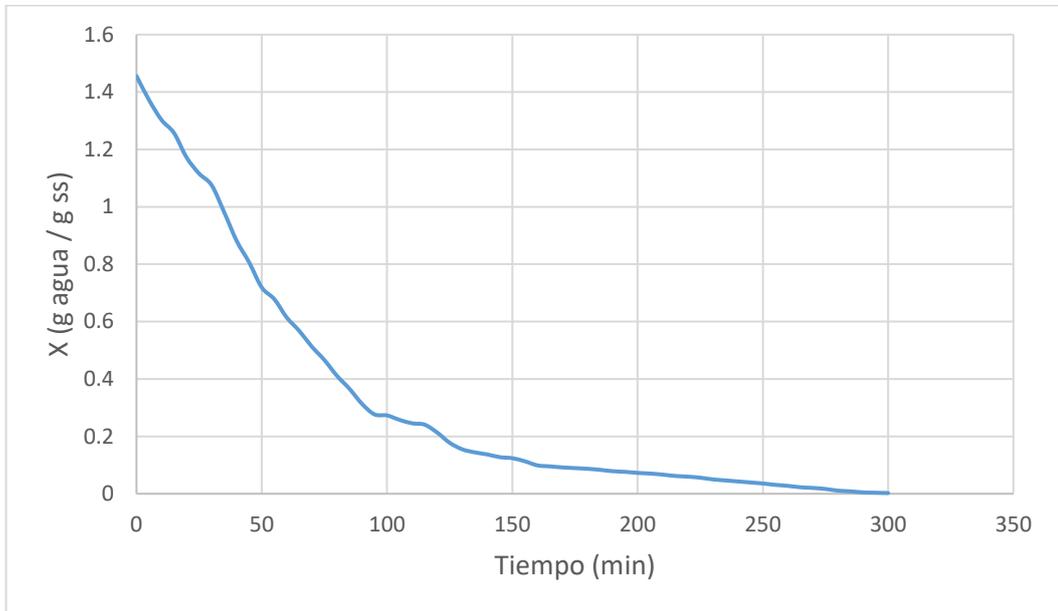


Figura 22

Curva de secado para 65°C y 1.57 m/s

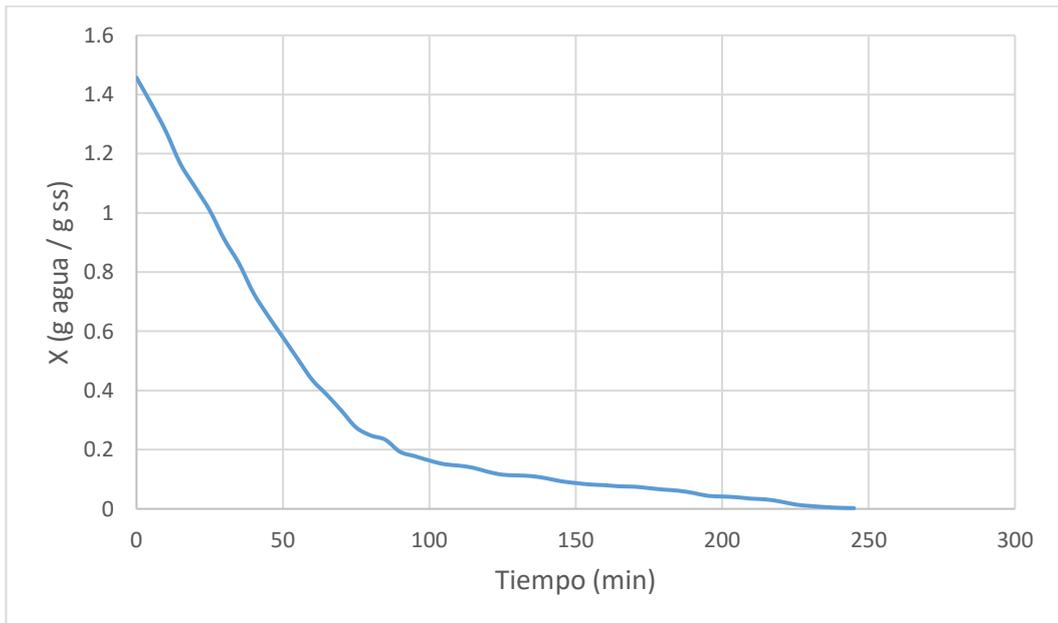


Figura 23

Curva de secado para 50°C y 2.63 m/s

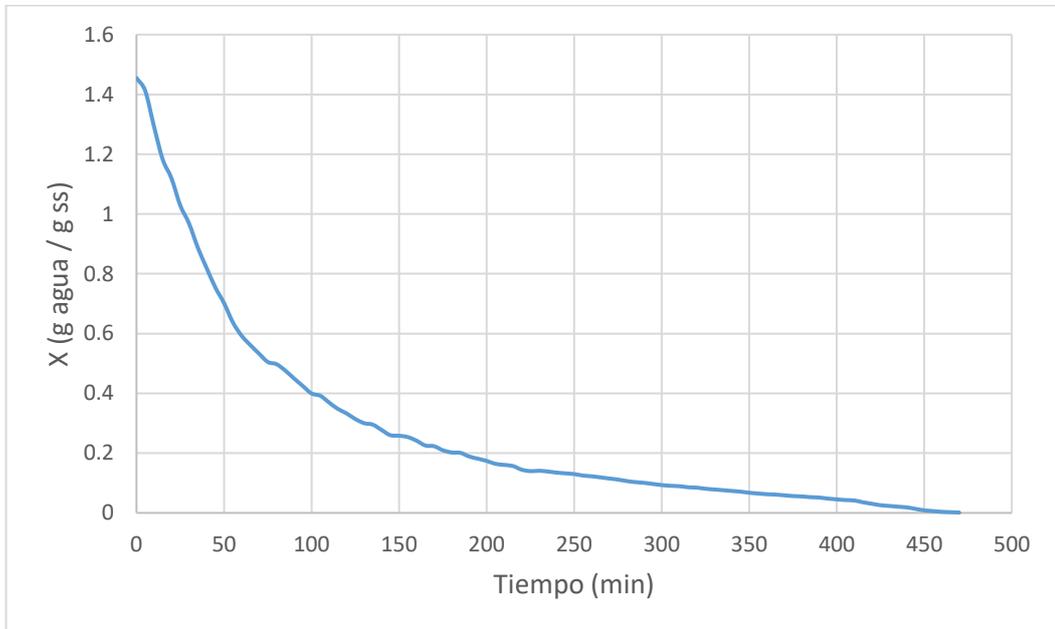


Figura 24

Curva de secado para 55°C y 2.63 m/s

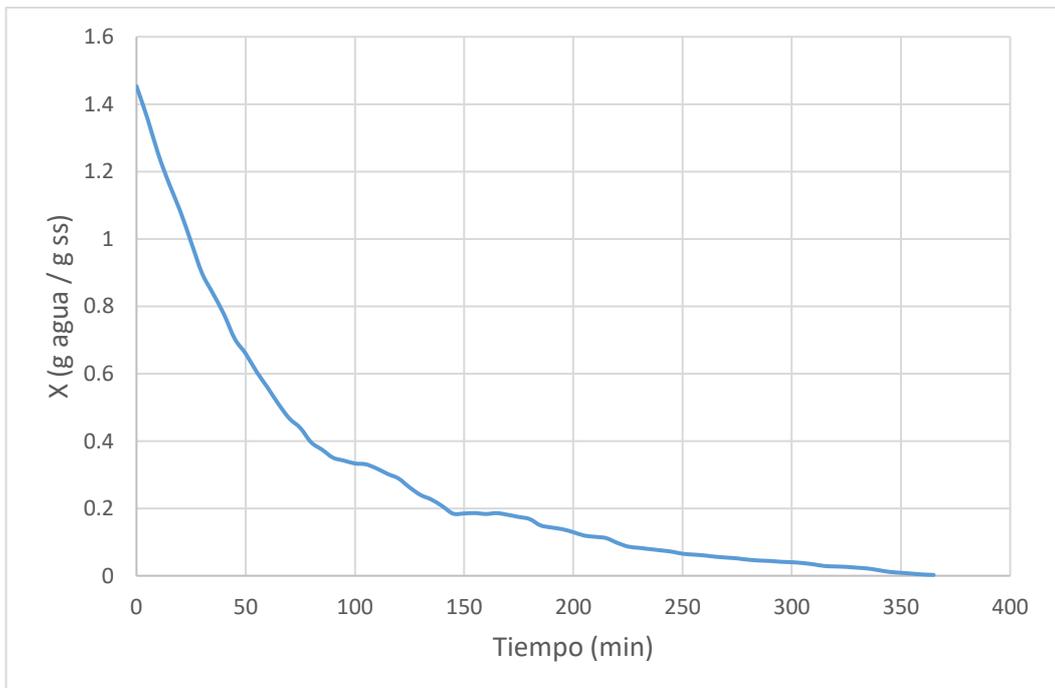


Figura 25

Curva de secado para 60°C y 2.63 m/s

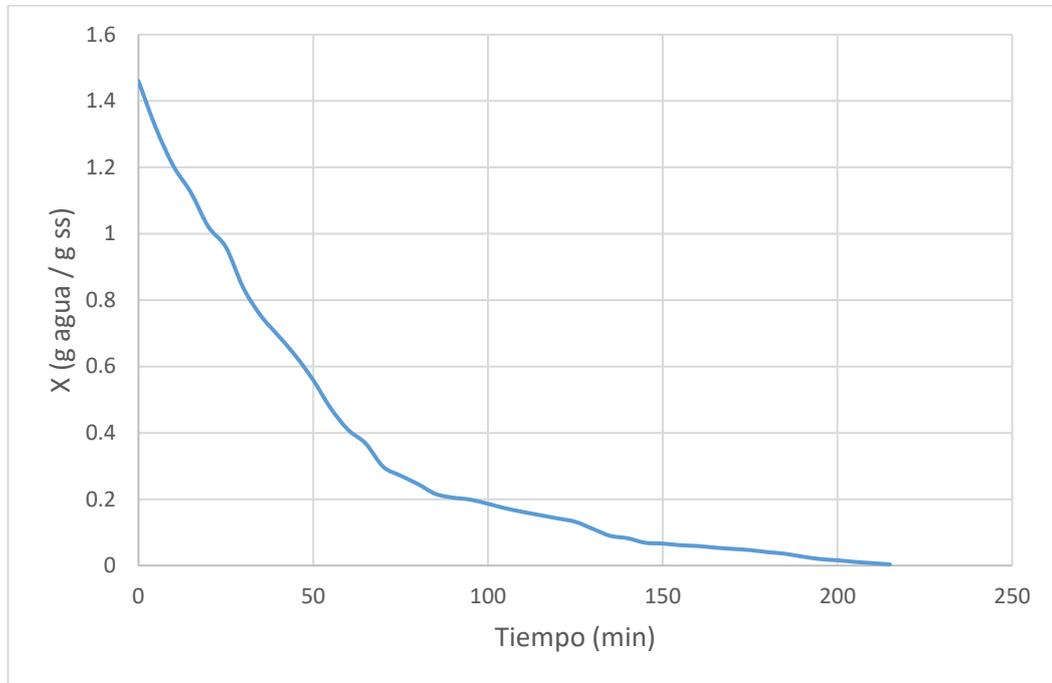
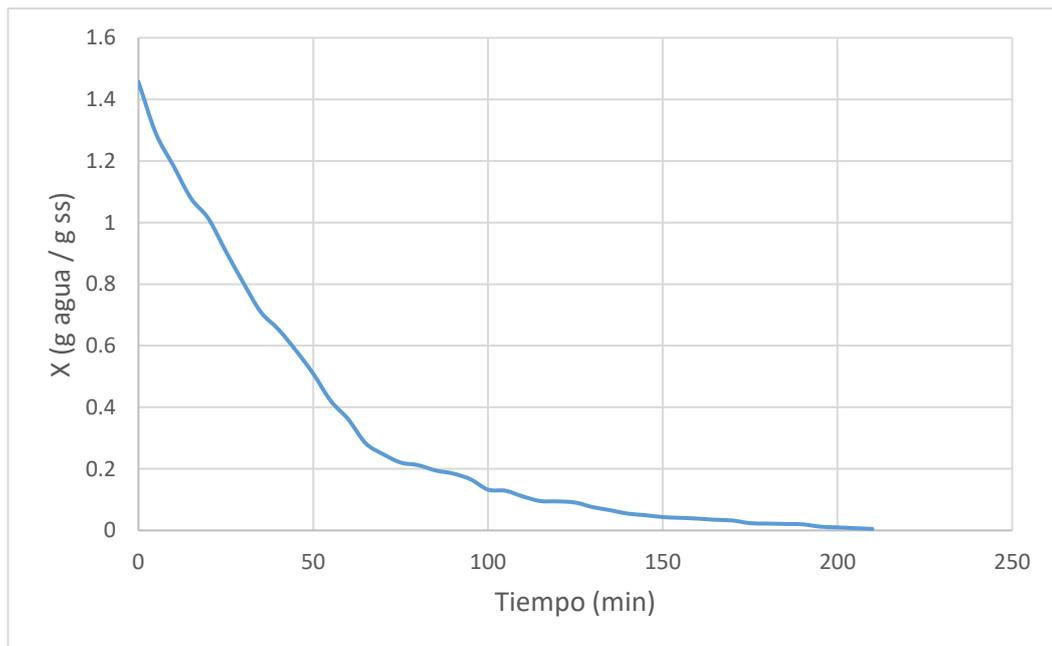


Figura 26

Curva de secado para 65°C y 2.63 m/s



Además, se construyeron las curvas de velocidad de secado. Las gráficas de la zona de velocidad de secado constante se muestran en el anexo 4, mientras que las gráficas de las zonas de velocidad decreciente se muestran en las figuras 27-34, las mismas que permiten obtener los valores de humedad de equilibrio para todos los casos.

