



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN
ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ALIMENTOS



Tema: Determinación experimental de isothermas de sorción de humedad de la tuna blanca (*Napolea coccinellifera* L.)

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

Autor: Eduardo Israel Castro Núñez

Tutor: Ing. Julio Cesar Sosa Cárdenas

Ambato - Ecuador

Septiembre 2022

APROBACIÓN DEL TUTOR

Ing. Mg., Julio Cesar Sosa Cárdenas

Certifica:

Que el presente trabajo de titulación ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto, autorizo la presentación de este Trabajo de Titulación bajo la Modalidad Proyecto de Investigación, el mismo que responde las normas establecidas en el reglamento de Títulos y Grados de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Ambato, 6 de julio de 2022

Ing. Mg., Julio Cesar Sosa Cárdenas

C.I. 1716650849

TUTOR

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Eduardo Israel Castro Núñez, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de investigación, previo a la obtención del Título de Ingeniero en Alimentos, son absolutamente originales, auténticos y personales; a excepción de las citas bibliográficas.



Eduardo Israel Castro Núñez

C.I. 2450224791

AUTOR

APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los suscritos Profesores Calificadores, aprueban el presente Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación, el mismo que ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por la facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.

Para constancia firman:

Presidente del Tribunal

Calificador 1

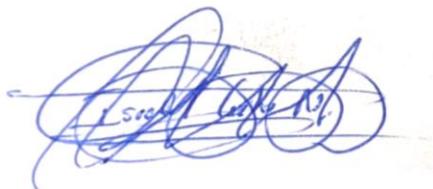
Calificador 2

Ambato, 05 de agosto del 2022

DERECHOS DE AUTOR

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

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

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Eduardo Israel Castro Núñez', is written over a faint grid background. The signature is stylized and cursive.

Eduardo Israel Castro Núñez

C.I. 2450224791

AUTOR

DEDICATORIA

El presente trabajo final es dedicado principalmente a Jehová Dios, por ser parte de mi crecimiento personal y espiritual; al concederme sabiduría y brindarme fuerzas mediante su espíritu santo cuanto más lo necesité.

A mi madre, quien ha sido el motor principal y la inspiración perfecta de una mujer luchadora y emprendedora. Su paciencia, su amor incondicional, su enseñanza y su abnegación como madre forjaron la persona fuerte y luchadora que ven actualmente, capaz de culminar este proceso; sin ella, nada tendría sentido.

A mi único y querido hermano Stalin, que siempre confió en mí y me brindó el apoyo necesario, cada acción que salía de su corazón me demostró que solo un hermano es capaz de amar como un padre.

A mi familia, mis primos Fernando, Lucía, Dylan y Jonathan, mi tía Antonia, les agradezco no solo por estar presentes, sino por todos los momentos felices que compartimos y el apoyo que me han brindado en cada meta cumplida.

No podía culminar, sin dedicar mi tesis a una persona muy especial, mi Tía Chela como le decimos, es como mi segunda madre. Su humildad, su sencillez y su bondad han hecho que yo sea el ser humano que soy.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Jehová Dios por darme la oportunidad de ser su amigo, darme la vida, salud y protección para lograr cumplir un objetivo más.

A toda mi familia, por nunca perder la confianza en mí y ser un apoyo incondicional en este proceso.

A mi tutor Ing. Julio Sosa por su confianza, paciencia y esfuerzo brindado durante sus orientaciones, su experiencia fue parte fundamental para culminar esta meta.

A mi estimado Ing. Santiago Cadena, quien me motivó e impulsó a tomar el tema de tesis en base a todas sus clases impartidas en Ingeniería, gracias por creer que puedo ser mejor de lo que ya soy.

A mi compañera fiel durante toda mi carrera universitaria Alison, por ser incondicional, por guardarme el puesto, aunque llegara atrasado. Por ser leal, escucharme y estar disponible en todo momento, me faltarían las palabras, por tanto.

A mis amigos Wellington, Javier, Ronny, Naty, Andrés, Jairo, Daya y Vane que siempre me motivaron a confiar en mí, me vieron caer en algún momento, pero se esforzaron por sacarme una sonrisa y animarme a cumplir mi sueño.

Finalmente, a todos los docentes de la carrera de Ingeniería en Alimentos de la Universidad Técnica de Ambato que formaron parte del crecimiento profesional que he tenido, gracias por cada clase, cada anécdota y cada enseñanza impartida, los llevaré siempre presentes.

ÌNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA	i
APROBACIÓN DEL TUTOR	ii
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD	iii
APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL DE GRADO	iv
DERECHOS DE AUTOR.....	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÌNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	viii
ÌNDICE DE TABLAS	x
ÌNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÌNDICE DE ANEXOS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT	xv
CAPITULO 1	1
MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Antecedentes Investigativos	1
1.1.1. Justificación.....	1
1.1.2. Fundamentación Teórica.....	2
1.1.2.1. Generalidades de la tuna blanca.....	2
1.1.2.2. Clasificación Taxonómica	3
1.1.2.3. Caracterización Botánica	3
1.1.2.4. Composición Química	4
1.1.2.5. Utilización y Potencial comercial	5
1.1.2.6. El agua en los alimentos	6
1.1.2.7 Actividad de agua en los alimentos.....	6

1.1.2.8. Isotermas de sorción	7
1.1.2.9. Efecto de la temperatura en las isotermas	8
1.1.2.10. Modelos matemáticos para isotermas de sorción	9
1.1.2.10.1. Modelo BET (Brunauer, Emmet y Teller)	10
1.1.2.10.2. Modelo GAB (Guggenheim, Anderson y De Boer)	10
1.1.2.10.3. Modelo Oswin	10
1.1.2.10.4. Modelo de Halsey	11
1.1.2.11. Calor isostérico de sorción	11
1.1.2.12. Energía de activación	12
1.2. Objetivos	13
1.2.1. Objetivo General	13
1.2.2. Objetivos Específicos	13
CAPITULO 2	14
METODOLOGÍA	14
2.1. Materiales y Método	14
2.1.1. Materiales	14
2.1.1.1. Materia Prima	14
2.1.1.2. Equipos de laboratorio	14
2.1.1.3. Materiales de laboratorio	14
2.1.1.4. Reactivos	15
2.1.1.5. Soluciones químicas de desinfección	15
2.1.2. Método	15
2.1.2.1. Lugar de ejecución	15
2.1.2.2. Acondicionamiento de las muestras	15
2.1.2.3. Almacenado de muestras deshidratadas de tuna blanca	17
2.1.2.4. Isotermas de adsorción	17
2.1.2.5. Determinación de la humedad de equilibrio (X_e)	19
2.1.2.6. Ajuste de modelos matemáticos para las isotermas de adsorción	20
2.1.2.7. Determinación del calor isostérico de adsorción (q_{st}) y la energía de activación (E_a)	20
2.1.2.8. Proceso para la determinación de isotermas de sorción de la tuna blanca ..	21

CAPITULO 3	22
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
3.1. Análisis y discusión de resultados	22
3.1.1. Humedad de Equilibrio.....	22
3.1.2. Isotermas de adsorción	23
3.1.3. Modelado de las isotermas de adsorción	27
3.1.3.1. Modelo Matemático BET (Brunauer, Emmett, Teller).....	27
3.1.3.2. Modelo Matemático GAB (Guggenheim, Anderson y De Boer)	29
3.1.3.3. Modelo matemático Oswin.....	31
3.1.3.4. Modelo matemático Halsey	33
3.1.4. Calor isostérico de adsorción.....	35
3.1.5. Energía de activación	37
CAPITULO 4	39
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	39
4.1. Conclusiones	39
4.2. Recomendaciones	41
BIBLIOGRAFÍA	42
ANEXOS.....	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Taxonomía de la tuna blanca (<i>Napolea coccinellifera</i> L.)	3
Tabla 2. Composición química de la tuna por cada 100 g de pulpa de fruta	5
Tabla 3. Soluciones salinas saturadas como factor higroscópico	15
Tabla 4. Variabilidad de las humedades relativas de equilibrio (%), medidas en función de las diferentes temperaturas empleadas en la experimentación	18
Tabla 5. Cantidades adecuadas de sal y agua para la preparación de soluciones salinas saturadas.....	19
Tabla 6. Composición fisicoquímica de la tuna blanca (<i>Napolea coccinellifera</i> L.).....	22