Figura 27

Curva de velocidad de secado decreciente para 50°C y 1.57 m/s

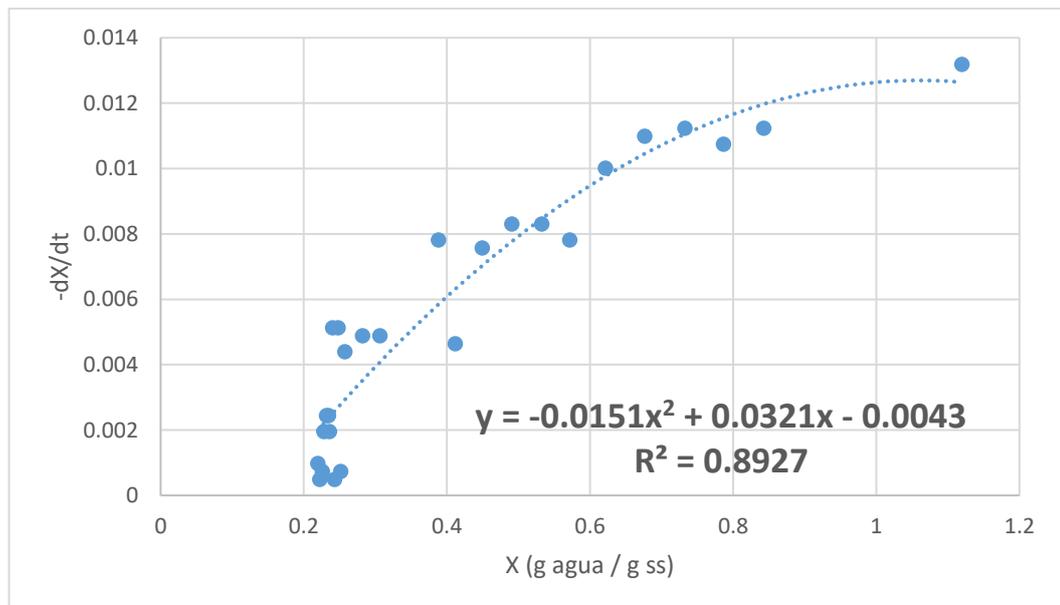


Figura 28

Curva de velocidad de secado decreciente para 55°C y 1.57 m/s

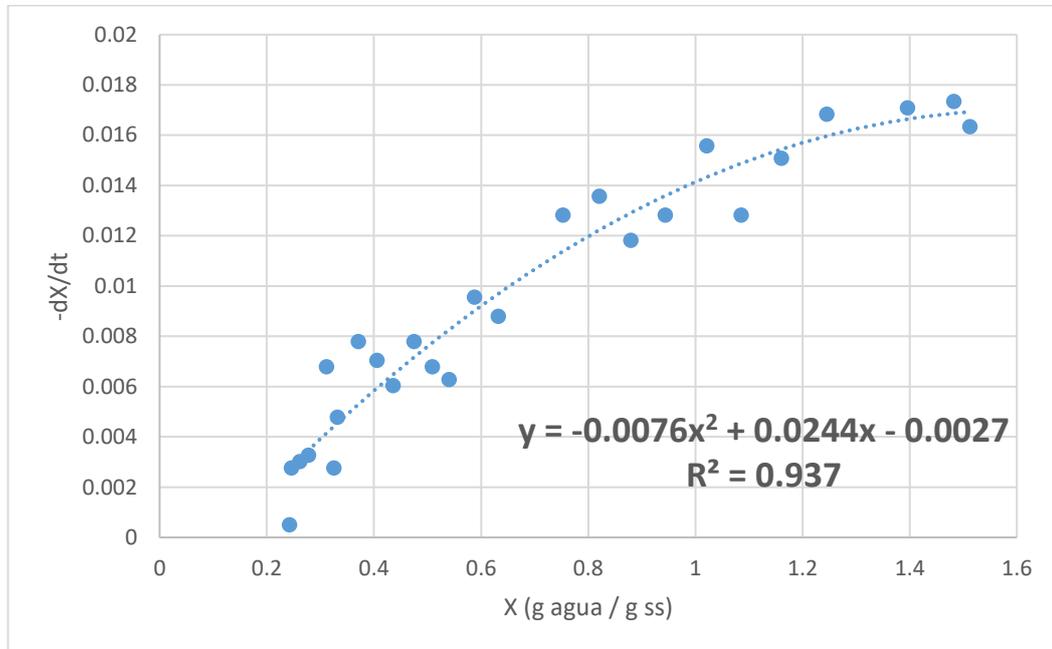


Figura 29

Curva de velocidad de secado decreciente para 60°C y 1.57 m/s

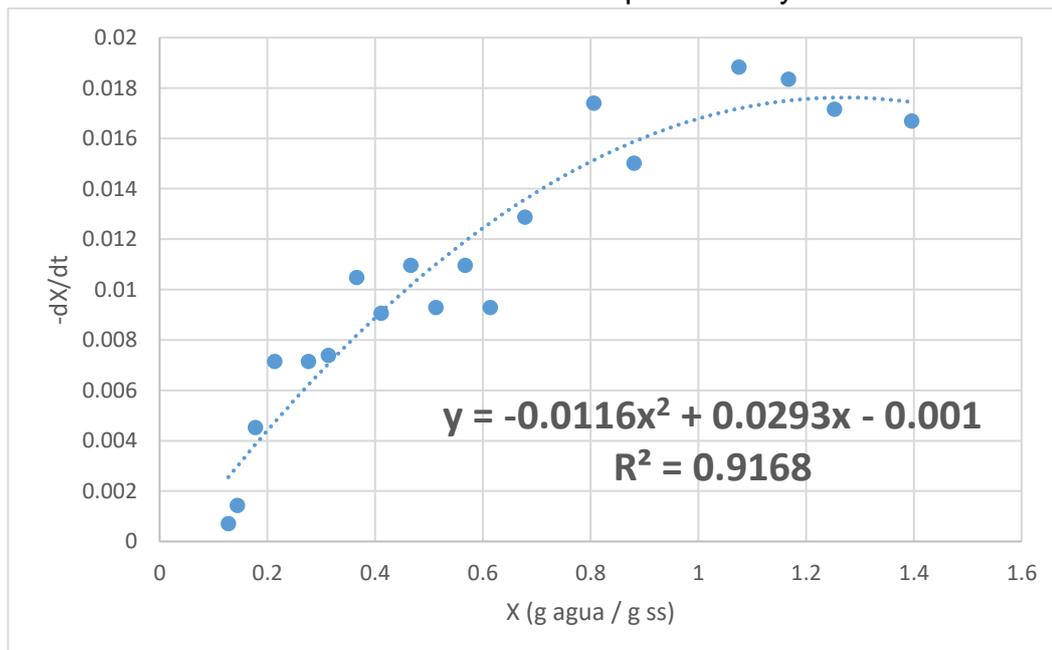


Figura 30

Curva de velocidad de secado decreciente para 65°C y 1.57 m/s

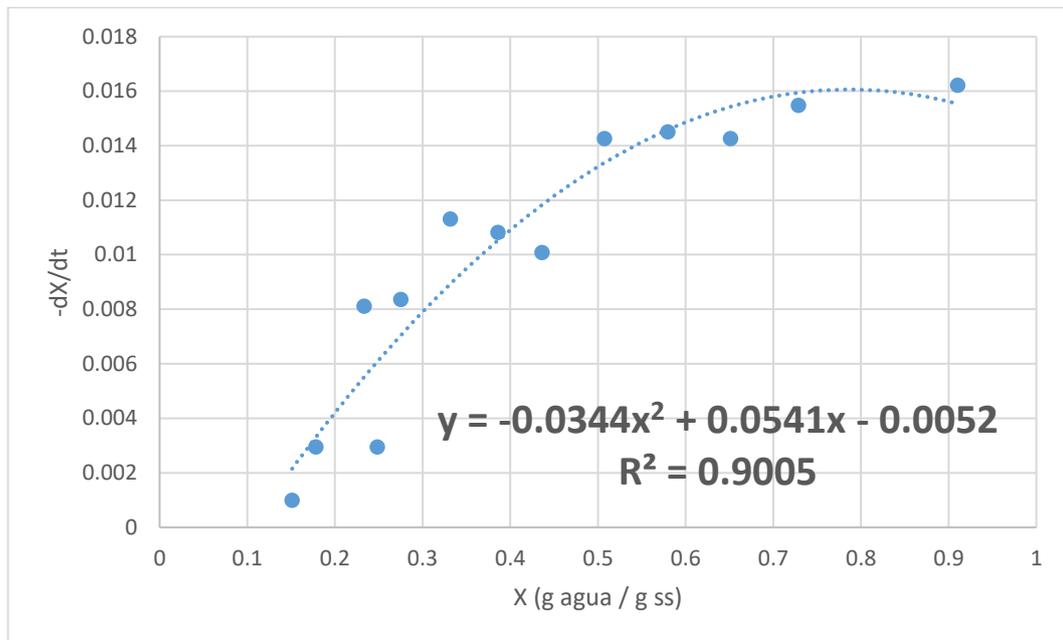


Figura 31

Curva de velocidad de secado decreciente para 50°C y 2.63 m/s

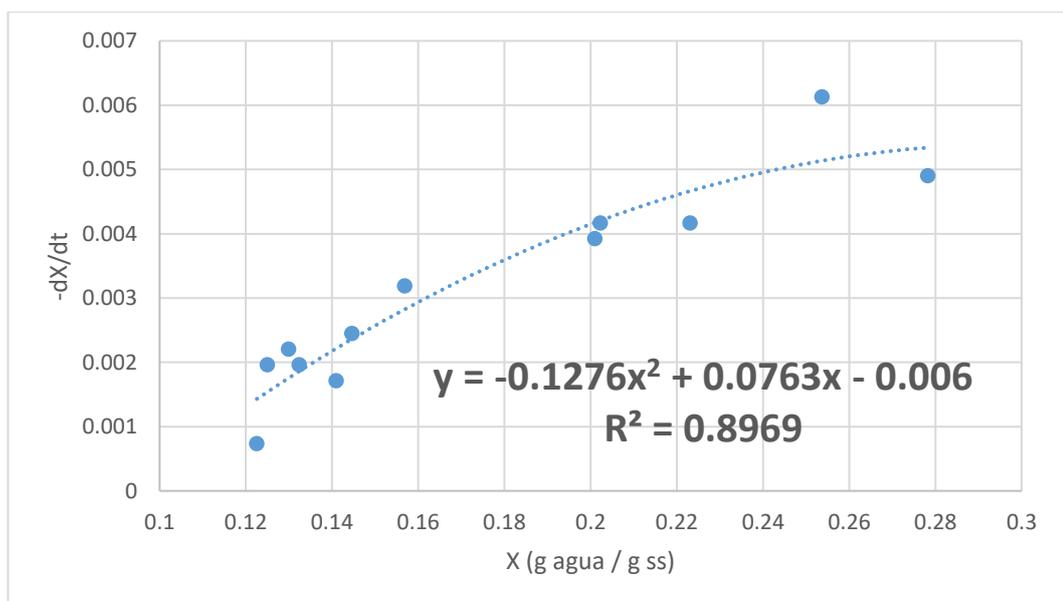


Figura 32

Curva de velocidad de secado decreciente para 55°C y 2.63 m/s

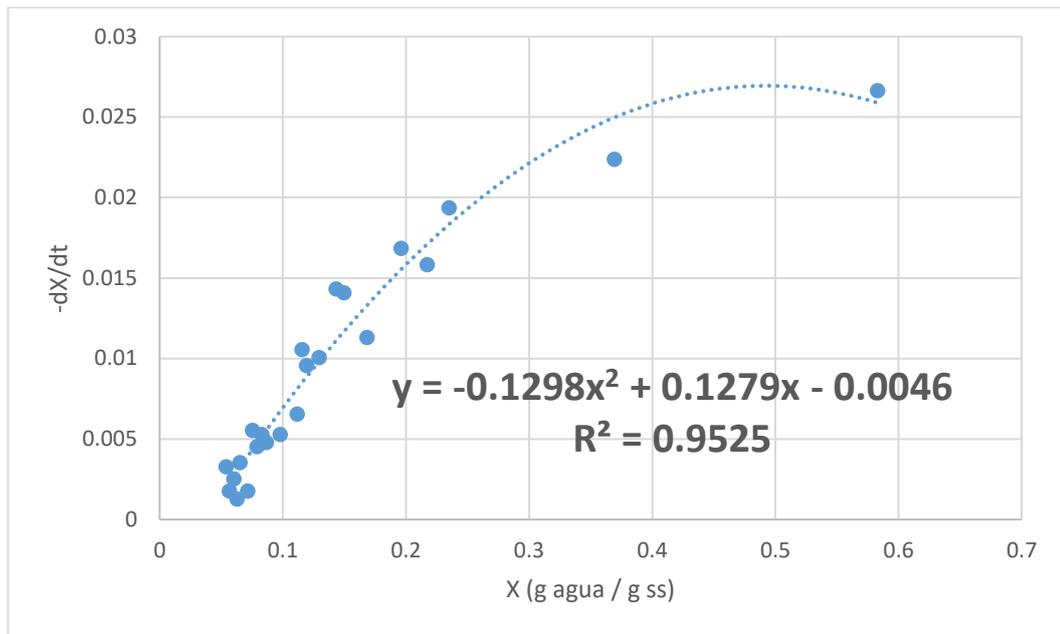


Figura 33

Curva de velocidad de secado decreciente para 60°C y 2.63 m/s

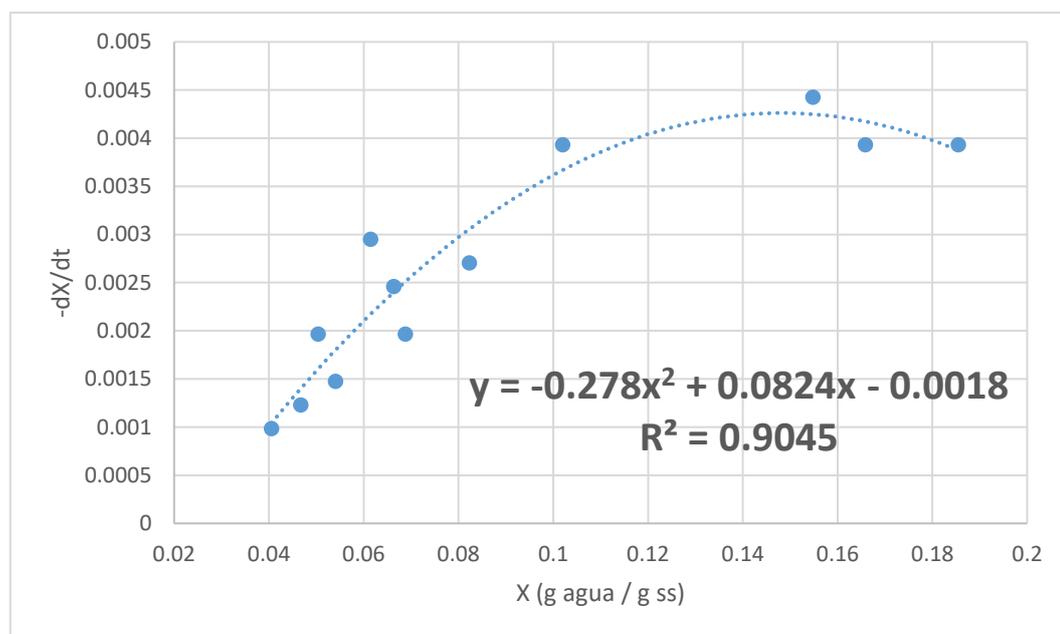
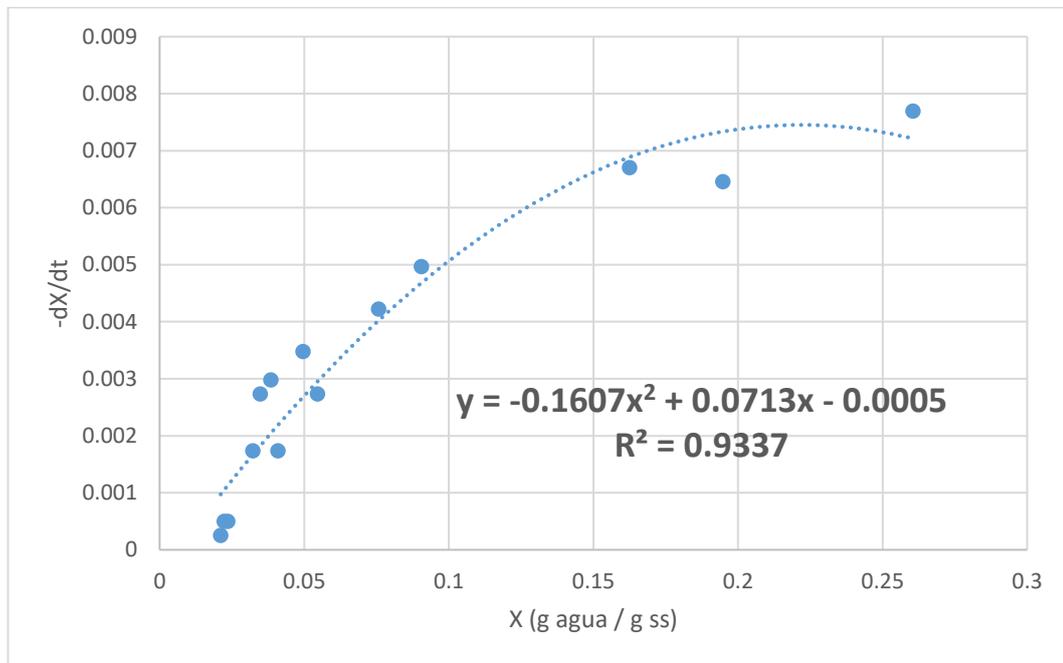


Figura 34

Curva de velocidad de secado decreciente para 65°C y 2.63 m/s



5.1.3. Proteínas de la maca seca

En la tabla 8 se muestran los valores de la concentración de proteínas en las muestras de maca seca. En todos los casos se muestra el valor promedio (que se hizo por triplicado).

Tabla 8

Concentración de proteínas totales en las muestras analizadas

| Muestra | C (g/100g) |
|---------|------------|
| 1 | 9.256 |
| 2 | 8.684 |
| 3 | 8.114 |
| 4 | 7.828 |
| 5 | 8.970 |
| 6 | 8.400 |
| 7 | 7.542 |
| 8 | 7.256 |

5.2. Resultados inferenciales

Se evaluó la humedad crítica y de equilibrio a partir de los datos obtenidos en el apartado 5.1. En la tabla 9 se muestran los resultados de la humedad inicial, de la humedad de equilibrio y humedad crítica.

Tabla 9

Humedad inicial, humedad crítica y humedad de equilibrio en las pruebas de secado (gH_2O/g ss).

| | X inicial | | Xc | | X* | |
|-------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1.57 m/s | 2.63 m/s | 1.57 m/s | 2.63 m/s | 1.57 m/s | 2.63 m/s |
| 50 °C | 1.4526 | 1.4549 | 0.3882 | 0.3504 | 0.1437 | 0.0931 |
| 55 °C | 1.4596 | 1.4532 | 0.3317 | 0.3080 | 0.1148 | 0.0374 |
| 60 °C | 1.4597 | 1.4599 | 0.2765 | 0.2481 | 0.0346 | 0.0237 |
| 65 °C | 1.4570 | 1.4566 | 0.2751 | 0.2076 | 0.1028 | 0.0071 |

Para el período de velocidad constante se ha utilizado la zona recta de la curva de secado y se ha aplicado una regresión lineal. En la tabla 10 se presentan los valores de la velocidad de secado constante (N_c) para las diferentes temperaturas y velocidades trabajadas. La densidad de carga utilizada fue de $0.1807 g/cm^2$.

Tabla 10

Velocidad de secado constante N_c ($gH_2O/gss.min$)

| | Nc (-dx/dt) | |
|-------|-------------|----------|
| | 1.57 m/s | 2.63 m/s |
| 50 °C | 0.0105 | 0.0117 |
| 55 °C | 0.0107 | 0.0168 |
| 60 °C | 0.0121 | 0.0164 |
| 65 °C | 0.0161 | 0.0157 |

Para el período de velocidad de secado decreciente se ha aplicado el método de la gradiente para el cálculo de la velocidad de secado, y posteriormente se utilizó una regresión cuadrática para el modelamiento de datos. La representación gráfica de la velocidad de secado en función de la humedad secado permitió obtener la humedad de equilibrio para los datos de las diferentes pruebas experimentales.

5.3. Resultados estadísticos

5.3.1. Superficie de respuesta para la cantidad de proteínas

Se construyeron la superficie de respuesta y la superficie de contornos para los datos de temperatura, velocidad de aire caliente y cantidad de proteínas totales (figuras 35 y 36).

Figura 35

Superficie de respuesta para la cantidad de proteínas

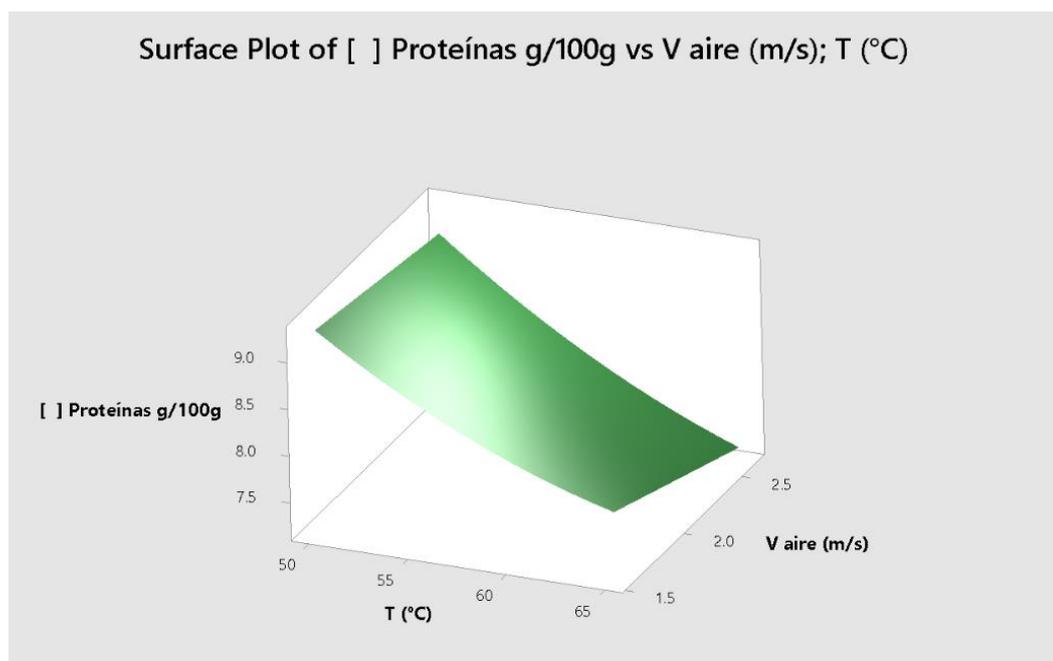
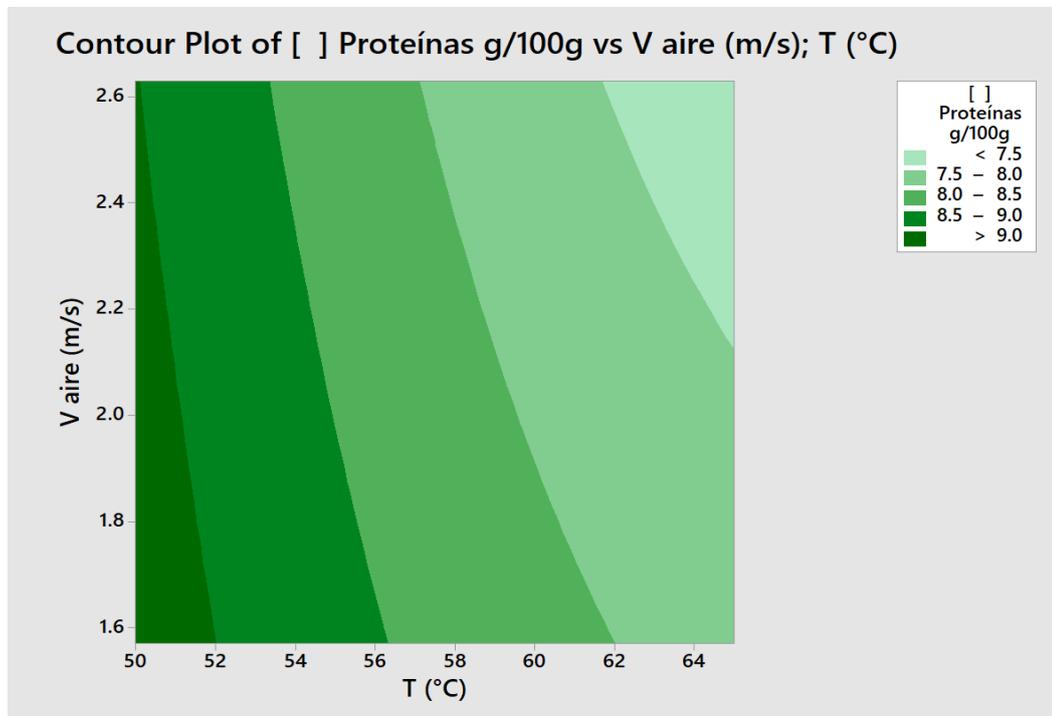


Figura 36

Superficie de contornos para la cantidad de proteínas



5.3.2. Superficie de respuesta para la humedad final

Se construyeron la superficie de respuesta y superficie de contornos para los datos de temperatura, velocidad de aire caliente y humedad final (figuras 37 y 38).