Tabla 7. Valores obtenidos de humedad de equilibrio, $X_e(g\text{ agua } m. s.)$ experimental de las muestras secas de tuna blanca en función de la actividad de agua (aw) y las diferentes temperaturas empleadas	22
Tabla 8. Cálculo de parámetros del modelo matemático BET en la determinación de isothermas de adsorción para todos los datos experimentales	27
Tabla 9. Parámetros del modelo matemático GAB en la determinación de isothermas de adsorción de la tuna blanca	29
Tabla 10. Parámetros del modelo matemático Oswin en la determinación de isothermas de adsorción de la tuna blanca	31
Tabla 11. Determinación de parámetros para el ajuste de isothermas de adsorción de la tuna blanca mediante el modelo matemático Halsey	33
Tabla 12. Calor isostérico de adsorción (q_{st}) de la tuna blanca (<i>Napolea coccinellifera</i> L.).....	35
Tabla 13. Determinación de la energía de activación (E_a) para los parámetros termodinámicos obtenidos mediante el modelo GAB	37
Tabla 14. Datos obtenidos de las muestras secas de tuna blanca, empleando el método gravimétrico estático (variaciones de peso de las muestras) mediante soluciones salinas hasta alcanzar la humedad de equilibrio, $X_e(g\text{ agua } m.s.)$ a temperatura de 25°C.....	48
Tabla 15. Datos obtenidos de las muestras secas de tuna blanca, empleando el método gravimétrico estático (variaciones de peso de las muestras) mediante soluciones salinas hasta alcanzar la humedad de equilibrio, $X_e(g\text{ agua } m. s.)$ a temperatura de 30 °C..	49
Tabla 16. Datos obtenidos de las muestras secas de tuna blanca, empleando el método gravimétrico estático (variaciones de peso de las muestras) mediante soluciones salinas hasta alcanzar la humedad de equilibrio, $X_e(g\text{ agua } m. s.)$ a temperatura de 40 °C..	49
Tabla 17. Datos obtenidos mediante el modelo matemático BET para la determinación de isothermas de adsorción de la muestra de tuna blanca	50
Tabla 18. Parámetros del modelo matemático BET en la determinación de isothermas de adsorción en datos experimentales de $aw < 0.6$	50
Tabla 19. Datos para el cálculo de parámetros del modelo matemático GAB en la determinación de isothermas de adsorción de la tuna blanca.....	51

Tabla 20. Datos obtenidos para la linealización del modelo Oswin mediante los valores experimentales de la tuna blanca	52
Tabla 21. Logaritmos obtenidos de la muestra seca de tuna blanca mediante el modelo Halsey.....	53
Tabla 22. Datos obtenidos sobre los logaritmos de la actividad de agua (aw), a las diferentes humedades de equilibrio y temperaturas empleadas	53
Tabla 23. Datos para el cálculo de la energía de activación (Ea) en base a los logaritmos de los parámetros del modelo GAB	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curvas de isothermas de adsorción y desorción de los alimentos	7
Figura 2. Influencia de la temperatura en las isothermas de adsorción	9
Figura 3.. Diagrama de operaciones para el secado de la tuna blanca (<i>Napolea coccinellifera</i> L.).....	16
Figura 4. Muestras secas de ají almacenadas en envases de vidrio (A) y cubiertas con papel aluminio (B)	17
Figura 5. Diagrama de Flujo para la determinación de las isothermas de sorción de la tuna blanca (<i>Napolea coccinellifera</i> L.)	21
Figura 6. Isothermas de adsorción de la tuna blanca (<i>Napolea coccinellifera</i> L.).....	24
Figura 7. Comparación de isothermas de adsorción de humedad de la tuna blanca mediante la división de regiones y sus diferentes temperaturas empleadas.....	25
Figura 8. Proyección gráfica de $aw_1 - aw_m$ vs aw del modelo matemático BET para el ajuste de todos los datos experimentales.....	28
Figura 9. Proyección gráfica de aw_m del modelo matemático GAB	29
Figura 10. Proyección gráfica entre $Ln(Xe)$ vs $Ln(aw_1 - aw)$ de las isothermas de adsorción de la tuna blanca aplicando el modelo Oswin	32
Figura 11. Proyección gráfica entre el $LnLn aw$ vs $Ln(Xe)$ de las isothermas de adsorción de la tuna blanca aplicando el modelo matemático Halsey.....	34
Figura 12. Proyección gráfica entre el $Ln(aw)$ vs $1/T$ a las diferentes humedades de equilibrio aplicadas para la muestra de tuna blanca	35

Figura 13. Influencia de la humedad de equilibrio (X_e) en función del calor de adsorción (q_{st}) para la muestra seca de tuna blanca	36
Figura 14 Proyección gráfica del $\ln(D)$ vs $1/T$ en la obtención de la energía de activación (E_a) mediante los parámetros termodinámicos del modelo GAB	38
Figura 15. Proyección gráfica de $aw_1 - aw_m$ vs aw del modelo matemático BET para datos experimentales de $aw < 0,6$	51
Figura 16. Acondicionamiento de la muestra para el desarrollo experimental	55
Figura 17. Proceso para la determinación experimental de isothermas de adsorción de la tuna blanca.....	56

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Determinación de la humedad de equilibrio para las muestras secas de tuna blanca (<i>Napolea coccinellifera</i> L.) mediante soluciones salinas saturadas, aplicando diferentes temperaturas de estudio.....	48
Anexo 2. Linealización de la ecuación del modelo matemático BET (Brunauer, Emmett, Teller).....	50
Anexo 3. Linealización de la ecuación del modelo matemático GAB (Guggenheim, Anderson y De Boer)	51
Anexo 4. Linealización de la ecuación del modelo matemático Oswin	52
Anexo 5. Linealización de la ecuación del modelo matemático Halsey	52
Anexo 6. Cálculo de la ecuación de Clausius Clapeyron para obtener el calor isostérico neto de adsorción (q_{st}).....	53
Anexo 7. Cálculo de la energía de activación (E_a) a partir de la ecuación de Arrhenius para los parámetros obtenidos por el modelo GAB	54
Anexo 8. Material fotográfico sobre el desarrollo experimental de isothermas de adsorción de la tuna blanca (<i>Napolea coccinellifera</i> L.)	55

RESUMEN

En la industria de los alimentos la determinación de isothermas de adsorción es el medio más apropiado para estudiar la influencia que tiene el agua en los alimentos; la tuna blanca (*Napolea coccinellifera* L.) es un producto de bajo aprovechamiento en el Ecuador, siendo el proceso de secado su mejor alternativa. El presente trabajo se efectuó con el fin de establecer las condiciones ideales para el proceso de secado, mediante la construcción de isothermas de adsorción a diferentes temperaturas. Por lo tanto, se correlacionó la actividad de agua en función de la humedad de equilibrio, obtenida mediante el método gravimétrico de soluciones saturadas de sal a diferentes humedades relativas, mismas que fueron expuestas a temperaturas constantes de 25, 30 y 40 grados centígrados. Los datos experimentales mostraron que la humedad de equilibrio fue directamente proporcional a la actividad de agua, e inversamente proporcional al incremento de temperatura. Parámetros obtenidos en base a los modelos matemáticos: GAB, BET, Oswin y Halsey, se determinaron para evaluar el mejor ajuste de datos; de los cuales, Oswin y Halsey presentaron mejores coeficientes de determinación superiores al 92 y 93 por ciento. El calor de adsorción disminuyó de 31.515 a -1.668 *kJ* por *mol*, a medida que aumentó la humedad de equilibrio. Mientras que, la energía de activación presentó un valor en la monocapa de 33.164 *kJ* por *mol* de 25 a 40 grados centígrados, demostrando así, que ambos tuvieron dependencia con la temperatura y fuerte interacción del agua con la superficie del alimento.

Palabras claves: Isothermas de sorción, propiedades térmicas, modelos matemáticos, tuna blanca, soluciones saturadas.