Figura 37

Superficie de respuesta para la humedad final

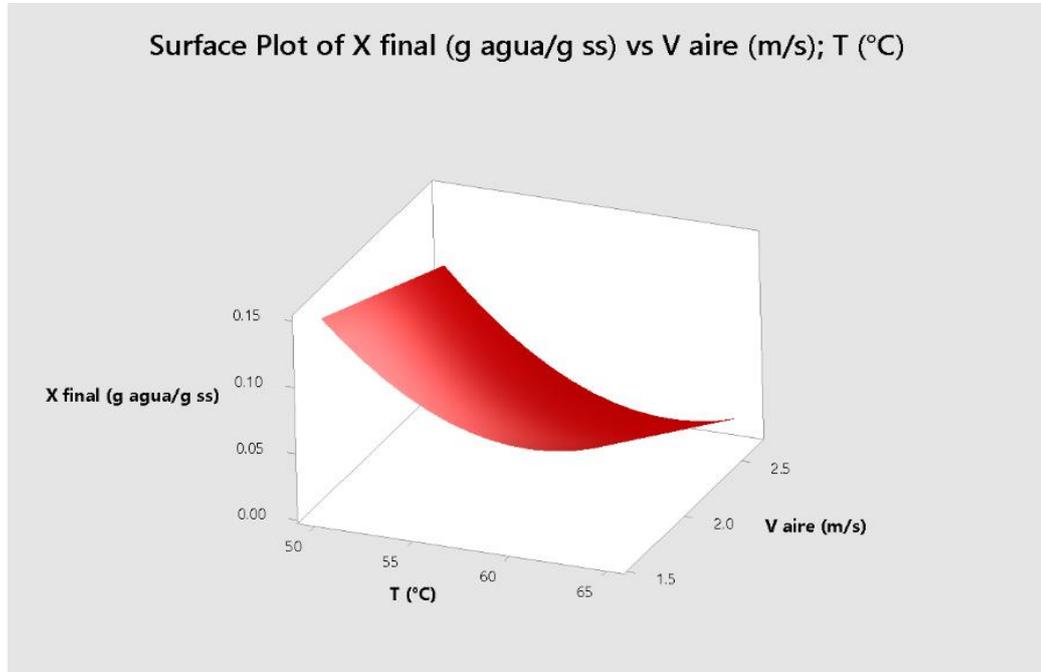
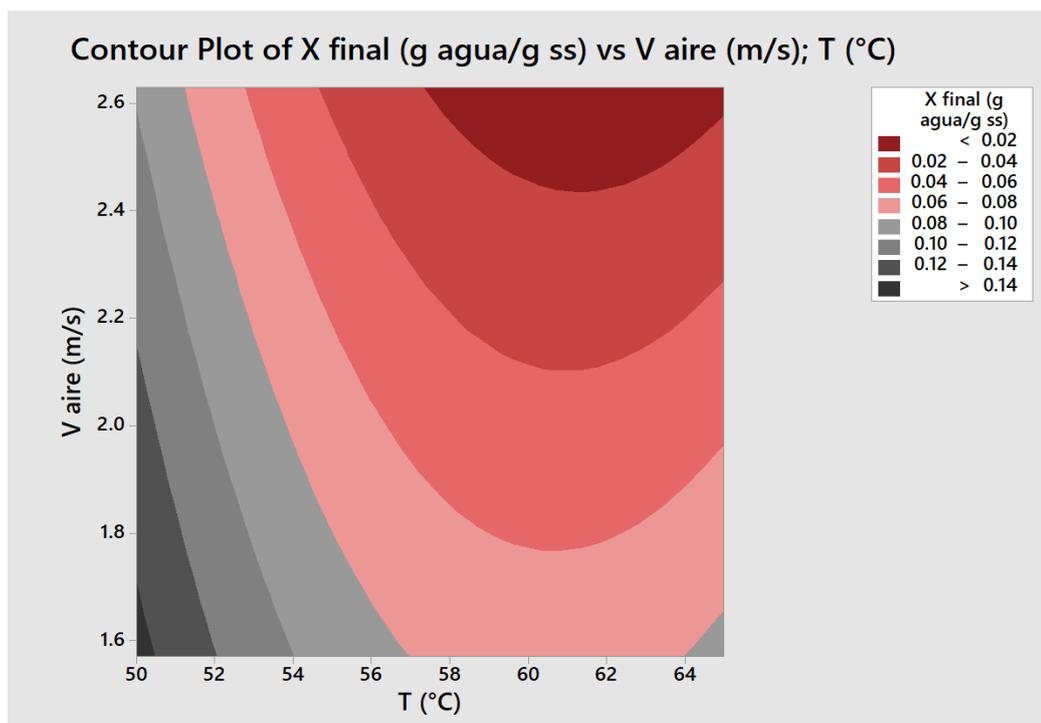


Figura 38

Superficie de contornos para la humedad final



Utilizando el programa Minitab 20, en base a los datos obtenidos anteriormente se realizó la optimización, para la cual se minimizó la humedad final, y se maximizó la cantidad de proteínas.

En la figura 39 se muestra el resultado final de la optimización. De acuerdo a ello, las condiciones óptimas se dan a $T(^{\circ}\text{C}) = 53.48$ °C y $V_{\text{aire}} = 2.63$ m/s.

Figura 39

Optimización de las condiciones de secado

| | | | |
|----------------|------|-----------|----------|
| Optimal | | T (°C) | V aire (|
| D: 0.6417 | High | 65.0 | 2.630 |
| <u>Predict</u> | Cur | [53.4848] | [2.630] |
| | Low | 50.0 | 1.570 |

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

6.1.1. Proteínas de la maca fresca

De acuerdo al resultado de la cantidad de proteínas en la maca fresca, se obtuvo un valor de 15.24 g /100 g, y nos muestra que la maca tiene una cantidad representativa de proteínas en su composición. Esto es un resultado esperado para la maca sin procesamiento térmico.

6.1.2. Secado de la maca

De los resultados obtenidos en cada prueba experimental, se requirió menos tiempo de secado para la prueba experimental 8 (a condiciones de temperatura 65 °C y velocidad de aire de 2.63 m/s) ya que en 220 minutos se obtuvo un valor de masa constante. También se pudo notar que a mayor temperatura, el contenido de humedad final de la maca es menor. En base a esto se puede inferir que a mayor temperatura (65 °C) se obtiene una mayor velocidad de secado de la maca.

Respecto a la hipótesis general se acepta la propuesta planteada, en la cual los parámetros óptimos para el secado de la maca en el presente trabajo permitieron reducir significativamente la humedad de la materia prima.

Las curvas de secado obtenidas nos muestran el efecto de la temperatura y la velocidad de aire caliente del secador rotatorio discontinuo

experimental sobre la humedad final de la maca (*Lepidium meyenii Walp.*); por tanto, se acepta la primera hipótesis específica.

Las siguientes gráficas representan el comportamiento de las curvas de secado, de todas las pruebas experimentales realizadas por cada velocidad de aire utilizada (1.57 m/s y 2.63 m/s) y a diferentes temperaturas.

En la figura 40, se observa que a una velocidad de aire caliente de 1.57m/s y a la temperatura de 65 °C se obtiene más rápido la humedad de equilibrio. Pero no es un criterio suficiente para un resultado final porque también se consideró la cantidad de proteínas en la maca. Un comportamiento similar se observa en la figura 41 donde se tienen los resultados con una velocidad de aire de 2.63 m/s.

Figura 40

Curvas de secado a diferentes temperaturas con velocidad de aire caliente de 1.57 m/s

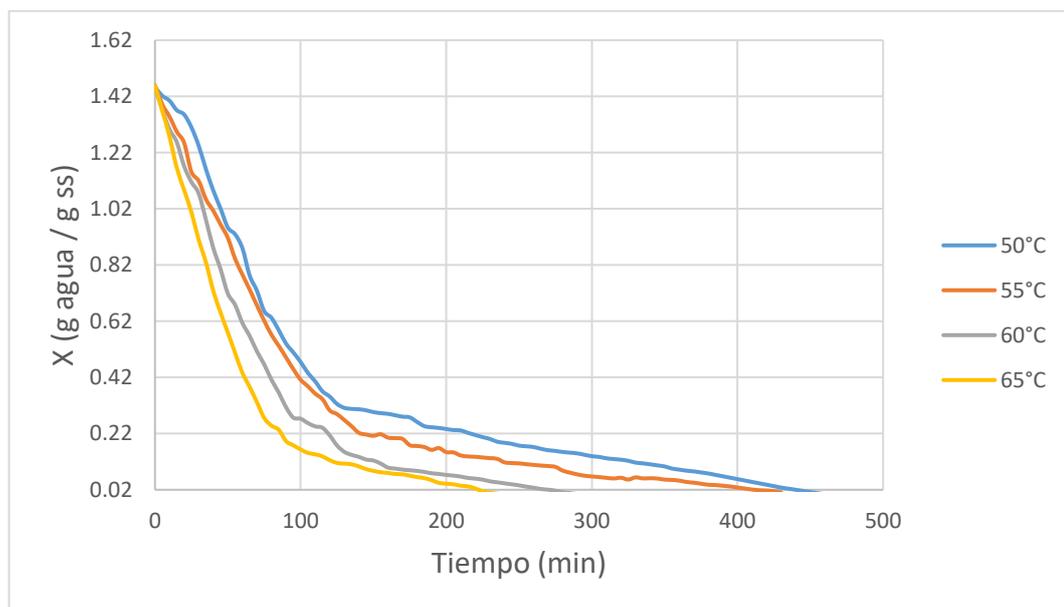
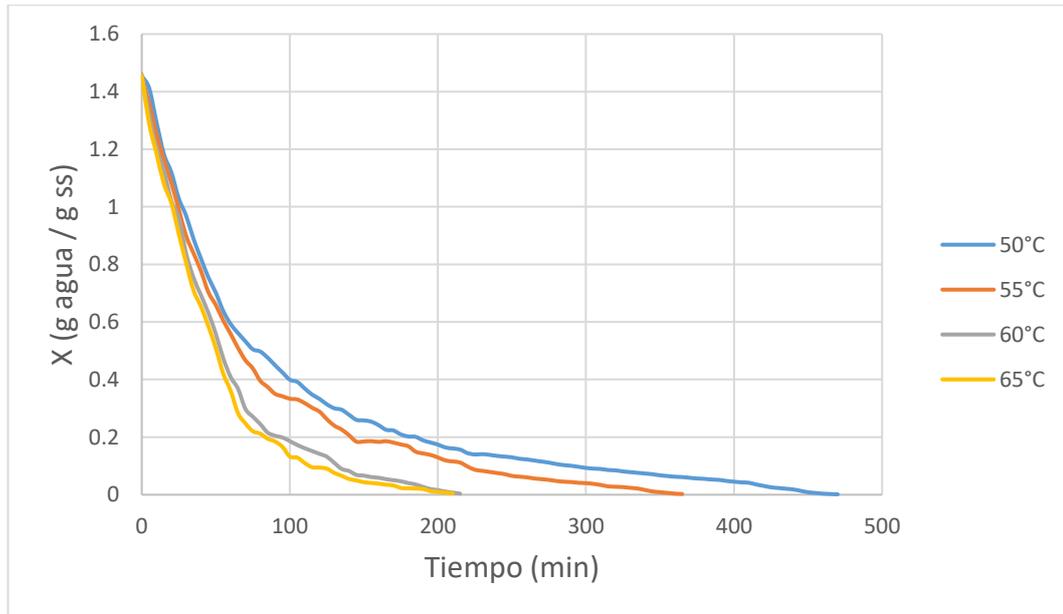


Figura 41

Curvas de secado a diferentes temperaturas con velocidad de aire caliente de 2.63 m/s



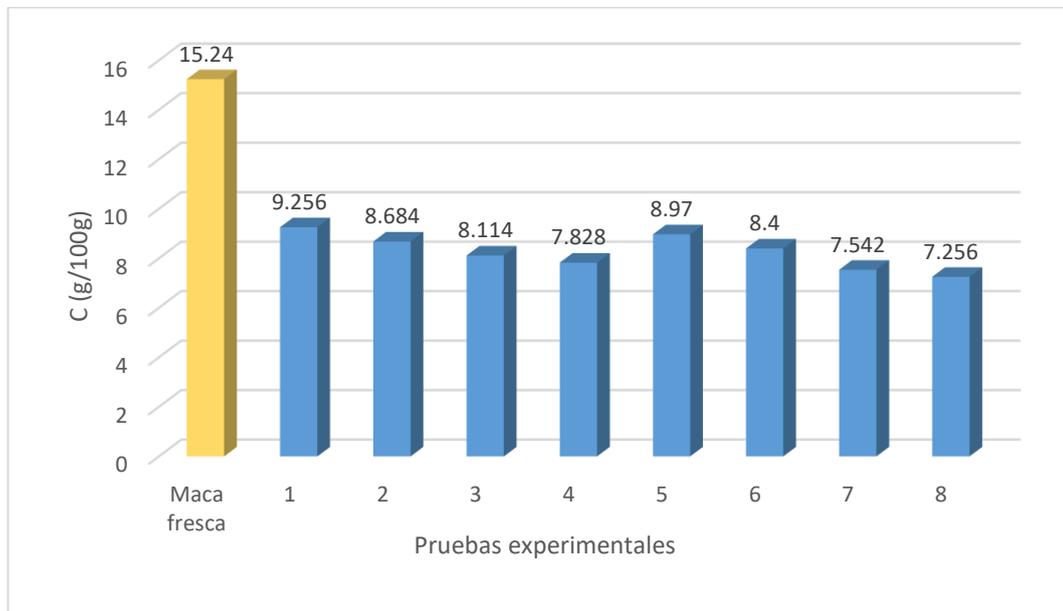
6.1.3. Proteínas de la maca seca

La muestra de maca seca en la que se obtuvo mayor cantidad de proteínas después del secado (9.256 g/100 g), fue a condiciones de temperatura 50 °C y velocidad de aire caliente de 1.57 m/s, es decir, cuando la temperatura y velocidad de aire tuvieron los menores valores.

En la figura 42, se observa una comparación de la cantidad de proteínas en la maca fresca y las que se obtuvieron en cada prueba experimental después del secado.

Figura 42

Contenido de proteínas en maca fresca y seca (g/100g)



Se infiere entonces que, para obtener la mayor cantidad de proteínas en la maca o la menor desnaturalización posible de estas, debemos trabajar a temperaturas de secado bajas.

La cantidad de proteínas totales en la maca (*Lepidium meyenii Walp.*) nos ayudó a determinar los parámetros óptimos de secado; por tanto, la segunda hipótesis específica es aceptada.

6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares

Para la contrastación de resultados, fue difícil encontrar investigaciones similares sobre secado, en cuanto a la materia prima. Es por ello que la contrastación se realizó en base a estudios de secado de otras materias primas en el mismo secador.

En una investigación similar, Segura y Osorio (2018), realizaron la obtención de parámetros óptimos de secado de la arracacha en un secador rotatorio discontinuo. En el cual determinaron según modelos matemáticos una temperatura óptima de 65 °C y flujo de aire de 480 L/min, para láminas de arracacha de un espesor de 1.5 mm.

Obando y Vega (2019), en su trabajo “El proceso de secado de Pituca (*Colocasia esculenta*)” utilizaron el secador rotario discontinuo a escala de laboratorio, donde trabajaron con tres variables de análisis: el grosor de corte de la rodaja de pituca (2 mm, 4 mm y 6 mm), la otra variable fue la temperatura: 60°C, 70°C y 80°C; y la última fue el flujo de aire, que ingresa al secador a razón de 28.8 m³/h y 45.5 m³/h. Con estas variables optimizaron el proceso de secado. Con el programa Minitab obtuvieron el punto óptimo del proceso: espesor de rodaja de 6 mm, para una temperatura de 60°C y un flujo de aire de 28.8 m³/h.

En ambos trabajos las temperaturas óptimas obtenidas son diferentes, ya que las materias primas pueden tener diferentes contenidos de humedad, entre otras variables que consideraron en sus investigaciones, comparando con en el presente trabajo la temperatura óptima es menor (53.48°C), ya que una variable muy importante es la cantidad de proteínas en la maca por lo que no se puede trabajar con temperaturas muy altas para evitar la desnaturalización de proteínas.

6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes

La autora se responsabiliza por la información emitida en el presente trabajo de investigación, cumpliendo lo señalado en el código de ética de investigación de la Universidad Nacional del Callao, Resolución N° 210-2017-CU.7

CONCLUSIONES

- a. Se logró obtener los parámetros óptimos de operación para el secado de la maca (*Lepidium meyenii Walp.*) en un secador rotatorio discontinuo experimental (minimizando la humedad final y maximizando la cantidad de proteínas) y son los siguientes:

$$T_{\text{óptima}} = 53.48 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$V_{\text{aire caliente óptima}} = 2.63 \text{ m/s}$$

Estos valores fueron obtenidos de los modelos matemáticos proporcionados por el programa Minitab 20, que son los que se muestran en el capítulo V.

- b. Se obtuvo la humedad final de la maca a diferentes condiciones de temperatura y velocidad de aire caliente. La humedad final de la maca varió entre 0.1437 g H₂O/g ss y 0.1028 g H₂O/g ss, para los límites de temperatura de 50 °C y 65 °C, respectivamente, para las pruebas donde se trabajó a 1.57 m/s de velocidad de aire. De forma análoga, para 2.63 m/s de velocidad de aire, la humedad final de la maca varió entre 0.0931 g H₂O/g ss y 0.0071 g H₂O/g ss para los mismos límites de temperatura. La humedad final de la maca es menor cuando se incrementa la temperatura y la velocidad de aire.
- c. Se cuantificaron las proteínas totales de la maca. La experimentación y los resultados del análisis de la cantidad de proteínas totales en la

maca (*Lepidium meyenii Walp.*) permitieron conocer que la maca fresca contenía 15.24 g proteínas totales/100g maca y al someter a la operación de secado, a medida que aumenta la temperatura de secado, la cantidad de proteínas totales disminuye, y varía entre el rango de 9.3 a 7.3 g proteínas totales/100g de maca.

RECOMENDACIONES

- a. Estudiar la velocidad de secado de la maca, pero con diferentes granulometrías para ver si hay mayor o menor desnaturalización de las proteínas.
- b. Realizar estudios de la cantidad de proteínas que contiene la maca después de un secado tradicional por exposición al sol, para saber si la desnaturalización de proteínas es mayor o no.
- c. Mejorar el sistema de lectura de la temperatura en el secador rotatorio discontinuo experimental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alapont, C.; Simón, P. y Torrejón, J. (2020). *Guía para la determinación de la vida útil de los alimentos*. España. Federación empresarial de agroalimentación de la comunidad valenciana.

Ángeles, C. (2014). *Guía de secado*. Perú. Universidad Nacional del Callao.

Arrieta P., Yurica; Granados C., Clemente; Leon M., Glicerio; Padilla F., Keyla A. y Torrenegra A., Miladys (2018). *Evaluación de la influencia de la temperatura en procesos de secado*. Colombia. Universidad de Pamplona.

Ávalos, V. y Carrillo, M. (2019). *Modelamiento del proceso de secado de semilla de uva quebranta (Vitis vinifera) de Ica usando secador rotatorio con aire caliente a nivel piloto*. Callao, Perú. Universidad Nacional del Callao.

Baca C., Elizabeth y Moran R., Angie (2018). *Proceso de secado de semilla de papaya (Carica Papaya) para la obtención de aceite*. Callao, Perú. Universidad Nacional del Callao.

Barquín, J., Ferrer J., Linares P., Ramos, A. y Sánchez, P. (2010) *Modelos matemáticos de optimización*. Madrid, España. Universidad Pontificia Comillas ICAI-ICADE.

Canahualpa C., F. y Solano G., E. (2018). *Estudio de la cinética de secado y degradación de las antocianinas y vitamina c de la mashua negra (tropaeolum tuberosum)*. Huancayo, Perú. Universidad nacional del centro del Perú.

Capcha O., Kathia; Naventa V., Edwin; Rios V., Christopher y Sisa H., Nely (2020). *Evaluación de tres niveles de temperatura de secado del Cushuro (Nostoc Sp) en el color y porcentaje de proteína*. Lima – Perú. Universidad San Ignacio de Loyola.

Cengel, Y. (2004). *Transferencia de calor*. México. Editorial McGraw Hill. Segunda edición.

Cosio, E., Esparza, E. y Hadzich, A. (2015). *La maca: la química detrás de su secado tradicional*. Perú. Revista de Química PUCP, vol. 29, N° 1, 11-17.

Daga M., Luis y García Y., Raúl de la Cruz (2017). *Proceso de secado del alga Lessonia Nigrescens (Aftacanto negro) en un secador rotatorio discontinuo*. Universidad Nacional del Callao.

Fernández, E. y Galván, A. (2010). *Métodos para la cuantificación de proteínas*. España. Departamento de bioquímica y biología molecular, Universidad de Córdoba.

- Figueredo R., Mary C. y González G., Ricardo R. (2017). Evaluación del secado de la *Musa Paradisiaca* (plátano) utilizando el aparato de laboratorio SBAN. Venezuela. *Tecnología química*. Vol. 37, 293-304.
- Fries, A. y Tapia, M. (2007). *Guía de campo de los cultivos andinos*. FAO y ANPE. Lima, Perú.
- Garau T., C. (2008). *Optimización del proceso de secado de diferentes productos agrícolas para la obtención de concentrados de frutas y hortalizas de elevada calidad*. España. Universidad Politécnica de Valencia.
- García, J. (2010). *Comparación de la actividad de extractos de *Lepidium peruvianum Chacón* (maca) sobre leucocitos procedentes de individuos saludables e infectados con el virus de la inmunodeficiencia humana (HIV)*. Lima, Perú. Tesis de grado. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- García A., M.; Hernández C., F.; Hernández D., W.; Rodríguez J., G. y Vargas G., Z. (2013). Optimización del secado de granos de café en un secador rotatorio. México. *Revista mexicana de ingeniería química*. Vol. 12, 315-325.
- García, H. y Vázquez R. (1998) *Cuantificación de proteínas: una revisión*. Distrito Federal, México. Universidad Autónoma de México.
- Giurfa, A. y Sandoval, L. (2000). *Cultivo y Comercialización de la Maca*. Perú. Editorial Macro E.I.R.L. 1ra. Edición.

- Hernández L., Claudia; Herrera V., Wilmer; Karina O., Zonia y Ramírez P., Lorena (2011). Influencia del espesor y la temperatura en el secado de carambola (*Averrhoa carambola* L.). Colombia. Universidad de la Amazonía.
- Hernández, María C.; Martínez, Katherine G.; Serna J., Johanna A. y Torres V., Laura S. (2019). *Secado de pulpa de café: Condiciones de proceso, modelación matemática y efecto sobre propiedades fisicoquímicas*. Colombia. Universidad la gran Colombia seccional Armenia.
- Kerr, William L. (2009). *Food Drying and Evaporation Processing Operations*. Estados Unidos. Department of Food Science and Technology, University of Georgia, Athens, GA. Capítulo 14, 354-387.
- León, S., Paucar, L. y Sifuentes, G. (2015). *Estudio de la Maca (*Lepidium meyenii* Walp.), cultivo andino con propiedades terapéuticas*. Chimbote, Perú. Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional del Santa.
- Mujumdar, A. (2006). *Handbook of Industrial Drying*. Singapur. Editorial CRC Press. Cuarta edición.
- Obando M. Laura y Vega V. Elizabeth (2019). *Proceso de secado de pituca (*Colocasia esculenta*) en un secador rotatorio discontinuo*. Universidad Nacional del Callao.

Osorio, C. y Segura, C. (2018). *Proceso de secado de arracacha (Arracacia xanthorriza) para la obtención de parámetros óptimos en un secador rotatorio discontinuo*. Lima, Perú. Universidad Nacional del Callao.

Porres, J. (2008). *Procesamiento y exportación de productos orgánicos caso: maca en polvo hacia mercados latinoamericanos*. Bolivia. Universidad de San Andrés.

Salcines, F. (2009). *Cadena agroalimentaria de la Quinoa y la Maca peruana y su comercialización en el mercado español*. España. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

Tadeo, V. (2013). *Deshidratación de maca*. Huacho, Perú. Tesis de grado. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión.

Treybal, R. (1990). *Operaciones de transferencia de masa*. México. Editorial McGraw-Hill. Segunda edición.

Verdini, R. (2017). *Análisis del contenido de proteínas en los alimentos*. Universidad Nacional de Rosario.

BIBLIOGRAFÍA WEB

Diario Correo. (20 de Julio del 2016). *La crisis de la maca que ocasionaron los chinos*. Recuperado el 15 de Enero del 2018 de <http://diariocorreo.pe/edicion/huancayo/la-crisis-de-la-maca-que-ocasionaron-los-chinos-686089/>.

Ecured. *Conservación de alimentos*. Recuperado el 20 de Junio del 2018 de https://www.ecured.cu/Conservaci%C3%B3n_de_alimentos.

Enmujer. *Tipos de maca, propiedades y beneficios*. Recuperado el 8 de Julio del 2016 de <https://enmujer.com/salud/tipos-maca-propiedades-beneficios/>.

GitHub. (16 de Setiembre del 2020). *Cuantificación de proteínas de ensayo de Bradford*. Recuperado el 05 de Marzo del 2021 de <https://github.com/har1eyk/Bradford-Assay-Protein-Quant-with-One-Phase-Assoc>.

Inkanat Maca de los Andes. (2013). *Maca: propiedades*. Recuperado el 13 de Noviembre del 2018 de <http://www.inkanat.com/es/maca/propiedades.html>.

Inkanatura. *Composición analítica de la maca*. Recuperado el 13 de Setiembre del 2018 de <http://www.inkanat.com/es/maca/macacompleto.pdf>.

Koo, W. (2017). *Maca Perú Exportación diciembre 2016*. Recuperado de <https://www.agrodataperu.com/2017/01/maca-peru-exportacion-2016-diciembre.html>.

Koo, W. (2018). *Maca Perú Exportación 2018*. Recuperado de <https://www.agrodataperu.com/2018/05/maca-harina-peru-exportacion-2018-marzo.html>.

Koo, W. (2020). *Maca Harina Perú Exportación 2019 Diciembre*. Recuperado de <https://www.agrodataperu.com/2020/01/maca-harina-peru-exportacion-2019-diciembre.html>

Macalnka (22 de Julio del 2010). *Historia y origen de la maca*. Recuperado el 20 de Octubre del 2018 de <http://macainka.blogspot.pe/2010/07/historia-y-origen-de-la-maca.html>.

Macaperuana. *Maca la comida sagrada de los incas. Valor nutricional*. Recuperado el 20 de Febrero del 2016 de <https://macaperuana.wordpress.com/valor-nutricional/>.

Midagri. *Maca*. Recuperado el 15 de Marzo del 2018 de <https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/sectoragrario/agricola/lineasdecultivosemergentes/MACA.pdf>

Perú 21. (2012). *Consumo de maca andina crece vigorosamente*. Recuperado el 25 de Julio del 2017 de: <https://peru21.pe/emprendimiento/consumo-maca-andina-crece-vigorosamente-46082-noticia/>.

Quiminet. (18 de Octubre del 2010). *Diferentes técnicas de secado de alimentos*. Recuperado el 27 de Julio del 2016 de <https://www.quiminet.com/articulos/diferentes-tecnicas-de-secado-de-alimentos-45027.htm>.

Saludeo plantas medicinales. *Propiedades y beneficios medicinales de la maca*. Recuperado el 2 de Noviembre del 2019 de <https://www.saludeo.com/propiedades-beneficios-maca/>.

Sánchez, D. *Métodos de las Superficies de Respuesta*. Recuperado el 20 de febrero del 2019 de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70238/fichero/Capitulo+7.pdf>.

Scidev net. (4 de Julio del 2014). *Perú denuncia a China por biopiratería de Maca*. Recuperado el 6 de Octubre del 2018 de <https://www.scidev.net/america-latina/agropecuaria/noticias/per-denuncia-a-china-por-biopirateria-de-maca.html>.

Semanario Comexperu. *Cuidado con lo que sale de la maca*. Recuperado el 25 de Noviembre del 2018 de <https://semanariocomexperu.wordpress.com/cuidado-con-lo-que-sale-de-la-maca/>.

Superalimentos. *Maca andina*. Recuperado el 10 de Octubre del 2018 de <https://www.superalimentos.es/maca-andina/>.

Universidad de las Américas de Puebla. *Proceso de Secado*. Capítulo 4. Recuperado el 23 de Julio del 2018 de http://caterina.udlap.mx/udla/tales/documentos/lim/davila_n_jr/capitulo4.pdf.

Universidad de las Américas de Puebla. *Proceso de Secado*. Capítulo 5. Recuperado el 20 de Enero del 2019 de

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/cabrera_v_a/capitulo5.pdf.

Universidad de Jaén. *Método para el análisis de proteínas*. Recuperado el 12 de octubre del 2018 de <http://www4.ujaen.es/~esiles/TEMA3PROTEINASalumno.pdf>.

Artículo web consultado el 12 de octubre del 2018.

Universidad Politécnica de Catalunya. *Fundamentos teóricos. Secador de sólidos*. Recuperado el 21 de Febrero del 2021 de <http://epsem.upc.edu/~assecadordesolids/castella/fonaments%20materia.html#:~:text=%2D%20Humedad>.

Universidad Politécnica de Catalunya. *Fundamentos teóricos. Tiempo de secado*. Recuperado el 23 de Julio del 2017 de <http://epsem.upc.edu/~assecadordesolids/castella/fonaments%20funcionament.html>.

Universidad Politécnica de Catalunya. *Fundamentos teóricos. Velocidad de secado*. Recuperado el 23 de Julio del 2016 de <http://epsem.upc.edu/~assecadordesolids/castella/fonaments%20energia.html#:~:text=Se%20define%20la%20velocidad%20de,velocidad%20constantes%20en%20el%20tiempo>.

UNESCO Montevideo. (2005). *Guía de uso de secaderos solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes*. Recuperado el 12 de Noviembre del 2018 de

<http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/ED-Guiasecaderosolar.pdf>.

Voz regional. (15 de Setiembre del 2012). *Consumo de maca andina crece vigorosamente*. Recuperado el 3 de Marzo del 2018 de <https://vozregional.wordpress.com/2012/09/15/consumo-de-maca-andina-crece-vigorosamente/#more-9572>.

ANEXOS

ANEXO 1

MATRIZ DE CONSISTENCIA: OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN PARA EL SECADO DE MACA (*Lepidium meyenii Walp.*) EN UN SECADOR ROTATORIO DISCONTINUO EXPERIMENTAL

| PROBLEMA GENERAL | OBJETIVO GENERAL | HIPÓTESIS GENERAL | VARIABLE DEP. | DIMENSIONES | INDICADORES | MÉTODO |
|---|---|---|--|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| ¿Cuáles son los parámetros óptimos de operación para el secado de la maca (<i>Lepidium Meyenii Walp</i>) en un secador rotatorio discontinuo experimental? | Determinar los parámetros óptimos de operación para el secado de la maca (<i>Lepidium Meyenii Walp</i>) en un secador rotatorio discontinuo experimental. | Los parámetros óptimos de operación para el secado de la maca nos permitirán reducir significativamente la humedad de la materia prima. | Y=Parámetros óptimos de operación para el secado de la maca (<i>Lepidium Meyenii Walp</i>) en un secador rotatorio discontinuo experimental. | -Temperatura - Velocidad de aire | - °C - m/s | - Análisis estadístico: superficie de respuesta |
| PROB. ESPECÍFICOS | OBJ. ESPECÍFICOS | HIP. ESPECÍFICAS | VARIABLES IND. | DIMENSIONES | INDICADORES | MÉTODO |
| a) ¿Cómo influirá la temperatura y la velocidad de aire caliente del secador rotatorio discontinuo experimental sobre la humedad de la maca (<i>Lepidium meyenii Walp</i>)? | a) Obtener la humedad final de la maca (<i>Lepidium meyenii Walp.</i>) a diferentes condiciones de temperatura y velocidad de aire caliente en el secador rotatorio discontinuo experimental. | a) Las curvas obtenidas nos mostrarán el efecto de la temperatura y la velocidad de aire caliente del secador rotatorio discontinuo experimental sobre la humedad final de la maca (<i>Lepidium meyenii Walp.</i>). | X_1 = Humedad de salida de la maca (<i>Lepidium Meyenii Walp.</i>). | - Humedad | - gH ₂ O/gss | - Corridas de secado a diferentes condiciones. |
| b) ¿Cuál será el efecto de la temperatura sobre las proteínas totales de la maca (<i>Lepidium Meyenii Walp</i>)? | b) Cuantificar las proteínas totales de la maca (<i>Lepidium Meyenii Walp</i>) antes y después del secado. | b) La cantidad de proteínas totales en la maca (<i>Lepidium Meyenii Walp</i>) nos ayudará a determinar los parámetros óptimos de secado. | X_2 =Cantidad de proteínas totales en la maca (<i>Lepidium Meyenii Walp</i>). | - Cantidad de proteínas totales | - g de proteínas / 100g de producto | - Análisis de proteínas utilizando el método de Bradford - UV VIS. |

RELACIÓN DE VARIABLES $Y = f(X_1, X_2)$

Y: Parámetros de operación óptimos para el secado de maca (*Lepidium Meyenii Walp*) en un secador rotatorio discontinuo experimental.

X1: Humedad de salida de la maca (*Lepidium Meyenii Walp.*).

X2: Cantidad de proteínas totales en la maca (*Lepidium Meyenii Walp*).

ANEXO 2

MÉTODO DE CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE SECADO

Se realizaron las pruebas de secado, por cada prueba se colocaron 20 g de maca fresca en una bolsa de organza. Después de cada intervalo de tiempo de secado, se restó el valor de masa total con la masa de la bolsa de organza (0.55 g), para conocer la masa del sólido húmedo:

$$W_{SH} = W_{Total} - W_{Bolsa\ de\ organza}$$

Cada prueba se hizo por triplicado por lo que la masa considerada es la masa promedio $W_{promedio}$. A partir de los valores obtenidos, se calculó la humedad en base seca ($X = \text{masa de agua} / \text{masa del sólido seco}$).

$$X = \frac{W_{SH} - W_{SS}}{W_{SS}}$$

Para calcular la velocidad de secado se utilizó la ecuación (1):

$$N = \frac{L_s}{A} \left(- \frac{dX}{d\theta} \right)$$

Considerando masa del sólido seco (L_s), área de la superficie de secado (A), variación de humedad en base seca (dX) y variación de tiempo ($d\theta$), los resultados se detallan en el anexo 3.

El área de secado se calculó de la siguiente manera:

Para calcular el área de secado de cada cubo de maca de 0.5 cm por lado:

$$A = 6 * L^2$$

$$A = 6 * (0.5\ cm)^2 \rightarrow A = 1.5\ cm^2$$

Considerando que se usaron 30 cubos de maca por cada prueba experimental, el área de secado es:

$$A = 1.5 \text{ cm}^2 * 30 \rightarrow A = 45 \text{ cm}^2$$

Todas las pruebas experimentales se trabajaron a $\omega=10$ rpm. La velocidad de rotación se mantuvo constante.