ABSTRACT

In the food industry, the determination of adsorption isotherms is the most appropriate way to study the influence that water has on food; white prickly pear (*Napolea coccinellifera* L.) is a product that is little exploited in Ecuador, being the drying process its best alternative. The present work was carried out in order to establish the ideal conditions for the drying process, by means of the construction of adsorption isotherms at different temperatures. Therefore, the water activity was correlated with the equilibrium humidity, obtained by the gravimetric method of saturated salt solutions at different relative humidities, which were exposed to constant temperatures of 25, 30 and 40 degrees Celsius. Experimental data showed that the equilibrium humidity was directly proportional to the water activity, and inversely proportional to the temperature increase. Parameters obtained based on the mathematical models: GAB, BET, Oswin and Halsey, were determined to evaluate the best fit of data; of which, Oswin and Halsey presented better coefficients of determination higher than 92 and 93 per cent. The heat of adsorption decreased from 31.515 to -1.668 *kJ per mol*, as the equilibrium moisture content increased. While, the activation energy presented a value in the monolayer of 33.164 *kJ per mol* from 25 to 40 degrees Celsius, thus, demonstrating that both had temperature dependence and strong interaction of water with the feed surface.

Keywords: Heat of adsorption, equilibrium moisture content, gravimetric method, drying process, adsorption isotherms, saturated solutions.

CAPITULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes Investigativos

1.1.1. Justificación

La tuna blanca (*Napolea coccinellifera* L.) es una fruta originaria de América, en Ecuador se cultiva la mayor cantidad en Imbabura y luego le siguen los cultivos en Loja, Tungurahua y Santa Elena. La demanda ha crecido debido a las propiedades nutritivas y curativas de este fruto (**El Comercio, 2011**). Sin embargo, es un producto de bajo aprovechamiento en el país, que puede ser procesado para obtener productos ya sea como ingredientes o como alimento de alto valor agregado (**Segura, 2016**). La tuna es fuente de minerales esenciales como calcio, fósforo, potasio, selenio, cobre, zinc y abundante vitamina C. Además, es rica en betalaínas, las cuales actúan como antioxidantes y tiene una actividad anticancerígena (**Pérez, 2020**).

No obstante, una vez que la tuna blanca es cosechada, comienza una serie de cambios fisicoquímicos que provocan la pérdida en su calidad organoléptica y nutricional, por ende, es necesario que se aplique un tratamiento que alargue su vida útil. La deshidratación se presenta como una alternativa fácil y barata para este fin, pues hoy en día, los cambios en los hábitos del consumo alimenticio de los ecuatorianos, ha generado una importante demanda de frutas deshidratadas, obtenidas mediante el proceso de secado, con el fin de reducir la actividad de agua (a_w) del alimento hasta que alcanza un nivel de a_w adecuado, que evita la degradación del producto y/o la pérdida de nutrientes (**Madalli, 2015**). La relación que existe entre la a_w y el contenido de humedad viene dada por las isothermas de sorción, y como fue indicado anteriormente estos parámetros son fundamentales en el secado de los alimentos.

Ahora bien, el proceso de secado contribuye un desafío tecnológico, debido a que su rendimiento dependerá de la reducción en los porcentajes de humedad y a_w , de manera que, las isothermas de sorción de agua son herramientas termodinámicas importantes para predecir las interacciones entre el agua y los componentes de los alimentos, determinar la

energía libre necesaria y la entalpía o calor de sorción, siendo específica para cada alimento (**Pulla, 2011**).

Bajo este contexto, es indispensable el estudio de isothermas de sorción de agua para evaluar y encontrar las condiciones adecuadas para su manipulación, conservación, tiempo de secado y tiempo de vida útil (**Agama, 2018**). Por tal razón, se prevé proporcionar información a través del estudio experimental de isothermas de sorción de humedad de la tuna blanca (*Napolea coccinellifera* L.) mediante los modelos matemáticos Oswin, Halsey, GAB y BET.

1.1.2. Fundamentación Teórica

1.1.2.1. Generalidades de la tuna blanca

Este tipo de fruto es procedente de América, por lo general son nativas de la región sur de Canadá, Estados Unidos, México y América del Sur; son capaces de crecer en la costa septentrional de África, en la costa meridional y al este de España (**Espino et al., 2012**).

En Ecuador se cultivan cuatro variedades de tuna, la tuna amarilla sin espina, la amarilla con espina, la blanca y la silvestre; con una extensión aproximada de 180 hectáreas incluyendo a la provincia de Tungurahua como una de las principales productoras de este fruto, debido a su rentabilidad y menor requerimiento de labores agrícolas que el resto de los frutales (**MAGAP, 2018**). Las especificaciones en la tuna blanca la hacen única y diferente a sus otras variedades, pues tienen el fruto alargado, la pulpa tiene un sabor más dulce que el resto, es más resistente al ataque de las enfermedades y su fácil manejo durante la cosecha lo hace especial, pues casi no posee espinas (**El Comercio, 2011**).

En el Cantón Cevallos perteneciente a la provincia de Tungurahua se ha incrementado la producción de tuna debido a las propiedades del suelo, clima y sobre todo la abundancia de abono orgánico que es fundamental para el florecimiento del nopal; se recoge un aproximado de 300 cajas semanales, con un peso de 50 libras por caja y se comercializa a un costo de \$25.00 (**El Telégrafo, 2017**).

Se conoce que en Ecuador la producción de tuna se da solo para el consumo interno, es decir, no se ha logrado una producción de exportación, de modo que su consumo en mayor porcentaje se realiza en estado fresco y en un porcentaje menor se ha logrado consumir en mermelada, dulce, jugo o tónico revitalizante. El fruto se encuentra cubierto por una gruesa capa de espinos de 2 a 3 mm, su cascara es fuerte y sus semillas se comen a pesar de tener una textura dura, posee un alto contenido de calcio, hierro y mucha vitamina C; por su alto contenido nutricional, este fruto es adecuado para ser consumido por deportistas, personas que padecen diabetes, gastritis y problemas digestivos (El Comercio, 2011).

1.1.2.2. Clasificación Taxonómica

La clasificación taxonómica de la tuna blanca (*Napolea coccinellifera* L.) es demasiado compleja por su gran variedad de fenotipos; debido a los cambios ambientales se pueden encontrar casos de poliploidía e híbridos, lo que vuelve más complicada su clasificación y su exclusividad (Sáenz et al., 2006).

Tabla 1. Taxonomía de la tuna blanca (*Napolea coccinellifera* L.)

Reino	<i>Plantae</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Magnoliopsida</i>
Orden	<i>Caryophyllales</i>
Familia	<i>Cactaceae</i>
Tribu	<i>Opuntiae</i>
Género	<i>Opuntia</i>
Especie	<i>Napolea coccinellifera</i> L.
Nombre común	Tuna blanca

Fuente: (Sáenz et al., 2006)

1.1.2.3. Caracterización Botánica

La tuna, comienza a cosecharse a partir de un año y ocho meses para obtener cantidades considerables, de las cuales, sus etapas más altas de producción se dan en los meses de junio y febrero. En Ecuador esta planta se puede cultivar tanto en la Costa como en la Sierra, debido a que se adapta a temperaturas que oscilan los 12 y 34°C; la misma que

después de su cosecha puede resistir hasta 10 días conservando su sabor y color (**El Comercio, 2011**).

Su planta es considerada un arbusto que llega a medir hasta 4m de altura, formando matas grandes y densas; tiene ramas en una serie de segmentos planos sin costillas; segmentos ovalados y elípticos, de 6-8 cm de ancho, 8-15 cm de longitud, verdes claros, oscureciendo con la edad; aureolas con 2-5 espinas de 1-5 cm de longitud. También, posee flores grandes con segmentos del perianto rojos o anaranjados, de estambres numerosos y ovario tuberculado (**Peña et al., 2010**).

Según **Acosta, (2010)** su fruto tiene forma alargada de 5-10 cm de largo con pequeñas espinas que se agrupan a su alrededor, su pulpa es jugosa y contiene semillas. La forma, el tamaño y el color de los frutos es variable. Sus semillas son de forma discoidal, poseen testa reticulada y arilo lateral angosto; se pueden encontrar de 100 o más de 400 semillas por fruto, las cuales tienen un diámetro de 3 a 4 mm (**Cerezal & Duarte, 2005**).