ANEXO 3
TABLAS DE DATOS EXPERIMENTALES

Para la prueba experimental 1

Tabla 11

Datos para condiciones de $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 1.57\text{ m/s}$

| t (min) | W promedio (g) | X (g H ₂ O /g ss) | N (g H ₂ O/ cm ² .min) | t (min) | W promedio (g) | X (g H ₂ O /g ss) | N (g H ₂ O/ cm ² .min) | t (min) | W promedio (g) | X (g H ₂ O /g ss) | N (g H ₂ O/ cm ² .min) |
|------------|----------------------|------------------------------------|--|------------|----------------------|------------------------------------|--|------------|----------------------|------------------------------------|--|
| 0 | 20.00 | 1.45256 | 0.00173 | 160 | 10.27 | 0.25153 | 0.00013 | 320 | 8.95 | 0.09280 | 0.00120 |
| 5 | 19.76 | 1.39194 | 0.00160 | 165 | 10.23 | 0.24786 | 0.00093 | 325 | 8.88 | 0.08425 | 0.00116 |
| 10 | 19.54 | 1.34799 | 0.00196 | 170 | 10.19 | 0.24298 | 0.00009 | 330 | 8.78 | 0.07204 | 0.00044 |
| 15 | 19.35 | 1.29426 | 0.00142 | 175 | 10.17 | 0.24054 | 0.00093 | 335 | 8.75 | 0.06838 | 0.00098 |
| 20 | 19.07 | 1.25519 | 0.00378 | 180 | 10.12 | 0.23565 | 0.00036 | 340 | 8.69 | 0.06105 | 0.00049 |
| 25 | 18.39 | 1.15140 | 0.00116 | 185 | 10.11 | 0.23443 | 0.00044 | 345 | 8.68 | 0.05983 | 0.00027 |
| 30 | 17.87 | 1.11966 | 0.00240 | 190 | 10.09 | 0.23199 | 0.00044 | 350 | 8.65 | 0.05617 | 0.00031 |
| 35 | 17.20 | 1.05372 | 0.00147 | 195 | 10.06 | 0.22833 | 0.00036 | 355 | 8.64 | 0.05495 | 0.00036 |
| 40 | 16.60 | 1.01343 | 0.00178 | 200 | 10.04 | 0.22589 | 0.00013 | 360 | 8.62 | 0.05250 | 0.00018 |
| 45 | 16.09 | 0.96459 | 0.00173 | 205 | 10.01 | 0.22222 | 0.00009 | 365 | 8.58 | 0.04762 | 0.00022 |
| 50 | 15.47 | 0.91697 | 0.00271 | 210 | 9.99 | 0.21978 | 0.00018 | 370 | 8.56 | 0.04518 | 0.00027 |
| 55 | 14.96 | 0.84249 | 0.00204 | 215 | 9.98 | 0.21856 | 0.00204 | 375 | 8.53 | 0.04151 | 0.00013 |
| 60 | 14.49 | 0.78632 | 0.00196 | 220 | 9.97 | 0.21734 | 0.00351 | 380 | 8.50 | 0.03785 | 0.00022 |
| 65 | 13.95 | 0.73260 | 0.00204 | 225 | 9.95 | 0.21490 | 0.00191 | 385 | 8.49 | 0.03663 | 0.00067 |
| 70 | 13.44 | 0.67643 | 0.00200 | 230 | 9.93 | 0.21245 | 0.00409 | 390 | 8.47 | 0.03419 | 0.00089 |
| 75 | 13.18 | 0.62149 | 0.00182 | 235 | 9.91 | 0.21001 | 0.00502 | 395 | 8.45 | 0.03175 | 0.00049 |
| 80 | 12.99 | 0.57143 | 0.00142 | 240 | 9.89 | 0.20757 | 0.00391 | 400 | 8.42 | 0.02808 | 0.00067 |
| 85 | 12.64 | 0.53236 | 0.00151 | 245 | 9.83 | 0.20024 | 0.00538 | 405 | 8.39 | 0.02442 | 0.00076 |
| 90 | 12.26 | 0.49084 | 0.00151 | 250 | 9.74 | 0.18926 | 0.00516 | 410 | 8.36 | 0.02076 | 0.00071 |
| 95 | 12.01 | 0.44933 | 0.00138 | 255 | 9.59 | 0.17094 | 0.00431 | 415 | 8.34 | 0.01832 | 0.00031 |
| 100 | 11.74 | 0.41148 | 0.00084 | 260 | 9.57 | 0.16850 | 0.00440 | 420 | 8.33 | 0.01709 | 0.00049 |
| 105 | 11.43 | 0.38828 | 0.00142 | 265 | 9.53 | 0.16361 | 0.00431 | 425 | 8.31 | 0.01465 | 0.00049 |
| 110 | 11.19 | 0.38217 | 0.00160 | 270 | 9.52 | 0.16239 | 0.00151 | 430 | 8.28 | 0.01099 | 0.00040 |
| 115 | 10.91 | 0.37241 | 0.00204 | 275 | 9.43 | 0.15140 | 0.00160 | 435 | 8.27 | 0.00977 | 0.00022 |
| 120 | 10.60 | 0.36264 | 0.00182 | 280 | 9.32 | 0.13797 | 0.00138 | 440 | 8.26 | 0.00855 | 0.00027 |
| 125 | 10.55 | 0.34921 | 0.00156 | 285 | 9.18 | 0.12088 | 0.00049 | 445 | 8.24 | 0.00611 | 0.00022 |
| 130 | 10.44 | 0.33822 | 0.00204 | 290 | 9.13 | 0.11477 | 0.00200 | 450 | 8.22 | 0.00366 | 0.00009 |
| 135 | 10.41 | 0.31624 | 0.00213 | 295 | 9.09 | 0.10989 | 0.00138 | 455 | 8.20 | 0.00122 | 0.00004 |
| 140 | 10.40 | 0.31258 | 0.00280 | 300 | 9.07 | 0.10745 | 0.00027 | 460 | 8.19 | 0 | 0 |
| 145 | 10.37 | 0.30647 | 0.00089 | 305 | 9.05 | 0.10501 | 0.00044 | | | | |
| 150 | 10.32 | 0.28205 | 0.00089 | 310 | 9.03 | 0.10256 | 0.00067 | | | | |
| 155 | 10.29 | 0.25763 | 0.00080 | 315 | 9.01 | 0.10012 | 0.00102 | | | | |

Para la prueba experimental 2

Tabla 12

Datos para condiciones de $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 1.57\text{ m/s}$

| t (min) | W promedio (g) | X (g H ₂ O /g ss) | N (g H ₂ O/cm ² .min) | t (min) | W promedio (g) | X (g H ₂ O /g ss) | N (g H ₂ O/cm ² .min) | t (min) | W promedio (g) | X (g H ₂ O /g ss) | N (g H ₂ O/cm ² .min) |
|---------|----------------|------------------------------|---|---------|----------------|------------------------------|---|---------|----------------|------------------------------|---|
| 0 | 20.00 | 1.45956 | 0.00289 | 180 | 10.04 | 0.26131 | 0.00053 | 360 | 8.69 | 0.09171 | 0.00013 |
| 5 | 19.76 | 1.48241 | 0.00307 | 185 | 9.92 | 0.24623 | 0.00049 | 365 | 8.66 | 0.08794 | 0.00076 |
| 10 | 19.54 | 1.45477 | 0.00511 | 190 | 9.89 | 0.24246 | 0.00009 | 370 | 8.64 | 0.08543 | 0.00027 |
| 15 | 19.35 | 1.43090 | 0.00124 | 195 | 9.87 | 0.23995 | 0.00187 | 375 | 8.61 | 0.08166 | 0.00053 |
| 20 | 19.07 | 1.39573 | 0.00302 | 200 | 9.84 | 0.23618 | 0.00218 | 380 | 8.58 | 0.07789 | 0.00040 |
| 25 | 18.39 | 1.31030 | 0.00231 | 205 | 9.81 | 0.23241 | 0.00253 | 385 | 8.49 | 0.06658 | 0.00049 |
| 30 | 17.87 | 1.24497 | 0.00298 | 210 | 9.80 | 0.23116 | 0.00280 | 390 | 8.38 | 0.05276 | 0.00036 |
| 35 | 17.20 | 1.16080 | 0.00267 | 215 | 9.73 | 0.22236 | 0.00302 | 395 | 8.30 | 0.04271 | 0.00036 |
| 40 | 16.60 | 1.08543 | 0.00227 | 220 | 9.67 | 0.21482 | 0.00302 | 400 | 8.22 | 0.03266 | 0.00027 |
| 45 | 16.09 | 1.02136 | 0.00276 | 225 | 9.61 | 0.20729 | 0.00307 | 405 | 8.16 | 0.02513 | 0.00062 |
| 50 | 15.47 | 0.94347 | 0.00227 | 230 | 9.56 | 0.20101 | 0.00347 | 410 | 8.09 | 0.01633 | 0.00031 |
| 55 | 14.96 | 0.87940 | 0.00209 | 235 | 9.48 | 0.19095 | 0.00338 | 415 | 8.02 | 0.00754 | 0.00018 |
| 60 | 14.49 | 0.82035 | 0.00240 | 240 | 9.45 | 0.18719 | 0.00044 | 420 | 7.98 | 0.00251 | 0.00004 |
| 65 | 13.95 | 0.75251 | 0.00227 | 245 | 9.42 | 0.18342 | 0.00080 | 425 | 7.97 | 0.00126 | 0.00004 |
| 70 | 13.44 | 0.68844 | 0.00116 | 250 | 9.37 | 0.17714 | 0.00089 | 430 | 7.96 | 0 | 0 |
| 75 | 13.18 | 0.65578 | 0.00084 | 255 | 9.35 | 0.17462 | 0.00049 | 435 | 7.96 | 0 | 0 |
| 80 | 12.99 | 0.63191 | 0.00156 | 260 | 9.33 | 0.17211 | 0.00151 | | | | |
| 85 | 12.64 | 0.58794 | 0.00169 | 265 | 9.28 | 0.16583 | 0.00102 | | | | |
| 90 | 12.26 | 0.54020 | 0.00111 | 270 | 9.24 | 0.16080 | 0.00031 | | | | |
| 95 | 12.01 | 0.50879 | 0.00120 | 275 | 9.22 | 0.15829 | 0.00076 | | | | |
| 100 | 11.74 | 0.47487 | 0.00138 | 280 | 9.19 | 0.15452 | 0.00089 | | | | |
| 105 | 11.43 | 0.43593 | 0.00107 | 285 | 9.17 | 0.15201 | 0.00053 | | | | |
| 110 | 11.19 | 0.40578 | 0.00124 | 290 | 9.15 | 0.14950 | 0.00071 | | | | |
| 115 | 10.91 | 0.37060 | 0.00138 | 295 | 9.11 | 0.14447 | 0.00084 | | | | |
| 120 | 10.60 | 0.33166 | 0.00084 | 300 | 9.07 | 0.13945 | 0.00129 | | | | |
| 125 | 10.55 | 0.32538 | 0.00049 | 305 | 9.05 | 0.13693 | 0.00027 | | | | |
| 130 | 10.44 | 0.31156 | 0.00120 | 310 | 9.01 | 0.13191 | 0.00040 | | | | |
| 135 | 10.41 | 0.30779 | 0.00053 | 315 | 8.99 | 0.12940 | 0.00022 | | | | |
| 140 | 10.40 | 0.30653 | 0.00213 | 320 | 8.97 | 0.12688 | 0.00111 | | | | |
| 145 | 10.37 | 0.30276 | 0.00147 | 325 | 8.94 | 0.12312 | 0.00071 | | | | |
| 150 | 10.32 | 0.29648 | 0.00316 | 330 | 8.92 | 0.12060 | 0.00062 | | | | |
| 155 | 10.29 | 0.29271 | 0.00053 | 335 | 8.90 | 0.11809 | 0.00116 | | | | |
| 160 | 10.27 | 0.29020 | 0.00409 | 340 | 8.84 | 0.11055 | 0.00089 | | | | |
| 165 | 10.23 | 0.28518 | 0.00138 | 345 | 8.81 | 0.10678 | 0.00142 | | | | |
| 170 | 10.19 | 0.28015 | 0.00453 | 350 | 8.78 | 0.10302 | 0.00027 | | | | |
| 175 | 10.17 | 0.27764 | 0.00058 | 355 | 8.72 | 0.09548 | 0.00036 | | | | |

Para la prueba experimental 3

Tabla 13

Datos para condiciones de $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 1.57\text{ m/s}$

| t (min) | W promedio (g) | X (g H ₂ O/g ss) | N (g H ₂ O/ cm ² .min) | t (min) | W promedio (g) | X (g H ₂ O/g ss) | N (g H ₂ O/ cm ² .min) |
|-------------------|-----------------------------|--|---|-------------------|-----------------------------|--|---|
| 0 | 20.10 | 1.45970 | 0.00311 | 160 | 9.22 | 0.09893 | 0.00076 |
| 5 | 19.40 | 1.31228 | 0.00222 | 165 | 9.19 | 0.09535 | 0.00013 |
| 10 | 18.90 | 1.25268 | 0.00320 | 170 | 9.16 | 0.09178 | 0.00031 |
| 15 | 18.18 | 1.16687 | 0.00342 | 175 | 9.14 | 0.08939 | 0.00009 |
| 20 | 17.97 | 1.14184 | 0.00098 | 180 | 9.12 | 0.08701 | 0.00062 |
| 25 | 17.75 | 1.11561 | 0.00876 | 185 | 9.09 | 0.08343 | 0.00018 |
| 30 | 17.41 | 1.07509 | 0.00351 | 190 | 9.05 | 0.07867 | 0.00031 |
| 35 | 16.62 | 0.98093 | 0.00373 | 195 | 9.03 | 0.07628 | 0.00013 |
| 40 | 15.78 | 0.88081 | 0.00280 | 200 | 9.00 | 0.07271 | 0.00040 |
| 45 | 15.15 | 0.80572 | 0.00324 | 205 | 8.98 | 0.07032 | 0.00013 |
| 50 | 14.42 | 0.71871 | 0.00151 | 210 | 8.95 | 0.06675 | 0.00018 |
| 55 | 14.08 | 0.67819 | 0.00240 | 215 | 8.91 | 0.06198 | 0.00058 |
| 60 | 13.54 | 0.61383 | 0.00173 | 220 | 8.89 | 0.05959 | 0.00013 |
| 65 | 13.15 | 0.56734 | 0.00204 | 225 | 8.86 | 0.05602 | 0.00022 |
| 70 | 12.69 | 0.51251 | 0.00173 | 230 | 8.81 | 0.05006 | 0.00084 |
| 75 | 12.30 | 0.46603 | 0.00204 | 235 | 8.78 | 0.04648 | 0.00040 |
| 80 | 11.84 | 0.41120 | 0.00169 | 240 | 8.75 | 0.04291 | 0.00013 |
| 85 | 11.46 | 0.36591 | 0.00196 | 245 | 8.72 | 0.03933 | 0.00084 |
| 90 | 11.02 | 0.31347 | 0.00138 | 250 | 8.69 | 0.03576 | 0.00018 |
| 95 | 10.71 | 0.27652 | 0.00133 | 255 | 8.65 | 0.03099 | 0.00013 |
| 100 | 10.68 | 0.27294 | 0.00058 | 260 | 8.62 | 0.02741 | 0.00018 |
| 105 | 10.55 | 0.25745 | 0.00044 | 265 | 8.58 | 0.02265 | 0.00009 |
| 110 | 10.45 | 0.24553 | 0.00338 | 270 | 8.56 | 0.02026 | 0.00013 |
| 115 | 10.41 | 0.24076 | 0.00102 | 275 | 8.53 | 0.01669 | 0.00022 |
| 120 | 10.18 | 0.21335 | 0.00133 | 280 | 8.48 | 0.01073 | 0.00009 |
| 125 | 9.88 | 0.17759 | 0.00084 | 285 | 8.46 | 0.00834 | 0.00013 |
| 130 | 9.69 | 0.15495 | 0.00116 | 290 | 8.43 | 0.00477 | 0.00004 |
| 135 | 9.60 | 0.14422 | 0.00027 | 295 | 8.42 | 0.00358 | 0.00004 |
| 140 | 9.54 | 0.13707 | 0.00200 | 300 | 8.41 | 0.00238 | 0.00009 |
| 145 | 9.46 | 0.12753 | 0.00013 | 305 | 8.39 | 0 | 0 |
| 150 | 9.43 | 0.12396 | 0.00120 | 310 | 8.39 | 0 | 0 |
| 155 | 9.34 | 0.11323 | 0.00053 | | | | |

Para la prueba experimental 4

Tabla 14

Datos para condiciones de $T = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 1.57\text{ m/s}$

| t (min) | W promedio (g) | X (g H ₂ O /g ss) | N (g H ₂ O/ cm ² .min) | t (min) | W promedio (g) | X (g H ₂ O /g ss) | N (g H ₂ O/ cm ² .min) |
|------------|----------------------|------------------------------------|--|------------|----------------------|------------------------------------|--|
| 0 | 20.00 | 1.45700 | 0.00316 | 160 | 8.79 | 0.07985 | 0.00013 |
| 5 | 19.29 | 1.36978 | 0.00338 | 165 | 8.76 | 0.07617 | 0.00040 |
| 10 | 18.53 | 1.27641 | 0.00400 | 170 | 8.75 | 0.07494 | 0.00018 |
| 15 | 17.63 | 1.16585 | 0.00284 | 175 | 8.71 | 0.07002 | 0.00018 |
| 20 | 16.99 | 1.08722 | 0.00284 | 180 | 8.67 | 0.06511 | 0.00084 |
| 25 | 16.35 | 1.00860 | 0.00356 | 185 | 8.64 | 0.06143 | 0.00027 |
| 30 | 15.55 | 0.91032 | 0.00293 | 190 | 8.58 | 0.05405 | 0.00107 |
| 35 | 14.89 | 0.82924 | 0.00364 | 195 | 8.50 | 0.04423 | 0.00009 |
| 40 | 14.07 | 0.72850 | 0.00280 | 200 | 8.48 | 0.04177 | 0.00036 |
| 45 | 13.44 | 0.65111 | 0.00258 | 205 | 8.46 | 0.03931 | 0.00018 |
| 50 | 12.86 | 0.57985 | 0.00262 | 210 | 8.42 | 0.03440 | 0.00071 |
| 55 | 12.27 | 0.50737 | 0.00258 | 215 | 8.40 | 0.03194 | 0.00027 |
| 60 | 11.69 | 0.43612 | 0.00182 | 220 | 8.34 | 0.02457 | 0.00036 |
| 65 | 11.28 | 0.38575 | 0.00196 | 225 | 8.26 | 0.01474 | 0.00018 |
| 70 | 10.84 | 0.33170 | 0.00204 | 230 | 8.22 | 0.00983 | 0.00013 |
| 75 | 10.38 | 0.27518 | 0.00151 | 235 | 8.19 | 0.00614 | 0.00009 |
| 80 | 10.16 | 0.24816 | 0.00053 | 240 | 8.17 | 0.00369 | 0.00004 |
| 85 | 10.04 | 0.23342 | 0.00147 | 245 | 8.16 | 0.00246 | 0.00009 |
| 90 | 9.71 | 0.19287 | 0.00169 | 250 | 8.14 | 0 | 0 |
| 95 | 9.59 | 0.17813 | 0.00053 | 255 | 8.14 | 0 | 0 |
| 100 | 9.47 | 0.16339 | 0.00276 | | | | |
| 105 | 9.37 | 0.15111 | 0.00018 | | | | |
| 110 | 9.33 | 0.14619 | 0.00120 | | | | |
| 115 | 9.27 | 0.13882 | 0.00187 | | | | |
| 120 | 9.16 | 0.12531 | 0.00156 | | | | |
| 125 | 9.08 | 0.11548 | 0.00147 | | | | |
| 130 | 9.06 | 0.11302 | 0.00093 | | | | |
| 135 | 9.04 | 0.11057 | 0.00164 | | | | |
| 140 | 8.98 | 0.10319 | 0.00102 | | | | |
| 145 | 8.90 | 0.09337 | 0.00222 | | | | |
| 150 | 8.85 | 0.08722 | 0.00018 | | | | |
| 155 | 8.81 | 0.08231 | 0.00027 | | | | |