1.1.2.4. Composición Química

La tuna blanca contiene agua en un 84 a 90% de su totalidad, azúcares reductores de 10 a 15%, pH entre 5.3-7.1, un estimado de azúcares de 10 a 17° Brix de las cuales predominan la glucosa y la fructosa. Cabe destacar que contiene una gran cantidad de ácido ascórbico entre 10 – 410 mg/kg, además de otras vitaminas importantes como la tiamina, riboflavina y niacina (**Ramírez, 2013**).

Los ácidos orgánicos presentes en la tuna blanca se encuentran en rangos muy bajos, entre 0.01 a 0.12 de ácido cítrico y 0.02 a 0.06 de ácido málico, por lo cual, no generan un efecto negativo en el sabor (**Rodríguez et al., 2012**). Por otro lado, la tuna tiene un elevada actividad antioxidante debido a su alta concentración de betalaínas, polifenoles y vitamina C (**Jiménez et al., 2014**).

Tabla 2. Composición química de la tuna por cada 100 g de pulpa de fruta

Componente	Unidad	Cantidad
Agua	g	85.0
Energía	cal	38
Proteína	g	0.5
Grasa	g	0.1
Carbohidratos	g	11.0
Fibra	g	1.8
Ceniza	g	1.6
Calcio	mg	60
Fósforo	mg	34
Hierro	mg	0.8
Sodio	mg	0.8
Potasio	mg	161
Vitamina A	UI	40
Tiamina	mg	0.01
Riboflavina	mg	0.02
Niacina	mg	0.3
Ácido ascórbico	mg	30

Fuente: (Tous & Ferguson, 1996)

1.1.2.5. Utilización y Potencial comercial

Actualmente, es considerable el valor comercial y potencial que tiene la tuna, no solo por su composición química sino también por la buena digestión que genera en el organismo debido al alto contenido de semillas que posee. Según **González & Orellana, (2003)** los usos que se les da a los frutos ya sea en fresco o procesados son múltiples, pues a diferencia del consumo fresco, cocido o como condimento en comidas típicas de diversos países, existe una gran gama de productos industriales que se emplean en la alimentación humana como congelados, deshidratados, encurtidos, enlatados y salsas.

Por ello, estas características y propiedades que posee la tuna determinan una amplia gama de posibilidades de transformación, muestra de ello son los procesos tradicionales utilizados en México para la elaboración de derivados como colonche (licor fermentado), melcocha, mermelada, vino, harina de tuna, néctar, fruto en almíbar, queso de tuna, tunas cristalizadas, obtención de azúcares como el galactamato, extracción de aceite y colorantes naturales. (**INECC, 2007**). En Ecuador la mayor producción de tuna cultivada son la variedad blanca y amarilla, ambas tienen una buena aceptación, por ello la

transformación del producto forma parte de la solución a las limitaciones tecnológicas en el país, del cual se aprovecha el fruto y se le da un valor agregado en la obtención de vinos, mermeladas y néctares.

1.1.2.6. El agua en los alimentos

El agua es considerada el factor más importante para poder regular el deterioro y conservación en todos los alimentos, por tanto, este mismo componente influye relativamente en las diferentes variables del proceso. Cabe destacar que, aunque existen diferentes tipos de alimentos con el mismo contenido de agua, estos mismos alimentos discrepan en la estabilidad o vida útil. Por lo tanto, el agua en sí, no es un determinante real de la estabilidad de cualquier alimento, esto se debe a la intensidad con la que se asocia el agua a los constituyentes no acuosos (**Fennema, 2000**).

1.1.2.7 Actividad de agua en los alimentos

La actividad de agua es un parámetro que indica la disponibilidad de agua en un alimento para que existan reacciones químicas, bioquímicas y microbiológicas; siendo un indicador que ayuda a predecir la vida útil de un alimento (**Fennema, 2000**). Se define a la actividad de agua como la relación entre la presión parcial de vapor de agua en el alimento (P) y la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura (P_o) (**Marques, 2009**). La actividad de agua puede definirse como la relación de fugacidades, es decir, la relación entre la fugacidad de la solución (f) y la fugacidad del solvente puro (f_o). Se entiende por fugacidad la tendencia del solvente de escapar de la solución. La actividad de agua se expresa por la siguiente ecuación

$$a_w = \frac{f}{f_o} \approx \frac{P}{P_o} = \frac{HRE}{100}$$

Donde:

P = Presión parcial de vapor de agua en el sistema (alimento)

P_o = Presión de saturación del agua líquida pura a la misma temperatura

HRE = Humedad relativa de equilibrio

Por consiguiente, cuando un alimento se encuentra en equilibrio con su entorno a temperatura constante, la actividad de agua es igual a la humedad relativa (*HRE*) del ambiente en el cual se encuentra, por ende, el alimento no gana ni pierde agua en tales condiciones (**Marques, 2009**).

Según **Aguado et al., (2012)** el factor principal en la conservación de un alimento es el porcentaje de agua que contiene, a un alto contenido de agua en dicho alimento mayor será la actividad microbiana, mientras que a bajo contenido de agua su reacción será todo lo contrario, es aquí donde el proceso de secado se presenta como la mejor opción para reducir la actividad de agua de dichos alimentos que son altamente higroscópicos como la tuna blanca. De este modo, si la a_w esta por debajo de 0.6 se inhabilita cualquier actividad microbiana.

1.1.2.8. Isotermas de sorción

Las isotermas de sorción de los alimentos son obtenidas relacionando gráficamente la cantidad de agua absorbida, en función de la actividad de agua, generando mayormente curvas de formato sigmoide. Las mismas que pueden ser obtenidas en dos direcciones: adsorción y desorción; la primera se obtiene cuando un material seco es colocado en varias atmósferas, aumentando la humedad relativa y midiendo el aumento de peso debido a la ganancia de agua; mientras que para la segunda, el material inicialmente húmedo es colocado bajo las mismas condiciones ambientales utilizadas en la adsorción, siendo medida la pérdida de peso, debido a la salida de agua (**Pulla, 2011**).

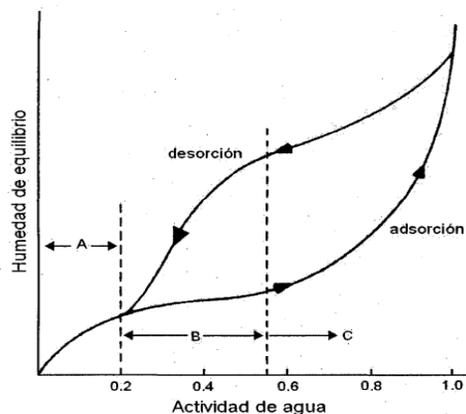


Figura 1. Curvas de isotermas de adsorción y desorción de los alimentos

Fuente: (**Badui, 2006**)

La Figura 1, muestra las dos isotermas antes descritas; se aprecia que para un contenido de humedad de equilibrio la actividad de agua es menor durante la desorción que en la adsorción, o que para una a_w determinada, la humedad es mayor en el secado que en la hidratación; además, se observa que estos procesos no son reversibles, fenómeno que recibe el nombre de histéresis (**Badui, 2006**).

Las isotermas se dividen en tres regiones: A, B y C. En la región A, las moléculas de agua están enérgicamente ligadas a los sitios específicos en el sólido, esta agua no está disponible como solvente, por lo tanto, no colabora microbiológica, enzimática o químicamente, denominada monocapa. En la región B el agua se encuentra en multicapas, menos fuertemente unida, estando presente en pequeños capilares, y en la región C, el agua se presenta estructuralmente y puede presentar soluciones sueltas en grandes capilares o en estado libre (**Pulla, 2011**).

1.1.2.9. Efecto de la temperatura en las isotermas

Para las isotermas, el efecto de la temperatura es de suma importancia ya que los alimentos no son mezclas ideales y la actividad de agua cambia con la temperatura; por ende, la temperatura afecta la movilidad de las moléculas de agua y el equilibrio entre las fases de vapor y absorbente. Un aumento de la temperatura, para una a_w constante, provoca el descenso de la cantidad de agua absorbida; además, la reactividad química y microbiológica se ve afectada por la relación temperatura vs contenido de humedad, pues a un aumento de temperatura provoca un aumento de la a_w a un contenido de humedad constante (**Gil et al., 2013**).

Según **Badui, (2006)** menciona que el valor de la actividad de agua se incrementa cuando se eleva la temperatura, de la misma manera lo hace la presión de vapor, tendencia que se da en la mayoría de los alimentos, como se observa en la Figura 2.

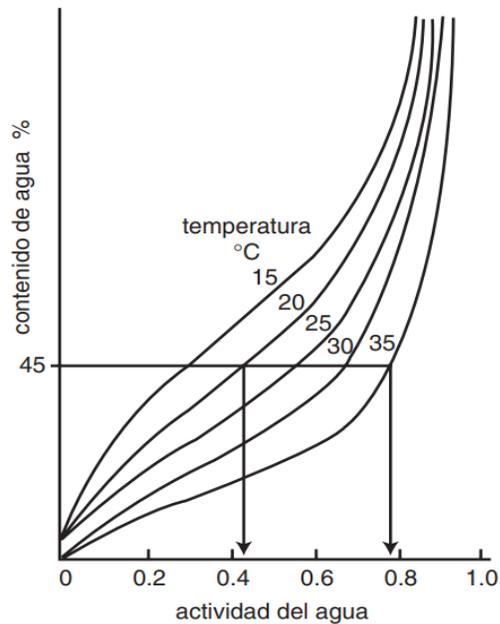


Figura 2. Influencia de la temperatura en las isoterma de adsorción

Fuente: (Badui, 2006)

1.1.2.10. Modelos matemáticos para isoterma de sorción

Para describir las isoterma de sorción de los alimentos existen multitud de ecuaciones matemáticas de carácter teórico, semiempírico y empírico que modelan las curvas de sorción. Los modelos teóricos procuran explicar interacciones existentes entre el agua y la estructura del alimento, mientras que, las ecuaciones empíricas corresponden a la gran mayoría de las ecuaciones utilizadas para el ajuste de datos. Otra consideración importante es que cada modelo ofrece una información diferente sobre el proceso de sorción, es decir, con cada uno de ellos puede ajustarse un rango de actividad de agua determinado (Clemente, 2003).

Según Gálvez et al., (2006) la calidad de ajuste de los modelos propuestos para las isoterma de sorción se evalúa por medio del coeficiente de correlación lineal (r^2), el que debe ser superior a 0.85 para conseguir un buen modelado de los datos experimentales.

1.1.2.10.1. Modelo BET (Brunauer, Emmet y Teller)

El modelo BET modela la adsorción de la superficie, es el más utilizado y proporciona un buen ajuste para una variedad de alimentos sobre una región de actividad de agua entre 0.05 y 0.45, siendo expresada de la siguiente forma (Francisquetti, 2017).

$$X_e = \frac{X_m C_{BET} a_w}{(1 - a_w)(1 + a_w(C_{BET} - 1))}$$

Donde:

X_e = Humedad de equilibrio (g agua/ g m.s.)

X_m = Humedad de la monocapa (g agua/ g m.s.)

a_w = Actividad de agua

C_{BET} = Constante de BET relacionada al calor de sorción

1.1.2.10.2. Modelo GAB (Guggenheim, Anderson y De Boer)

El modelo de GAB es el más utilizado para describir la sorción de los alimentos, este modelo es una ecuación de tres parámetros, utilizado para ajustar los datos de sorción de productos alimenticios hasta actividades de agua de 0.9; es importante mencionar que el modelo GAB puede representar más del 50% de las isotermas de frutas, vegetales y carnes, en comparación con ecuaciones de dos parámetros, representado mediante la siguiente ecuación (Lima, 2006).

$$X_e = \frac{X_m C_{GAB} K_{GAB} a_w}{(1 - K_{GAB} a_w)(1 - (1 - C_{GAB}) K_{GAB} a_w)}$$

Donde:

X_m = Humedad en la monocapa (g agua/ g m.s.)

C_{GAB} = Constante de Guggenheim, característica del producto y relacionada con el calor de adsorción de la monocapa

K_{GAB} = Es un factor de corrección relacionado con el calor de sorción

1.1.2.10.3. Modelo Oswin

El modelo de Oswin es un modelo puramente empírico, basado en la expansión de una serie matemática para curvas sigmoidales, por eso se ajusta muy bien entre valores de

actividad de agua de $0.0 < a_w < 1.0$; además que esta ecuación ajusta cerca del 57% de las isotermas de alimentos y sus parámetros característicos A y B muestran relación con la temperatura para diferentes isotermas, como se muestra en la siguiente ecuación (**Pulla, 2011**).

$$X_e = A \left[\frac{a_w}{(1 - a_w)} \right]^B$$

1.1.2.10.4. Modelo de Halsey

El modelo de Halsey considera la condensación de las multicapas a una distancia relativamente grande de la superficie, por lo cual se asume que la magnitud del parámetro B caracteriza el tipo de interacción entre el vapor y el sólido, es decir, si B tiene un valor alto la atracción entre el sólido es muy específica y no se extiende muy lejos de la superficie, por el contrario, si el valor de B es pequeño, las fuerzas de atracción predominantes son de Van der Waals y capaces de llegar a grandes distancias de la superficie; por lo tanto A y B son constantes que dependen de la temperatura y naturaleza del producto; dado por la siguiente ecuación (**Lima, 2006**).

$$a_w = \exp \left[\frac{-A}{X_e^B} \right]$$

1.1.2.11. Calor isostérico de sorción

La energía necesaria para absorber agua de un alimento es una medida de la fuerza con que se encuentra retenida, por ende, el cálculo de la energía que se consume durante el secado exige entre otros un conocimiento de la entalpía de sorción del agua para todo el rango de humedades. El calor isostérico de sorción del agua se define como la energía que se necesita para absorber el agua de una matriz por unidad de masa liberada; es decir, el calor de adsorción es una medida de la energía liberada en la sorción del agua por el producto, mientras que el calor de desorción representa el requerimiento de energía necesaria para romper las fuerzas intermoleculares entre las moléculas de vapor y la superficie absorbente, la cual está dada por la ecuación de Clausius Clapeyron (**Gálvez et al., 2006**).

$$\frac{\partial \ln(a_w)}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} = -\frac{Q_{st} - \lambda}{R} = -\frac{q_{st}}{R}$$

Donde:

q_{st} = Calor isostérico neto de sorción (kJ/mol)

Q_{st} = Calor isostérico total de sorción (kJ/mol)

λ = Calor de vaporización del agua pura (kJ/mol)

R = Constante universal de los gases, 8.314 kJkmol⁻¹K⁻¹

$$\ln \frac{a_{w2}}{a_{w1}} = \frac{q_{st}}{R} \left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right]$$

$$\ln \int_{a_{w1}}^{a_{w2}} a_w = \frac{q_{st}}{R} \left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right]$$

1.1.2.12. Energía de activación

La energía de activación representa la energía necesaria para unir o romper la primera monocapa de agua entre el sistema sólido – agua, donde la formación del enlace sólido – agua (adsorción) requiere de mayor energía que romper la unión (desorción), debido a que las dislocaciones moleculares suceden por acción de calor, el efecto de la temperatura se puede evaluar a través de la ecuación de Arrhenius, como se muestra a continuación (Gálvez et al., 2006).

$$\ln(D) = \ln(D_o) - \frac{E_a}{RT}$$

Donde:

D = Constante en estudio

D_o = Factor de Arrhenius

E_a = Es la energía de activación (kJ/kmol)

R = Constante universal de los gases

T = Temperatura absoluta (K)

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Determinar las isothermas de adsorción de humedad de la tuna blanca (*Napolea coccinellifera* L.)