Para la prueba experimental 5

Tabla 15

Datos para condiciones de $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 2.63\text{ m/s}$

| t (min) | W promedio (g) | X (g H ₂ O /g ss) | N (g H ₂ O/ cm ² .min) | t (min) | W promedio (g) | X (g H ₂ O /g ss) | N (gH ₂ O/ cm ² .min) | t (min) | W promedio (g) | X (g H ₂ O /g ss) | N (g H ₂ O/ cm ² .min) |
|------------|----------------------|------------------------------------|--|------------|----------------------|------------------------------------|---|------------|----------------------|------------------------------------|--|
| 0 | 20.10 | 1.45497 | 0.00671 | 165 | 10.29 | 0.26103 | 0.00138 | 330 | 8.92 | 0.09314 | 0.00058 |
| 5 | 18.59 | 1.27819 | 0.00316 | 170 | 10.26 | 0.25735 | 0.00058 | 335 | 8.90 | 0.09069 | 0.00022 |
| 10 | 17.88 | 1.19118 | 0.00284 | 175 | 10.19 | 0.24877 | 0.00267 | 340 | 8.87 | 0.08701 | 0.00036 |
| 15 | 17.24 | 1.11275 | 0.00289 | 180 | 10.13 | 0.24142 | 0.00067 | 345 | 8.85 | 0.08456 | 0.00027 |
| 20 | 16.59 | 1.03309 | 0.00227 | 185 | 10.11 | 0.23897 | 0.00058 | 350 | 8.81 | 0.07966 | 0.00031 |
| 25 | 16.08 | 0.97059 | 0.00262 | 190 | 10.03 | 0.22917 | 0.00342 | 355 | 8.79 | 0.07721 | 0.00022 |
| 30 | 15.49 | 0.89828 | 0.00169 | 195 | 9.98 | 0.22304 | 0.00071 | 360 | 8.78 | 0.07598 | 0.00036 |
| 35 | 15.11 | 0.85172 | 0.00164 | 200 | 9.93 | 0.21691 | 0.00329 | 365 | 8.75 | 0.07230 | 0.00036 |
| 40 | 14.74 | 0.80637 | 0.00142 | 205 | 9.86 | 0.20833 | 0.00307 | 370 | 8.74 | 0.07108 | 0.00018 |
| 45 | 14.42 | 0.76716 | 0.00116 | 210 | 9.82 | 0.20343 | 0.00302 | 375 | 8.72 | 0.06863 | 0.00022 |
| 50 | 14.16 | 0.73529 | 0.00240 | 215 | 9.74 | 0.19363 | 0.00098 | 380 | 8.70 | 0.06618 | 0.00013 |
| 55 | 13.62 | 0.66912 | 0.00218 | 220 | 9.67 | 0.18505 | 0.00142 | 385 | 8.68 | 0.06373 | 0.00018 |
| 60 | 13.13 | 0.60907 | 0.00182 | 225 | 9.59 | 0.17525 | 0.00031 | 390 | 8.67 | 0.06250 | 0.00044 |
| 65 | 12.72 | 0.55882 | 0.00151 | 230 | 9.52 | 0.16667 | 0.00076 | 395 | 8.64 | 0.05882 | 0.00031 |
| 70 | 12.38 | 0.51716 | 0.00089 | 235 | 9.43 | 0.15564 | 0.00076 | 400 | 8.61 | 0.05515 | 0.00044 |
| 75 | 12.18 | 0.49265 | 0.00151 | 240 | 9.40 | 0.15196 | 0.00076 | 405 | 8.58 | 0.05147 | 0.00053 |
| 80 | 11.84 | 0.45098 | 0.00120 | 245 | 9.35 | 0.14583 | 0.00040 | 410 | 8.57 | 0.05025 | 0.00027 |
| 85 | 11.57 | 0.41789 | 0.00034 | 250 | 9.33 | 0.14338 | 0.00044 | 415 | 8.51 | 0.04289 | 0.00022 |
| 90 | 11.45 | 0.40319 | 0.00033 | 255 | 9.30 | 0.13971 | 0.00049 | 420 | 8.46 | 0.03676 | 0.00022 |
| 95 | 11.38 | 0.39461 | 0.00031 | 260 | 9.26 | 0.13480 | 0.00013 | 425 | 8.41 | 0.03064 | 0.00013 |
| 100 | 11.28 | 0.38235 | 0.00034 | 265 | 9.23 | 0.13113 | 0.00018 | 430 | 8.38 | 0.02696 | 0.00009 |
| 105 | 11.23 | 0.37623 | 0.00035 | 270 | 9.19 | 0.12623 | 0.00009 | 435 | 8.36 | 0.02451 | 0.00013 |
| 110 | 11.19 | 0.37132 | 0.00036 | 275 | 9.17 | 0.12377 | 0.00013 | 440 | 8.33 | 0.02083 | 0.00018 |
| 115 | 11.15 | 0.36642 | 0.00034 | 280 | 9.14 | 0.12010 | 0.00018 | 445 | 8.29 | 0.01593 | 0.00018 |
| 120 | 11.02 | 0.35049 | 0.00036 | 285 | 9.12 | 0.11765 | 0.00040 | 450 | 8.25 | 0.01103 | 0.00013 |
| 125 | 10.90 | 0.33578 | 0.00034 | 290 | 9.10 | 0.11520 | 0.00031 | 455 | 8.22 | 0.00735 | 0.00013 |
| 130 | 10.83 | 0.32721 | 0.00034 | 295 | 9.08 | 0.11275 | 0.00080 | 460 | 8.19 | 0.00368 | 0.00004 |
| 135 | 10.78 | 0.32108 | 0.00025 | 300 | 9.04 | 0.10784 | 0.00062 | 465 | 8.18 | 0.00245 | 0.00004 |
| 140 | 10.70 | 0.31127 | 0.00032 | 305 | 9.03 | 0.10662 | 0.00027 | 470 | 8.17 | 0.00123 | 0.00004 |
| 145 | 10.66 | 0.30637 | 0.00036 | 310 | 9.01 | 0.10417 | 0.00049 | 475 | 8.16 | 0 | 0 |
| 150 | 10.61 | 0.30025 | 0.00071 | 315 | 8.99 | 0.10172 | 0.00062 | 480 | 8.16 | 0 | 0 |
| 155 | 10.45 | 0.28064 | 0.00084 | 320 | 8.97 | 0.09926 | 0.00031 | | | | |
| 160 | 10.36 | 0.26961 | 0.00031 | 325 | 8.94 | 0.09559 | 0.00040 | | | | |

Para la prueba experimental 6

Tabla 16

Datos para condiciones de $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 2.63\text{ m/s}$

| t (min) | W promedio (g) | X (g H ₂ O /g ss) | N (g H ₂ O/cm ² .min) | t (min) | W promedio (g) | X (g H ₂ O /g ss) | N (g H ₂ O/cm ² .min) | t (min) | W promedio (g) | X (g H ₂ O /g ss) | N (g H ₂ O/cm ² .min) |
|---------|----------------|------------------------------|---|---------|----------------|------------------------------|---|---------|----------------|------------------------------|---|
| 0 | 19.86 | 1.45323 | 0.00293 | 160 | 9.69 | 0.21734 | 0.00280 | 320 | 8.19 | 0.02889 | 0.00004 |
| 5 | 19.20 | 1.41206 | 0.00422 | 165 | 9.52 | 0.19598 | 0.00298 | 325 | 8.18 | 0.02764 | 0.00022 |
| 10 | 18.25 | 1.29271 | 0.00391 | 170 | 9.40 | 0.18090 | 0.00360 | 330 | 8.17 | 0.02638 | 0.00036 |
| 15 | 17.37 | 1.18216 | 0.00400 | 175 | 9.35 | 0.17462 | 0.00129 | 335 | 8.15 | 0.02387 | 0.00044 |
| 20 | 16.47 | 1.06910 | 0.00249 | 180 | 9.30 | 0.16834 | 0.00200 | 340 | 8.13 | 0.02136 | 0.00018 |
| 25 | 15.91 | 0.99874 | 0.00284 | 185 | 9.15 | 0.14950 | 0.00249 | 345 | 8.09 | 0.01633 | 0.00018 |
| 30 | 15.27 | 0.91834 | 0.00284 | 190 | 9.10 | 0.14322 | 0.00253 | 350 | 8.05 | 0.01131 | 0.00009 |
| 35 | 14.63 | 0.83794 | 0.00311 | 195 | 9.06 | 0.13819 | 0.00093 | 355 | 8.03 | 0.00879 | 0.00009 |
| 40 | 13.93 | 0.75000 | 0.00231 | 200 | 8.99 | 0.12940 | 0.00178 | 360 | 8.01 | 0.00628 | 0.00009 |
| 45 | 13.41 | 0.68467 | 0.00222 | 205 | 8.91 | 0.11935 | 0.00169 | 365 | 7.99 | 0.00377 | 0.00004 |
| 50 | 12.91 | 0.62186 | 0.00213 | 210 | 8.88 | 0.11558 | 0.00187 | 370 | 7.98 | 0.00251 | 0.00009 |
| 55 | 12.80 | 0.60804 | 0.00391 | 215 | 8.85 | 0.11181 | 0.00116 | 375 | 7.96 | 0 | 0 |
| 60 | 12.60 | 0.58291 | 0.00471 | 220 | 8.74 | 0.09799 | 0.00093 | 380 | 7.96 | 0 | 0 |
| 65 | 12.43 | 0.56156 | 0.00227 | 225 | 8.65 | 0.08668 | 0.00084 | | | | |
| 70 | 12.36 | 0.55276 | 0.00364 | 230 | 8.62 | 0.08291 | 0.00093 | | | | |
| 75 | 11.98 | 0.50503 | 0.00373 | 235 | 8.59 | 0.07915 | 0.00080 | | | | |
| 80 | 11.92 | 0.49749 | 0.00169 | 240 | 8.56 | 0.07538 | 0.00098 | | | | |
| 85 | 11.75 | 0.47613 | 0.00271 | 245 | 8.53 | 0.07161 | 0.00031 | | | | |
| 90 | 11.54 | 0.44975 | 0.00178 | 250 | 8.52 | 0.07035 | 0.00049 | | | | |
| 95 | 11.34 | 0.42462 | 0.00271 | 255 | 8.48 | 0.06533 | 0.00062 | | | | |
| 100 | 11.14 | 0.39950 | 0.00182 | 260 | 8.46 | 0.06281 | 0.00022 | | | | |
| 105 | 11.08 | 0.39196 | 0.00342 | 265 | 8.44 | 0.06030 | 0.00044 | | | | |
| 110 | 10.90 | 0.36935 | 0.00396 | 270 | 8.41 | 0.05653 | 0.00031 | | | | |
| 115 | 10.73 | 0.34799 | 0.00187 | 275 | 8.39 | 0.05402 | 0.00058 | | | | |
| 120 | 10.61 | 0.33291 | 0.00267 | 280 | 8.37 | 0.05151 | 0.00049 | | | | |
| 125 | 10.46 | 0.31407 | 0.00311 | 285 | 8.34 | 0.04774 | 0.00022 | | | | |
| 130 | 10.35 | 0.30805 | 0.00444 | 290 | 8.32 | 0.04523 | 0.00027 | | | | |
| 135 | 10.31 | 0.29523 | 0.00133 | 295 | 8.31 | 0.04397 | 0.00036 | | | | |
| 140 | 10.01 | 0.25754 | 0.00111 | 300 | 8.29 | 0.04146 | 0.00013 | | | | |
| 145 | 9.95 | 0.25000 | 0.00267 | 305 | 8.28 | 0.04020 | 0.00022 | | | | |
| 150 | 9.83 | 0.23492 | 0.00342 | 310 | 8.26 | 0.03769 | 0.00013 | | | | |
| 155 | 9.76 | 0.22613 | 0.00182 | 315 | 8.23 | 0.03392 | 0.00018 | | | | |

Para la prueba experimental 7

Tabla 17

Datos para condiciones de $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 2.63\text{ m/s}$

| t (min) | W promedio (g) | X (g H ₂ O /g ss) | N (g H ₂ O/ cm ² .min) | t (min) | W promedio (g) | X (g H ₂ O /g ss) | N (g H ₂ O/ cm ² .min) |
|------------|----------------------|------------------------------------|--|------------|----------------------|------------------------------------|--|
| 0 | 19.78 | 1.45997 | 0.00404 | 160 | 8.62 | 0.05897 | 0.00018 |
| 5 | 18.87 | 1.31818 | 0.00413 | 165 | 8.58 | 0.05405 | 0.00027 |
| 10 | 17.94 | 1.20393 | 0.00289 | 170 | 8.55 | 0.05037 | 0.00036 |
| 15 | 17.29 | 1.12408 | 0.00373 | 175 | 8.52 | 0.04668 | 0.00022 |
| 20 | 16.45 | 1.02088 | 0.00222 | 180 | 8.47 | 0.04054 | 0.00018 |
| 25 | 15.95 | 0.95946 | 0.00444 | 185 | 8.43 | 0.03563 | 0.00031 |
| 30 | 14.95 | 0.83661 | 0.00302 | 190 | 8.36 | 0.02703 | 0.00027 |
| 35 | 14.27 | 0.75307 | 0.00218 | 195 | 8.30 | 0.01966 | 0.00013 |
| 40 | 13.78 | 0.69287 | 0.00222 | 200 | 8.27 | 0.01597 | 0.00018 |
| 45 | 13.28 | 0.63145 | 0.00262 | 205 | 8.23 | 0.01106 | 0.00013 |
| 50 | 12.69 | 0.55897 | 0.00307 | 210 | 8.20 | 0.00737 | 0.00013 |
| 55 | 12.00 | 0.47420 | 0.00236 | 215 | 8.17 | 0.00369 | 0.00013 |
| 60 | 11.47 | 0.40909 | 0.00293 | 220 | 8.14 | 0 | 0 |
| 65 | 10.81 | 0.32801 | 0.00289 | 225 | 8.14 | 0 | 0 |
| 70 | 10.16 | 0.24816 | 0.00062 | | | | |
| 75 | 10.02 | 0.23096 | 0.00164 | | | | |
| 80 | 9.65 | 0.18550 | 0.00071 | | | | |
| 85 | 9.49 | 0.16585 | 0.00071 | | | | |
| 90 | 9.40 | 0.15479 | 0.00080 | | | | |
| 95 | 9.35 | 0.14865 | 0.00098 | | | | |
| 100 | 9.33 | 0.14619 | 0.00049 | | | | |
| 105 | 9.22 | 0.13268 | 0.00040 | | | | |
| 110 | 9.13 | 0.12162 | 0.00036 | | | | |
| 115 | 9.05 | 0.11179 | 0.00040 | | | | |
| 120 | 8.97 | 0.10197 | 0.00044 | | | | |
| 125 | 8.97 | 0.10197 | 0.00071 | | | | |
| 130 | 8.96 | 0.10074 | 0.00040 | | | | |
| 135 | 8.87 | 0.08968 | 0.00027 | | | | |
| 140 | 8.81 | 0.08231 | 0.00049 | | | | |
| 145 | 8.70 | 0.06880 | 0.00036 | | | | |
| 150 | 8.68 | 0.06634 | 0.00044 | | | | |
| 155 | 8.64 | 0.06143 | 0.00053 | | | | |

Para la prueba experimental 8

Tabla 18

Datos para condiciones de $T = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 2.63\text{ m/s}$

| t (min) | W promedio (g) | X (g H ₂ O /g ss) | N (g H ₂ O/ cm ² .min) | t (min) | W promedio (g) | X (g H ₂ O /g ss) | N (g H ₂ O/ cm ² .min) |
|------------|----------------------|------------------------------------|--|------------|----------------------|------------------------------------|--|
| 0 | 19.80 | 1.45657 | 0.00529 | 160 | 8.46 | 0.04963 | 0.00076 |
| 5 | 18.61 | 1.30893 | 0.00231 | 165 | 8.39 | 0.04094 | 0.00062 |
| 10 | 18.09 | 1.24442 | 0.00413 | 170 | 8.36 | 0.03722 | 0.00031 |
| 15 | 17.16 | 1.12903 | 0.00164 | 175 | 8.29 | 0.02854 | 0.00018 |
| 20 | 16.79 | 1.08313 | 0.00444 | 180 | 8.26 | 0.02481 | 0.00013 |
| 25 | 16.29 | 1.02109 | 0.00529 | 185 | 8.25 | 0.02357 | 8.9E-05 |
| 30 | 15.79 | 0.95906 | 0.00307 | 190 | 8.23 | 0.02109 | 0.000267 |
| 35 | 15.10 | 0.87345 | 0.00187 | 195 | 8.17 | 0.01365 | 0.000133 |
| 40 | 14.68 | 0.82134 | 0.00204 | 200 | 8.14 | 0.00993 | 8.89E-05 |
| 45 | 14.46 | 0.79404 | 0.00440 | 205 | 8.12 | 0.00744 | 8.89E-05 |
| 50 | 14.22 | 0.76427 | 0.00333 | 210 | 8.10 | 0.00496 | 0.000178 |
| 55 | 13.47 | 0.67122 | 0.00191 | 215 | 8.06 | 0 | 0 |
| 60 | 13.04 | 0.61787 | 0.00276 | 220 | 8.06 | 0 | 0 |
| 65 | 12.42 | 0.54094 | 0.00316 | | | | |
| 70 | 11.71 | 0.45285 | 0.00151 | | | | |
| 75 | 11.37 | 0.41067 | 0.00187 | | | | |
| 80 | 10.95 | 0.35856 | 0.00089 | | | | |
| 85 | 10.75 | 0.33375 | 0.00351 | | | | |
| 90 | 10.51 | 0.30397 | 0.00440 | | | | |
| 95 | 10.22 | 0.26799 | 0.00409 | | | | |
| 100 | 9.96 | 0.20763 | 0.00196 | | | | |
| 105 | 9.52 | 0.18114 | 0.00098 | | | | |
| 110 | 9.30 | 0.15385 | 0.00124 | | | | |
| 115 | 9.21 | 0.14268 | 0.00160 | | | | |
| 120 | 9.10 | 0.12903 | 0.00178 | | | | |
| 125 | 9.02 | 0.11911 | 0.00076 | | | | |
| 130 | 8.92 | 0.10670 | 0.00098 | | | | |
| 135 | 8.85 | 0.09801 | 0.00067 | | | | |
| 140 | 8.70 | 0.07940 | 0.00089 | | | | |
| 145 | 8.61 | 0.06824 | 0.00111 | | | | |
| 150 | 8.56 | 0.06203 | 0.00120 | | | | |
| 155 | 8.50 | 0.05459 | 0.00062 | | | | |

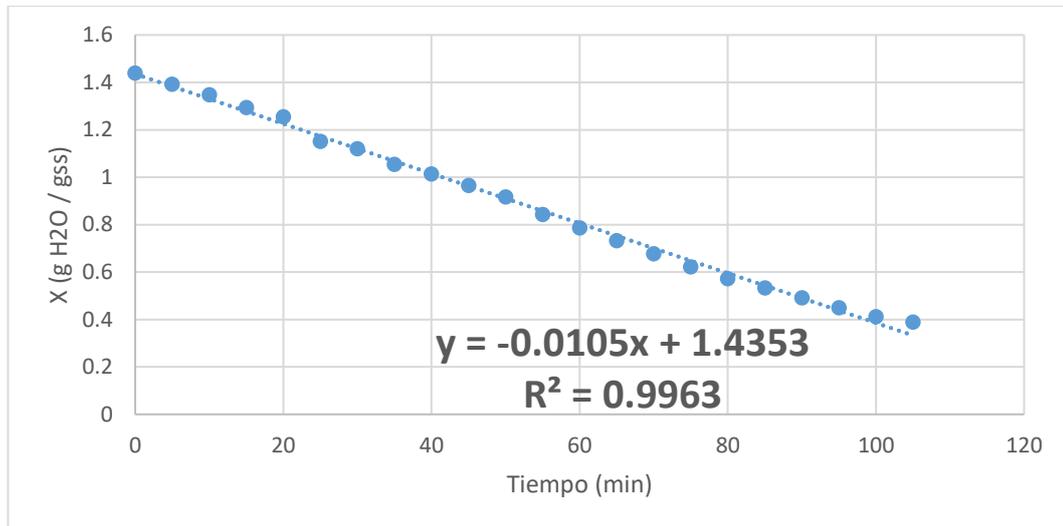
ANEXO 4

CURVAS DE VELOCIDAD DE SECADO CONSTANTE

Para la prueba experimental 1

Figura 43

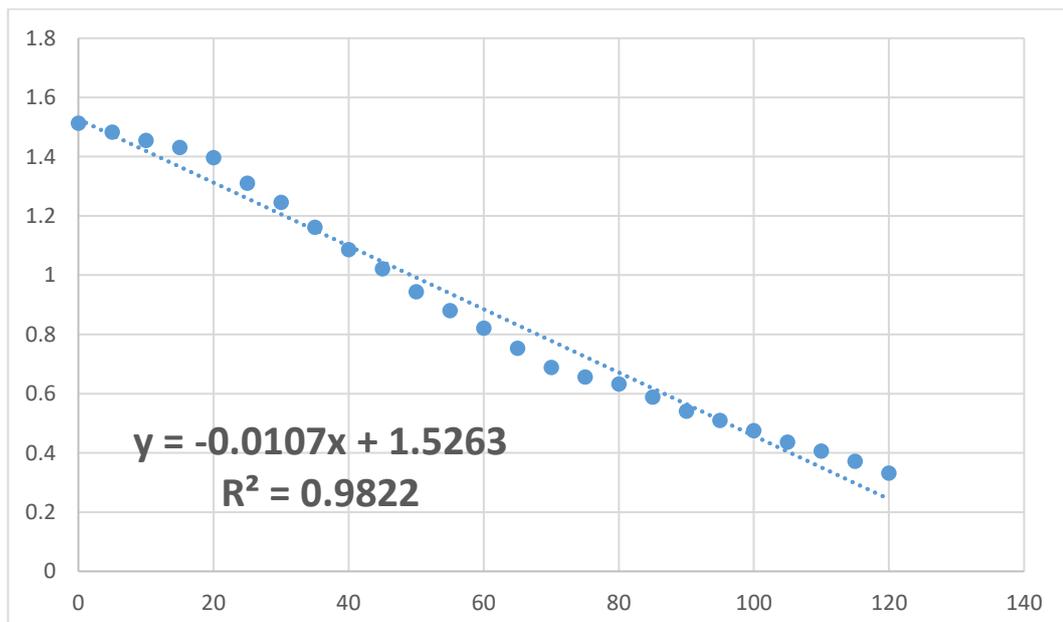
Datos para condiciones de $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 1.57\text{ m/s}$