1.2.2. Objetivos Específicos

- Obtener los datos experimentales de la humedad de equilibrio (X_e) de la tuna blanca en función de la (a_w) a las diferentes temperaturas de estudio.
- Construir isothermas de adsorción de humedad de la tuna blanca a diferentes temperaturas utilizando soluciones salinas saturadas.
- Modelar las isothermas de adsorción de humedad de la tuna blanca, utilizando las ecuaciones matemáticas de Oswin, Halsey, GAB (Guggenheim – Anderson – de Boer) y BET (Brunauer – Emmet – Teller).
- Determinar la energía de activación (Ea) y el calor isostérico (Qs) de adsorción en función del contenido de humedad de la tuna blanca.

CAPITULO 2

METODOLOGÍA

2.1. Materiales y Método

2.1.1. Materiales

2.1.1.1. Materia Prima

Se recolectó la muestra de tuna blanca (*Napolea coccinellifera* L.) del predio perteneciente a la señora Fabiola Cárdenas, ubicado en la parroquia Totoras, ciudad de Ambato, provincia de Tungurahua.

2.1.1.2. Equipos de laboratorio

- Estufa de laboratorio - T°: 0 - 200 °C
- Incubadora de laboratorio - T°: 0 – 70 °C
- Balanza analítica, precisión ± 0.0001 g
- Desecador de laboratorio

2.1.1.3. Materiales de laboratorio

- Frascos de vidrio
- Placas de Petri - vidrio
- Termómetro de mercurio (rango: 0 - 100°C)
- Probeta de 100 ml
- Piceta con agua destilada
- Bandejas de malla metálica
- Pinzas
- Espátulas
- Guantes quirúrgicos
- Mascarillas
- Bolsas de polietileno
- Lentes de seguridad
- Jeringa descartable de 5 ml
- Papel aluminio

2.1.1.4. Reactivos

Tabla 3. Soluciones salinas saturadas como factor higroscópico

Nomenclatura	Sal	(a_w)
KOH	Hidróxido de potasio	0,11
CH₃CO₂K	Acetato de potasio	0,23
K₂CO₃	Carbonato de potasio	0,43
NaBr	Bromuro de sodio	0,58
MgCl₂	Cloruro de magnesio	0,69
NaCl	Cloruro de sodio	0,75
(NH₄)₂SO₄	Sulfato de amonio	0,81

Fuente: (Labuza & Bell, 2000)

2.1.1.5. Soluciones químicas de desinfección

- Hipoclorito de sodio al 7.5 %
- Alcohol etílico de 96 °

2.1.2. Método

2.1.2.1. Lugar de ejecución

El presente trabajo se desarrolló como un estudio experimental, deductivo, analítico e informativo, con en un enfoque cuantitativo. Pues, a través de la construcción de isotermas de sorción, se obtuvo valores numéricos que son cuantificables e interpretables al establecer las condiciones ideales para su manipulación y conservación. El estudio experimental se realizó en el laboratorio de análisis de los alimentos - Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología (FCIAB), perteneciente a la Universidad Técnica de Ambato (UTA).

2.1.2.2. Acondicionamiento de las muestras

Para la obtención de las muestras secas de tuna blanca, se seleccionaron aquellos frutos en estado de maduración completa, sin presencia de materiales extraños, estado de putrefacción o descomposición. Posterior a ello, se realizó un lavado por inmersión en

agua clorada a 5 ppm durante 10 minutos, para luego escaldar las muestras con el fin de inactivar enzimas como la lipoxigenasa y polifenoloxidasas (Pulla, 2011).

El acondicionamiento de las muestras se realizó mediante un proceso de secado por estufa a 60°C durante 24 horas, con la finalidad de remover el agua contenida, minimizar el crecimiento microbiano y el deterioro químico (Labuza & Bell, 2000).

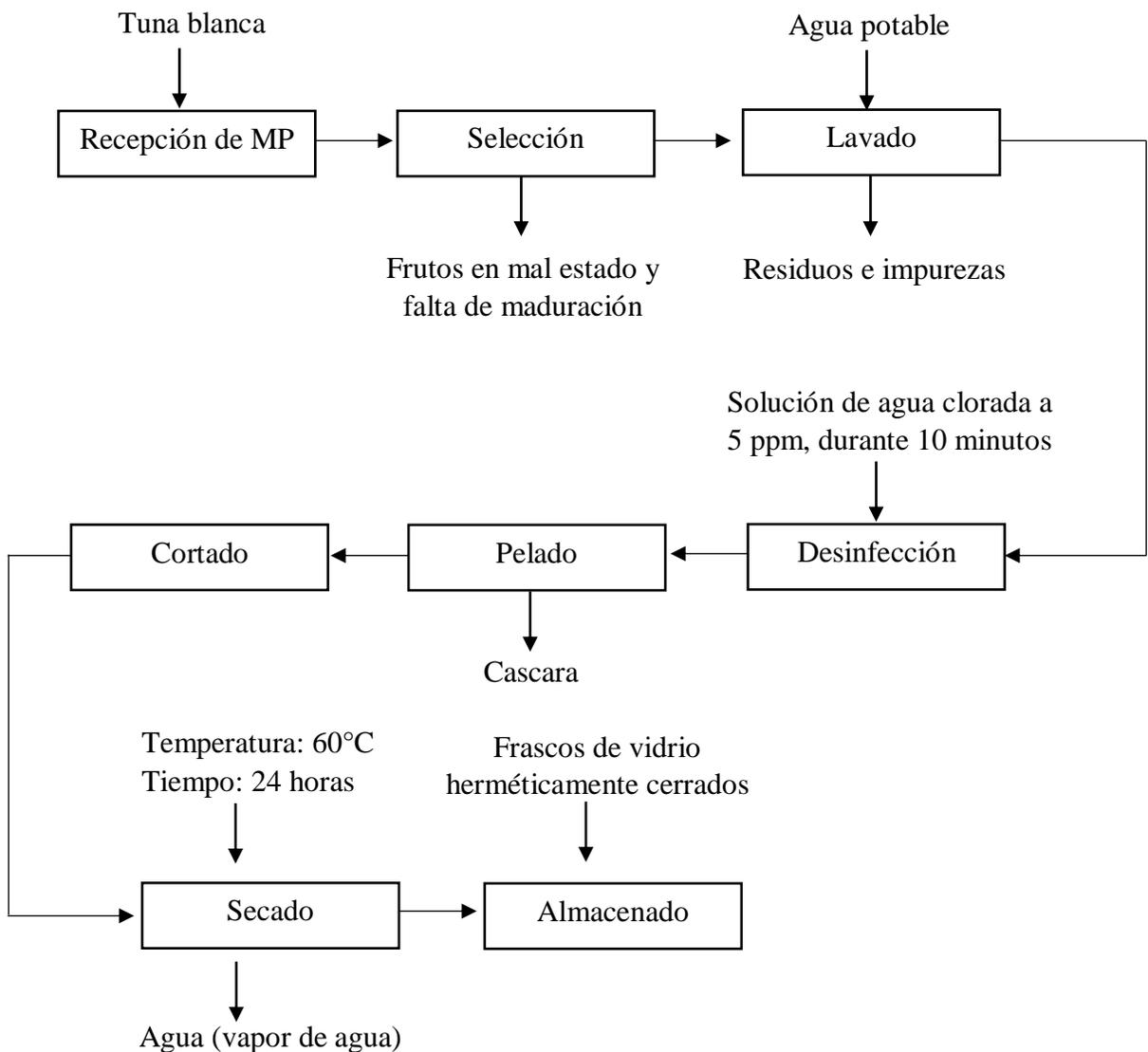


Figura 3.. Diagrama de operaciones para el secado de la tuna blanca (*Napolea coccinellifera* L.)

2.1.2.3. Almacenado de muestras deshidratadas de tuna blanca

Las muestras de tuna blanca sometidas al proceso de secado fueron almacenadas en un frasco de vidrio que se encontraba herméticamente cerrado y cubierto con papel aluminio al resguardo de la luz. Posterior a ello, se colocó el frasco en un desecador para que las muestras no ganen ni pierdan peso por la humedad del ambiente, hasta su utilización en la determinación de isotermas de sorción de humedad.



Figura 4. Muestras secas de ají almacenadas en envases de vidrio (A) y cubiertas con papel aluminio (B)

2.1.2.4. Isotermas de adsorción

Para realizar la construcción de las isotermas de adsorción, el diseño experimental se basó en el método estático gravimétrico o método de control continuo de cambios de peso. Las humedades relativas fueron obtenidas con soluciones salinas saturadas que se encuentran en un rango de actividad de agua (a_w) de 0.11 a 0.85; por tal razón, las sales utilizadas con sus respectivas actividades de agua (humedades relativas) se observan en la Tabla 4.

Tabla 4. Variabilidad de las humedades relativas de equilibrio (%), medidas en función de las diferentes temperaturas empleadas en la experimentación

Nomenclatura	Sal	Humedad Relativa (%)		
		25 °C	30 °C	40 °C
Hidróxido de Potasio	<i>KOH</i>	11.4	10.7	10.4
Acetato de Potasio	<i>CH₃CO₂K</i>	23.6	21.4	20.5
Carbonato de Potasio	<i>K₂CO₃</i>	44.3	43.6	43.2
Nitrato de Sodio	<i>NaNO₂</i>	65.7	51.4	61.4
Cloruro de Sodio	<i>NaCl</i>	76.1	74.2	73.3
Cloruro de Potasio	<i>KCl</i>	85.4	82.1	80.4

Fuente: (Labuza & Bell, 2000)

Las isotermas de adsorción fueron determinadas a las diferentes temperaturas de experimentación de 25, 30 y 40 °C; con la finalidad de obtener las humedades de equilibrio (X_e) para cada una de las temperaturas. Por otra parte, para la obtención de datos de las isotermas primero se desinfectaron los frascos de vidrio y los potes de plástico con una solución de formol al 40% para evitar posibles contaminaciones y dar lugar al desarrollo microbiano en las muestras, específicamente el crecimiento de mohos y levaduras; también se desinfectaron las cajas de Petri con una solución de alcohol etílico a 70°, para luego esterilizar las cajas a 160 °C por 2 horas. Por lo tanto, se acondicionaron las muestras en 6 frascos de vidrio, en cada uno de los frascos se colocó internamente un pote de plástico (taper) que sirvió de soporte para las cajas de Petri (vidrio) en las cuales se colocaron las muestras de tuna blanca deshidratadas.

Ahora bien, las soluciones salinas saturadas fueron preparadas de acuerdo a las cantidades de sal (g) y agua (ml) recomendados por **Díaz, (2003)** para algunas sales en específico, como se evidencia en la Tabla 5

Tabla 5. Cantidades adecuadas de sal y agua para la preparación de soluciones salinas saturadas

Nomenclatura	Sal	Proporción de la solución	
		Sal (g)	Agua (ml)
Hidróxido de Potasio	<i>KOH</i>	25	14.1
Acetato de Potasio	<i>CH₃CO₂K</i>	30	9.7
Carbonato de Potasio	<i>K₂CO₃</i>	30	13.5
Nitrato de Sodio	<i>NaNO₂</i>	30	4.5
Cloruro de Sodio	<i>NaCl</i>	30	9
Cloruro de Potasio	<i>KCl</i>	30	12

Nota: Se realizó un cálculo matemático proporcional al valor bibliográfico de las soluciones salinas debido a que son reactivos controlados por la FCIAB - UTA

Fuente: (Díaz, 2003)

Las muestras de tuna blanca (deshidratadas) fueron pesadas por duplicado con un peso de 2 g en las cajas de Petri, luego se introdujeron en los frascos de vidrio previamente desinfectados y los frascos fueron colocados en una incubadora a las diferentes temperaturas empleadas en el proceso. Además, las muestras se pesaron periódicamente cada 24 horas en una balanza analítica, hasta que se presente un peso constante, instante en el cual alcanza el equilibrio con su ambiente. Según **Gabas et al., (2009)** una muestra alcanza el equilibrio cuando la diferencia entre dos pesos consecutivos es igual a 0.001 gramos.

2.1.2.5. Determinación de la humedad de equilibrio (X_e)

La humedad de equilibrio se determinó por la diferencia entre la masa de la muestra en equilibrio y la masa seca; los cálculos realizados de valores de humedad de equilibrio se realizó para cada una de las cajas de Petri a las diferentes temperaturas, el cálculo se realizó mediante la siguiente ecuación (**Fiorentin et al., 2010**).

$$X_e = \frac{m_{eq} - m_s}{m_s}$$

Donde:

X_e = Humedad de equilibrio (g agua/g m.s)

M_{eq} = Masa de la muestra en el equilibrio (g)

M_s = Masa de la muestra seca (g)

2.1.2.6. Ajuste de modelos matemáticos para las isothermas de adsorción

Los datos obtenidos experimentalmente de la humedad de equilibrio fueron ajustados a los modelos matemáticos BET, GAB, Halsey y Oswin los cuales son frecuentemente los más utilizados para la representación de la higroscopicidad de frutas, vegetales u otros alimentos más. Estos modelos fueron desarrollados mediante hojas de cálculo (Excel), evaluando la calidad de ajuste de los modelos de isothermas a los datos experimentales mediante el coeficiente de determinación (R^2).

2.1.2.7. Determinación del calor isostérico de adsorción (q_{st}) y la energía de activación (E_a)

Mediante las isothermas de adsorción construidas para la tuna blanca, se determinó el calor isostérico de adsorción en función de la humedad de equilibrio (X_e), con la finalidad de analizar los parámetros energéticos en la adsorción de agua por la materia prima, para proveer información acerca del mecanismo de adsorción e interacción entre los componentes del producto y el agua. Para una humedad de equilibrio se trazaron las actividades de agua (a_w) correspondientes, para luego realizar una regresión lineal del logaritmo natural de las $Ln(a_w)$ en función del inverso de la temperatura ($1/T$) en grados Kelvin, del cual se pudo observar que el valor del q_{st} correspondía al coeficiente angular de cada recta es decir, a la pendiente multiplicada por la constante universal de los gases R ($8.314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) (Pulla, 2011).

Por otra parte, la energía de activación fue determinada a través de la ecuación de Arrhenius, por tal razón, se graficó el logaritmo natural de las constantes obtenidas en el modelado de GAB (X_m, C_{GAB}, K_{GAB}) en función del inverso de la temperatura en grados Kelvin; es decir, $ln(D)$ vs ($1/T$), siendo la pendiente ($-E_a/R$), del cual se realizó una correlación de los datos a fin de determinar el valor del coeficiente de determinación (R^2); es importante mencionar que los valores de las constantes de GAB fueron reemplazadas en lugar de la constante donde la ecuación de Arrhenius (Pulla, 2011).