Para la prueba experimental 2

Figura 44

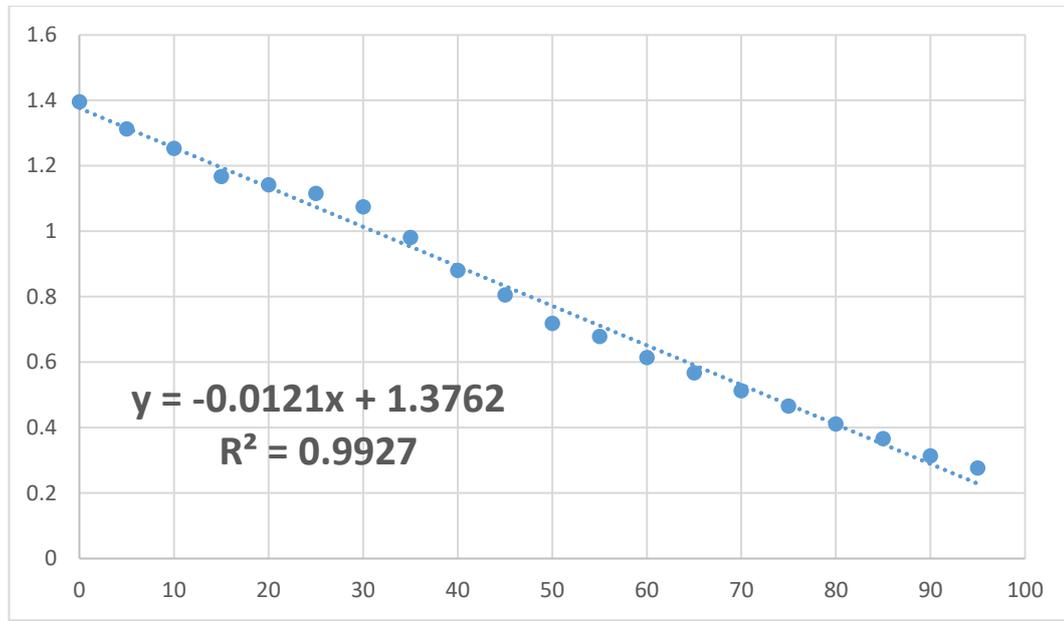
Datos para condiciones de $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 1.57\text{ m/s}$



Para la prueba experimental 3

Figura 45

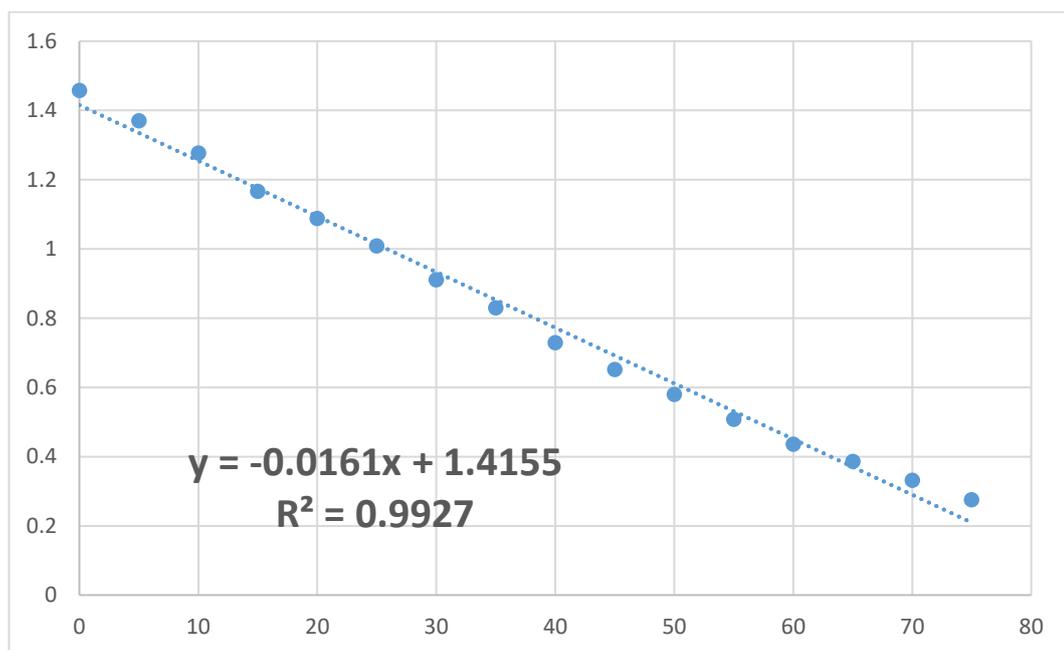
Datos para condiciones de $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 1.57\text{ m/s}$



Para la prueba experimental 4

Figura 46

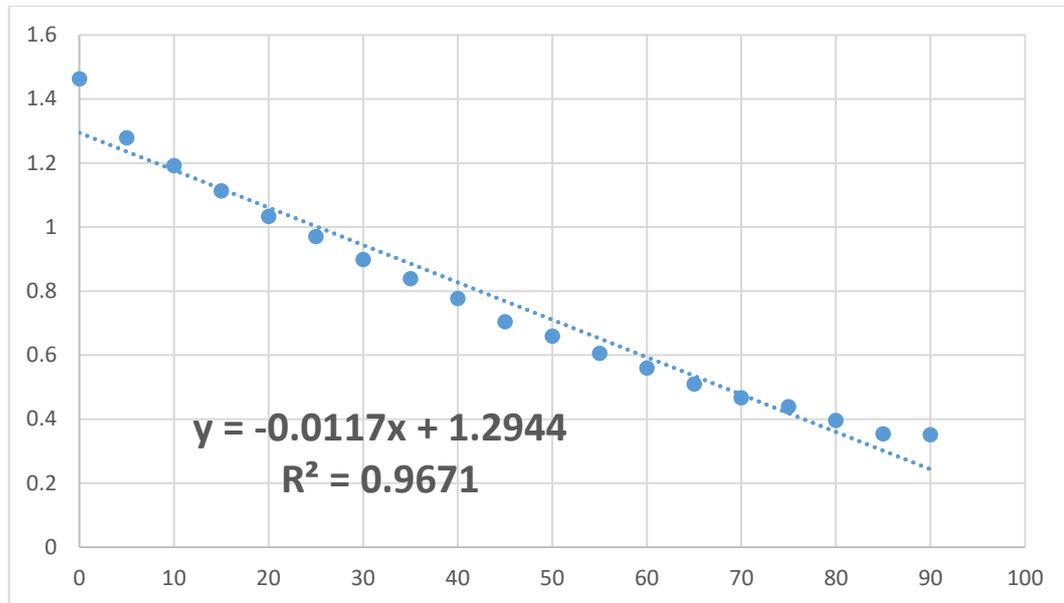
Datos para condiciones de $T = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 1.57\text{ m/s}$



Para la prueba experimental 5

Figura 47

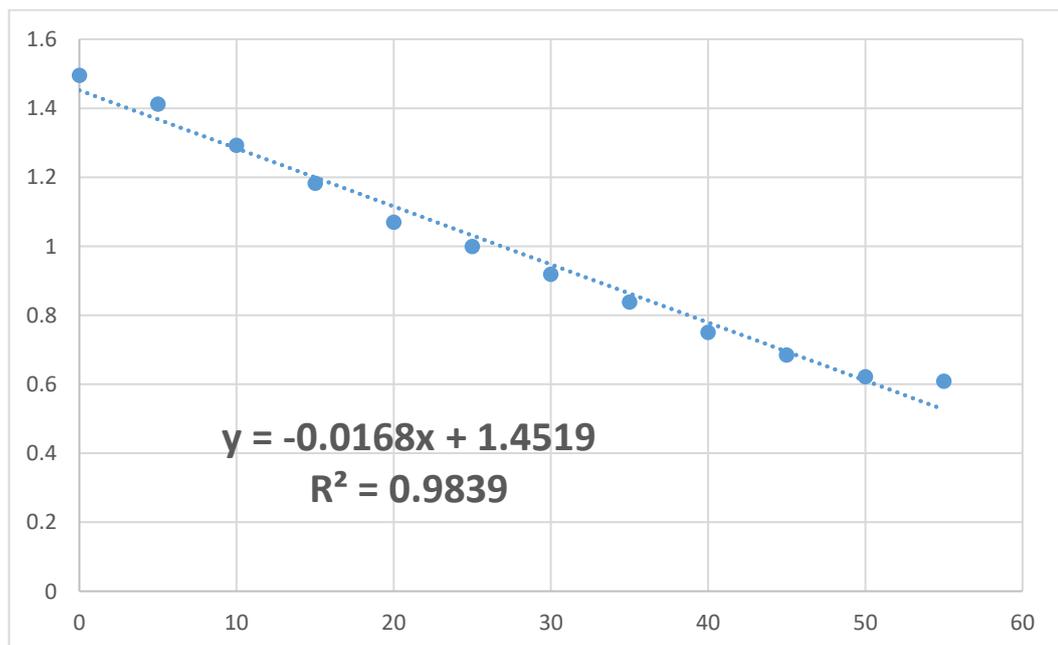
Datos para condiciones de $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 2.63\text{ m/s}$



Para la prueba experimental 6

Figura 48

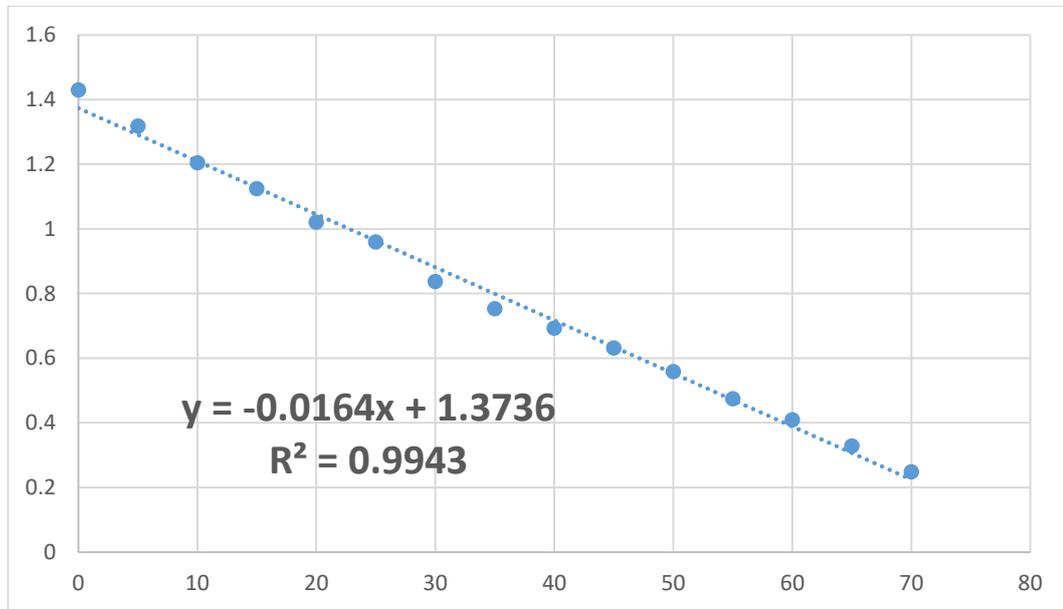
Datos para condiciones de $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 2.63\text{ m/s}$



Para la prueba experimental 7

Figura 49

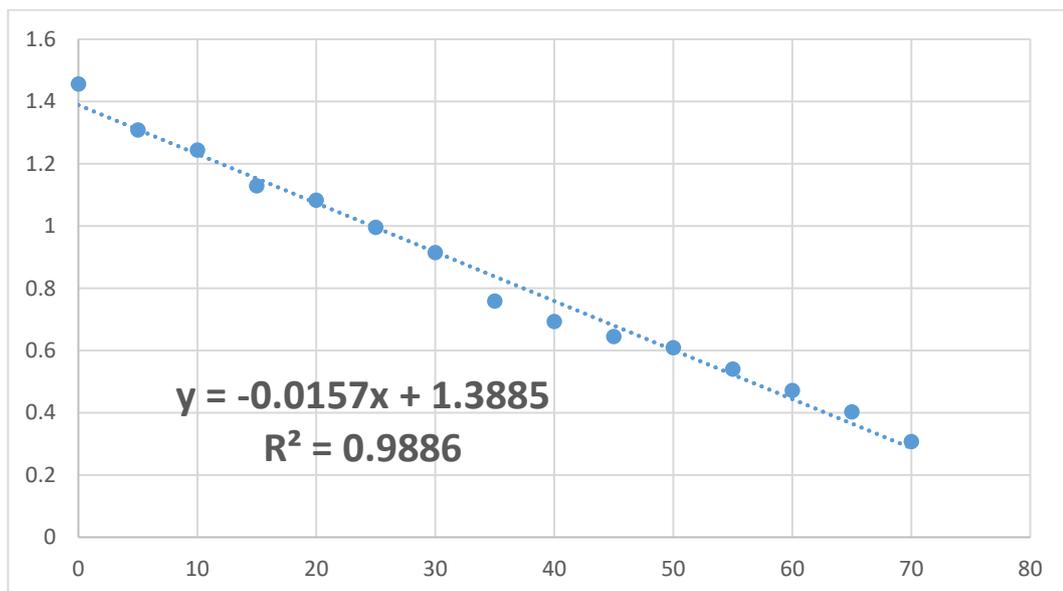
Datos para condiciones de $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 2.63\text{ m/s}$



Para la prueba experimental 8

Figura 50

Datos para condiciones de $T = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_{\text{aire}} = 2.63\text{ m/s}$



ANEXO 5

DETERMINACIÓN DE PROTEÍNAS

Se utilizó el método de Bradford (espectrofotometría UV VIS), que permitió determinar la cantidad de proteínas totales en las muestras en estudio, y de este modo se tuvo la variable de respuesta para la optimización de los parámetros de operación.

a. Método de Bradford

El reactivo de Bradford se preparó a partir del colorante azul de Coomasie, etanol absoluto, ácido fosfórico y agua destilada. Las proporciones se muestran en la tabla 19.

Tabla 19

Proporciones en la composición del reactivo de Bradford

| Componente | Cantidad |
|------------------------|-----------------|
| Azul de Coomasie | 10 mg |
| Etanol absoluto | 4.7 mL |
| Ácido fosfórico al 88% | 10 mL |
| Agua | Hasta 100 mL |

Fuente: Fernández y Galván (2010)

Para la curva de calibración (tabla 20) se preparó un patrón proteico de albúmina con concentración de 800 mg/L (800 mg de albúmina en 1 L de reactivo de Bradford), y se tomaron volúmenes de 1, 2 y 3 mL, completados con más reactivo de Bradford hasta 3 mL (capacidad máxima de la cubeta de cuarzo usada en espectrofotometría).

Tabla 20

Composición de los puntos de la curva de calibración

| Cubeta | V patrón | V reactivo | V total | W (mg) |
|---------------|-----------------|-------------------|----------------|---------------|
| 1 | 0 | 3 | 3 | 0 |
| 2 | 1 | 2 | 3 | 0.8 |
| 3 | 2 | 1 | 3 | 1.6 |
| 4 | 3 | 0 | 3 | 2.4 |

Se caracterizó la materia prima fresca. De este modo, se tuvo una referencia para el análisis de las muestras provenientes del secado.

Se pesaron 100 g de maca fresca y se licuaron en 1 L de agua destilada (figura 51). Se realizó una prueba de 1 mL de solución con 2 mL de reactivo de Bradford, donde se determinó cualitativamente que la concentración de esta disolución era muy alta (azul muy intenso) y por lo tanto la absorbancia de esta muestra acomplejada se encontraría fuera del límite superior de la curva de calibración. Por ello, se procedió a hacer la dilución de una alícuota de 1 mL de la solución en 10 mL de agua destilada (figura 52). Esta nueva mezcla fue acomplejada con el reactivo de Bradford, se colocó en la celda de cuarzo 1 mL de la solución y se completó a 3 mL con el reactivo de Bradford y se realizó la lectura.

Después del secado se realizó el análisis de proteínas a cada una de las muestras de maca seca molida. Para ello, se utilizaron 5 g de maca seca molida, y se disolvieron en 50 mL de agua.

Figura 51

Muestra de la mezcla resultante del licuado de maca fresca

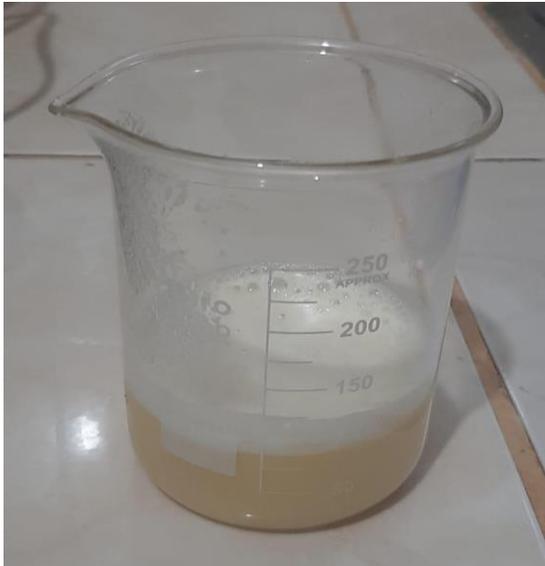


Figura 52

Alícuota diluida



Se realizó una prueba de 1 mL de solución con 2 mL de reactivo de Bradford, donde se determinó cualitativamente, al igual que con la muestra de maca fresca, que la concentración de esta disolución era muy alta (azul

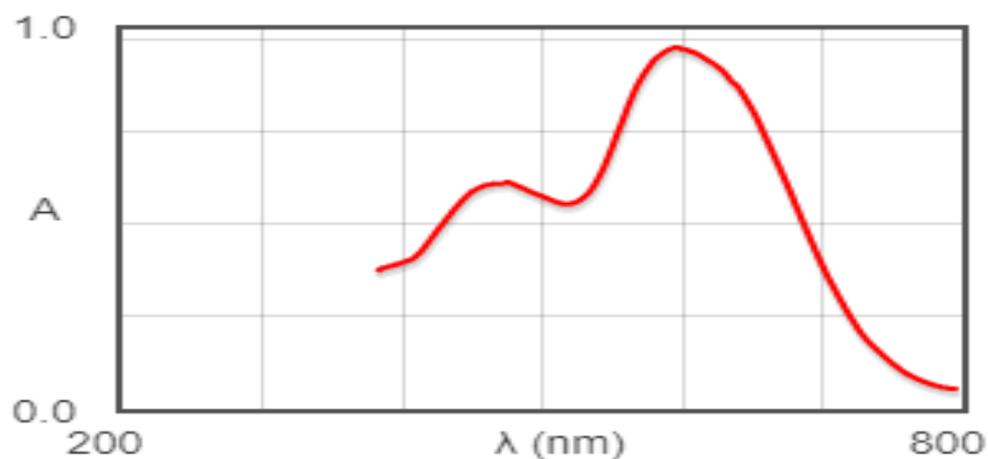
muy intenso), por ello, se procedió a hacer la dilución de una alícuota de 1 mL de cada una de las soluciones preparadas en 10 mL de agua. Se colocaron en la celda de cuarzo 1 mL de cada una de las nuevas disoluciones y se completaron a 3 mL con el reactivo de Bradford, después se realizó la lectura de cada una a 595 nm.

a. Determinación de la longitud de onda óptima (λ_{opt})

Se realizó la determinación de la longitud de onda óptima utilizando una mezcla de 1 mL de solución patrón proteica de albumina con 2 mL de reactivo de Bradford. Para ello se realizó un barrido en toda la escala UV – VIS, y se obtuvo el espectro mostrado en la figura 53.

Figura 53

Espectro del barrido a diferentes longitudes de onda para una muestra proteica



Del espectro mostrado se confirma lo mencionado en la literatura, que la longitud de onda óptima para ese tipo de muestras es de 595 nm. Este valor fue utilizado para las mediciones siguientes.

b. Preparación de la curva de calibración

Se utilizaron los puntos especificados anteriormente, y se realizó la medición de absorbancia a 595 nm. Los resultados se muestran en la tabla 21.

Tabla 21

Valores de absorbancia para los puntos de la curva de calibración

| Cubeta | V patrón | V reactivo | V total | W (mg) | C (mg/L) | A ₅₉₅ |
|--------|----------|------------|---------|--------|----------|------------------|
| 1 | 0 | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 2 | 3 | 0.8 | 266.66 | 0.176 |
| 3 | 2 | 1 | 3 | 1.6 | 533.33 | 0.354 |
| 4 | 3 | 0 | 3 | 2.4 | 800 | 0.551 |

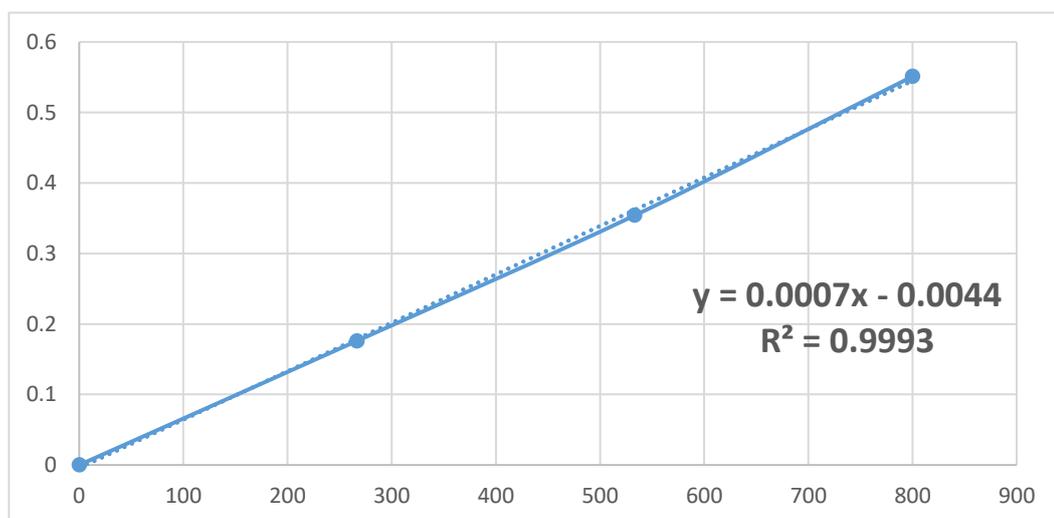
De los datos mostrados en la tabla 21, se realizó la curva de calibración.

Esto se muestra en la figura 54. La ecuación obtenida de la regresión lineal fue:

$$A = 0.0007 * C_{Proteinas} - 0.0044$$

Figura 54

Curva de calibración para la cantidad de proteínas



ANEXO 6

ESPECIFICACIONES ESPECTROFOTÓMETRO – UV/VIS DOBLE HAZ

| | GENESYS 10S UV-Vis | GENESYS 10S Vis |
|----------------------------------|---|--|
| Diseño óptico | Doble haz - Detector interno de referencia | Haz simple |
| Ancho de banda espectral | 1,8 nm | 5,0 nm |
| Fuente de luz (vida útil típica) | Lámpara flash de xenón (5 años; 3 años garantizados) | Lámpara halógena de tungsteno (1.000 horas) |
| Detector | Doble Fotodiodos de silicio | Fotodiodo de silicio |
| Longitud de onda: Rango | 190 - 1.100 nm | 325 - 1.100 nm |
| Exactitud | ± 1,0 nm | |
| Repetibilidad | ± 0,5 nm | |
| Velocidad de rotación | 11.000 nm/min | |
| Velocidad de barrido | 10 - 4.200 nm/min | |
| Intervalo de datos | 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0 nm | 1,0; 2,0; 3,0; 5,0 nm |
| Fotometría: | | |
| Rango de linealidad | Hasta 3,5 A a 260 nm | Hasta 3,0 A a 340 nm |
| Pantalla | -0,5 - 5,0 A; -1,5 - 125% T; ± 9999 C | -0,1 - 3,0 A; -0,3 - 125% T; ± 9999 C |
| Exactitud | ± 0,005 A a 1,0 A 0,010 A K ₂ Cr ₂ O ₇ | 0,5% o ± 0,005 A, la que sea mayor, hasta 2 A |
| Ruido | < 0,00025 a 0,0 A < 0,00050 a 1,0 A < 0,00080 a 2,0 A RMS a 260 nm | < 0,001 A a 0,0 A < 0,002 A a 2,0 A Pico a pico a 340 nm |
| Corrimiento | < 0,0005 A/h | 0,002 A/hr tras calentamiento |
| Luz difusa | < 0,08% T a 220, 340 nm (NaI, NaNO ₂) < 1,0% T 198 nm (KCl) | < 1,0% T a 340, y 400 nm |
| Pantalla | Gráfica con retroiluminación LED. 9,7 x 7,1 cm (3,8 x 2,8 pulg.) | |
| Teclado | Membrana sellada, con teclas de respuesta táctiles | |
| Impresora (opcional) | Interna, 40 columnas (texto y gráficos) Externa, USB (HP PCL 3 o superior) | |
| Conectividad | Puerto USB tipo A para unidad de memoria USB (panel frontal) Puerto USB tipo B para conectividad con PC opcional (panel trasero) Puerto USB tipo A para impresora externa (panel trasero) | |
| Dimensiones | 30 x 40 x 25 cm (11,8 x 15,7 x 9,8 pulg.) (ancho x fondo x alto) | |
| Peso | 8,6 kg (19 libras) | |
| Requisitos eléctricos | 100 - 240 V con selección automática; 50 - 60 Hz | |

Incluido

- Espectrofotómetro serie GENESYS 10S
- Portaceldas de 6 posiciones
- Portaceldas sencillo
- Fuente de alimentación 100 - 240 V automática
- Cable de alimentación CA
- Fusibles de repuesto
- Cubierta protectora de plástico
- Unidad de memoria USB
- Cable USB

Nota: software no incluido con instrumento; solicitar por separado.

Información para pedidos

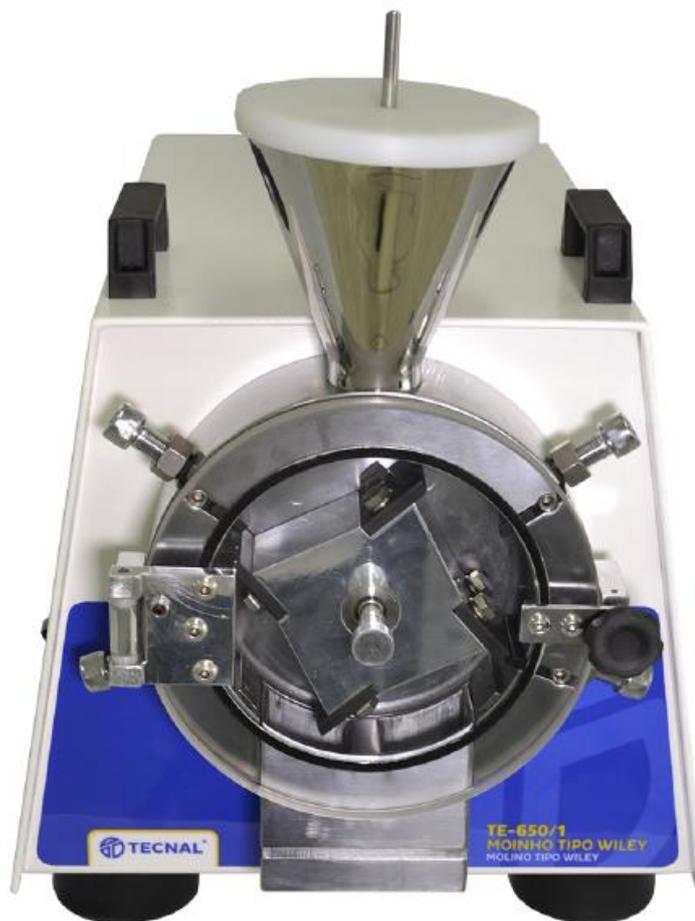
| Instrumentos GENESYS 10S UV-Vis | Nº pieza |
|---|-----------------|
| GENESYS 10S UV-Vis, cable alimentación EEUU | 840-208100 |
| GENESYS 10S UV-Vis con impresora interna, cable alim. EEUU | 840-208200 |
| GENESYS 10S UV-Vis, cables alim. Euroconector y RU | 840-209700 |
| GENESYS 10S UV-Vis con impresora interna, cables alimentación euroconector y RU | 840-209800 |
| Instrumentos GENESYS 10S Vis | Nº pieza |
| GENESYS 10S Vis, cable alimentación EEUU | 840-207900 |
| GENESYS 10S Vis con impresora interna, cable alim. EEUU | 840-208000 |
| GENESYS 10S Vis, cables alim. euroconector y RU | 840-209500 |
| GENESYS 10S Vis con impresora interna, cables alimentación euroconector y RU | 840-209600 |

ANEXO 7
ESPECIFICACIONES MOLINO



Teléfono: +55 (19) 2105-6161 **Correo Electrónico:** comex@tecnal.com.br
Dirección: João Leonardo Fustaino, nº 325 Distrito Industrial Uninorte Piracicaba/SP • CEP 13.413-102

Macro molino tipo Wiley TE-650/1
Marca Tecnal



Utilizado para molienda de muestras secas de hojas, raíces, tubérculos, pellets de plásticos y otros.

Características Técnicas

| | |
|-----------------------|--|
| Rotación | Fija en 1730 RPM |
| Motor | Inducción 1/2 CV |
| Rotor | 4 cuchillos fijos en acero especial de alta dureza con tratamiento anti oxidación |
| Capacidad de molienda | ± 15 kg/hora (dependiendo del material a ser molido) |
| Bocal de salida | Rectangular de Anchura=92 x Profundidad=32 mm |
| Seguridad | Permite el giro del cuchillo/rotor solamente cuando la tapa está cerrada |
| Cámara de molienda | En acero cromado con 4 cuchillos regulables en acero especial de alta dureza y tratamiento anti oxidación |
| Tapa | En acrílico transparente |
| Gabinete | En acero carbono con tratamiento anticorrosivo y pintura electrostática |
| Dimensiones | Ancho=360 x Profundidad=600 x Alto=500 mm |
| Peso | 40 kg |
| Potencia | 500 Watts |
| Voltaje | 220 Volts |
| ACOMPAÑA | 02 Fusibles extra; Manual de Instrucciones con Término de Garantía; 03 tamices en acero inoxidable con malla mesh 10, 20, 30 |
| Aplicación | Utilizado para molienda de hojas, pellets de plásticos, raíces, tubérculos y granos |

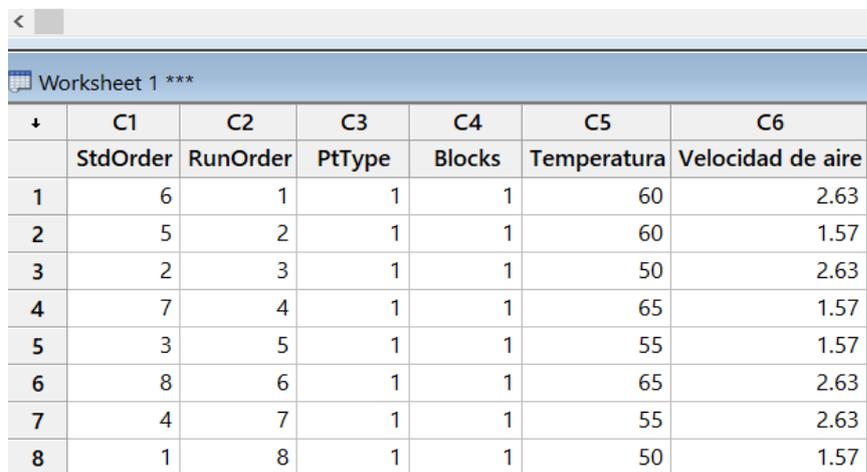
ANEXO 8
DISEÑO FACTORIAL EN MINITAB

Welcome to Minitab, press F1 for help.

Multilevel Factorial Design

Factors: 2 Replicates: 1
Base runs: 8 Total runs: 8
Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 4; 2



The screenshot shows a Minitab worksheet titled "Worksheet 1 ***". It contains a table with 8 rows and 7 columns. The columns are labeled C1 through C6, with corresponding variable names: StdOrder, RunOrder, PtType, Blocks, Temperatura, and Velocidad de aire. The data is as follows:

| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 |
|---|----------|----------|--------|--------|-------------|-------------------|
| | StdOrder | RunOrder | PtType | Blocks | Temperatura | Velocidad de aire |
| 1 | 6 | 1 | 1 | 1 | 60 | 2.63 |
| 2 | 5 | 2 | 1 | 1 | 60 | 1.57 |
| 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | 50 | 2.63 |
| 4 | 7 | 4 | 1 | 1 | 65 | 1.57 |
| 5 | 3 | 5 | 1 | 1 | 55 | 1.57 |
| 6 | 8 | 6 | 1 | 1 | 65 | 2.63 |
| 7 | 4 | 7 | 1 | 1 | 55 | 2.63 |
| 8 | 1 | 8 | 1 | 1 | 50 | 1.57 |

ANEXO 9
IMÁGENES SECADOR ROTATORIO EXPERIMENTAL





ANEXO 10

Análisis de varianza para la cantidad de proteínas

Response Surface Regression: [] Proteínas g/100g versus T (°C); V aire (m/s)

The following terms cannot be estimated and were removed:
V aire (m/s)*V aire (m/s)

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---------------------|----|---------|---------|---------|---------|
| Model | 4 | 3.38590 | 0.84648 | 62.00 | 0.003 |
| Linear | 2 | 3.31246 | 1.65623 | 121.32 | 0.001 |
| T (°C) | 1 | 2.94523 | 2.94523 | 215.73 | 0.001 |
| V aire (m/s) | 1 | 0.36722 | 0.36722 | 26.90 | 0.014 |
| Square | 1 | 0.04061 | 0.04061 | 2.97 | 0.183 |
| T (°C)*T (°C) | 1 | 0.04061 | 0.04061 | 2.97 | 0.183 |
| 2-Way Interaction | 1 | 0.03283 | 0.03283 | 2.40 | 0.219 |
| T (°C)*V aire (m/s) | 1 | 0.03283 | 0.03283 | 2.40 | 0.219 |
| Error | 3 | 0.04096 | 0.01365 | | |
| Total | 7 | 3.42686 | | | |

Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|----------|--------|-----------|------------|
| 0.116843 | 98.80% | 97.21% | 92.84% |

Coded Coefficients

| Term | Effect | Coef | SE Coef | T-Value | P-Value | VIF |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|------|
| Constant | | 8.1672 | 0.0661 | 123.50 | 0.000 | |
| T (°C) | -1.6281 | -0.8141 | 0.0554 | -14.69 | 0.001 | 1.00 |
| V aire (m/s) | -0.4285 | -0.2142 | 0.0413 | -5.19 | 0.014 | 1.00 |
| T (°C)*T (°C) | 0.3206 | 0.1603 | 0.0929 | 1.72 | 0.183 | 1.00 |
| T (°C)*V aire (m/s) | -0.1719 | -0.0860 | 0.0554 | -1.55 | 0.219 | 1.00 |

Regression Equation in Uncoded Units

$$[] \text{ Proteínas g/100g} = 22.07 - 0.391 T (\text{°C}) + 0.839 V \text{ aire (m/s)} + 0.00285 T (\text{°C}) * T (\text{°C}) \\ - 0.0216 T (\text{°C}) * V \text{ aire (m/s)}$$

Análisis de varianza para la humedad final

Response Surface Regression: X final (g agua/g ss) versus T (°C); V aire (m/s)

The following terms cannot be estimated and were removed:

V aire (m/s)*V aire (m/s)

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Model | 4 | 0.014948 | 0.003737 | 4.46 | 0.125 |
| Linear | 2 | 0.012511 | 0.006255 | 7.46 | 0.068 |
| T (°C) | 1 | 0.005631 | 0.005631 | 6.72 | 0.081 |
| V aire (m/s) | 1 | 0.006880 | 0.006880 | 8.21 | 0.064 |
| Square | 1 | 0.002319 | 0.002319 | 2.77 | 0.195 |
| T (°C)*T (°C) | 1 | 0.002319 | 0.002319 | 2.77 | 0.195 |
| 2-Way Interaction | 1 | 0.000118 | 0.000118 | 0.14 | 0.732 |
| T (°C)*V aire (m/s) | 1 | 0.000118 | 0.000118 | 0.14 | 0.732 |
| Error | 3 | 0.002515 | 0.000838 | | |
| Total | 7 | 0.017463 | | | |

Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|-----------|--------|-----------|------------|
| 0.0289557 | 85.60% | 66.39% | 0.00% |

Coded Coefficients

| Term | Effect | Coef | SE Coef | T-Value | P-Value | VIF |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|------|
| Constant | | 0.0484 | 0.0164 | 2.95 | 0.060 | |
| T (°C) | -0.0712 | -0.0356 | 0.0137 | -2.59 | 0.081 | 1.00 |
| V aire (m/s) | -0.0586 | -0.0293 | 0.0102 | -2.86 | 0.064 | 1.00 |
| T (°C)*T (°C) | 0.0766 | 0.0383 | 0.0230 | 1.66 | 0.195 | 1.00 |
| T (°C)*V aire (m/s) | -0.0103 | -0.0052 | 0.0137 | -0.38 | 0.732 | 1.00 |

Regression Equation in Uncoded Units

$$X \text{ final (g agua/g ss)} = 2.53 - 0.0803 T (\text{°C}) + 0.019 V \text{ aire (m/s)} + 0.000681 T (\text{°C}) * T (\text{°C}) - 0.00130 T (\text{°C}) * V \text{ aire (m/s)}$$