2.1.2.8. Proceso para la determinación de isotermas de sorción de la tuna blanca

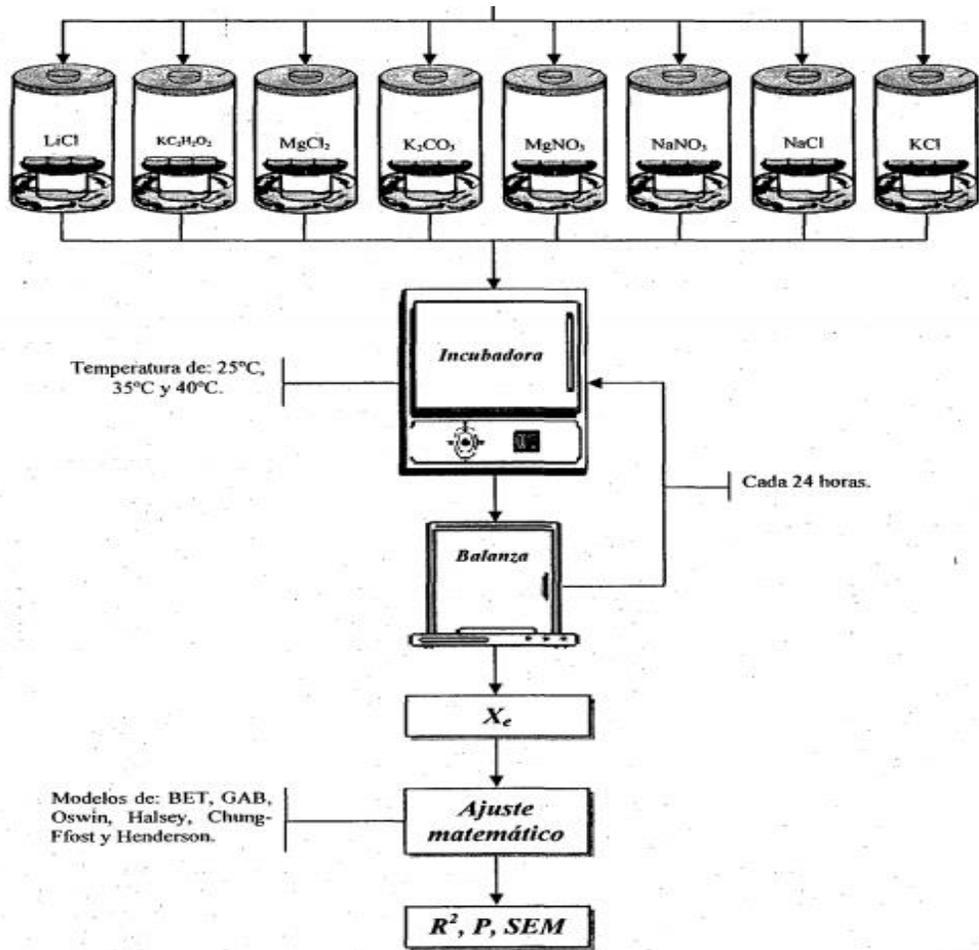


Figura 5. Diagrama de Flujo para la determinación de las isotermas de sorción de la tuna blanca (*Napolea coccinellifera* L.)

Fuente: (Pulla, 2011)

CAPITULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis y discusión de resultados

Tabla 6. Composición fisicoquímica de la tuna blanca (*Napolea coccinellifera* L.)

ANÁLISIS	RESULTADOS
Humedad (%)	85.0
Cenizas totales (%)	0.52
Proteína (%)	0.96
Grasa (%)	0.30
Fibra (%)	2.01
Carbohidratos (%)	3.46
pH	5.40
°Brix	14.0

Fuente: (Huanca Alca, 2017)

En la Tabla 6, se observa que la tuna blanca (*Napolea coccinellifera* L.) es un alimento con alto contenido de humedad en un porcentaje de 85.00 %, elevados valores de carbohidratos (3.46 %) y fibra (2.01), esto se debe a que la tuna es un fruto con alto contenido de glucosa y fructosa, que se encuentra presente como azúcar libre y que es absorbida por el cuerpo directamente, y la fructosa que contribuye a mejorar el sabor dándole más dulzura a la fruta (FAO, 2018).

3.1.1. Humedad de Equilibrio

Tabla 7. Valores obtenidos de humedad de equilibrio, X_e (g agua/g m. s.) experimental de las muestras secas de tuna blanca en función de la actividad de agua (a_w) y las diferentes temperaturas empleadas

Solución salina saturada	Temperatura					
	25 °C		30 °C		40 °C	
	a_w	X_e (b. s.) ^a	a_w	X_e (b. s.) ^a	a_w	X_e (b. s.) ^a
<i>KOH</i>	0.1142	0.0809	0.1081	0.0804	0.1054	0.0800
<i>CH₃CO₂K</i>	0.2367	0.1649	0.2155	0.1512	0.2061	0.1418
<i>K₂CO₃</i>	0.4432	0.2421	0.4363	0.1679	0.4330	0.1544
<i>NaNO₂</i>	0.6585	0.2526	0.6280	0.2332	0.6140	0.1904
<i>NaCl</i>	0.7617	0.4749	0.7430	0.4586	0.7342	0.4551
<i>KCl</i>	0.8546	0.8512	0.8211	0.8016	0.8056	0.7593

La humedad inicial de las muestras secas de tuna blanca fue del 18.3 %, es decir, (18.3 g agua/g m.s.). En la Tabla 7, se observan los datos obtenidos experimentalmente para la humedad de equilibrio (X_e) en función de la actividad de agua (a_w) a temperaturas de 25, 30 y 40 °C. Cabe destacar, que el tiempo requerido para alcanzar la humedad de equilibrio en las muestras secas fue de 15, 12 y 10 días respectivamente (**Anexo 1**). Se observó como la humedad de equilibrio (X_e) aumentó con el incremento de la actividad de agua (a_w), demostrando que la tuna tiene gran higroscopicidad, lo que puede provocar la disolución de parte de las partículas y deteriorar la estructura física de la muestra, además de ser un alimento con alta capacidad de absorber la humedad atmosférica (**Casa, 2013**).

También, fue evidente que la humedad de equilibrio disminuye con el aumento de temperatura de 25 a 40 °C, a pesar de mantener un alto contenido de a_w . Esto se debe a los cambios energéticos que se dan en el sistema, pues con un aumento de la temperatura las moléculas de agua se tornan termodinámicamente menos estables, es decir, aumenta el grado de desorden molecular del agua sorbida en la superficie del sólido, llegando a mayores niveles de energía, lo que favorece la ruptura de la ligación intermolecular entre el agua y los sitios de sorción, reduciendo el contenido de agua del producto. Por lo tanto, a medida que aumenta la temperatura, la excitación de las moléculas, así como la distancia, y por consiguiente la atracción entre las moléculas, también varía (**Leal, 2010**).

3.1.2. Isotermas de adsorción

Es importante saber que las isotermas de adsorción representan la cinética con la que un alimento absorbe humedad y se hidrata, esta refleja el comportamiento de los deshidratados almacenados en atmósferas húmedas, mejor conocido como higroscopicidad (**Badui, 2006**).

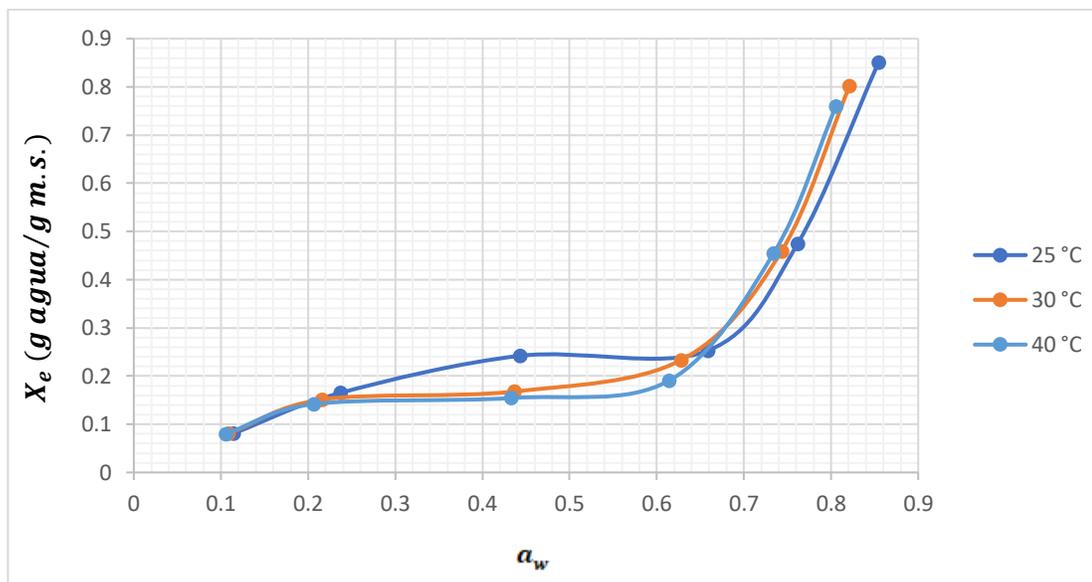


Figura 6. Isotermas de adsorción de la tuna blanca (*Napolea coccinellifera* L.) a las diferentes temperaturas de experimentación.

En la Figura 6, se observa la representación gráfica de los datos experimentales de la humedad de equilibrio (X_e) en función de la actividad de agua (a_w) para las diferentes temperaturas empleadas; la tendencia muestra isotermas cóncavas con relación al eje de las abscisas, con un punto de inflexión. Todas las isotermas presentaron un comportamiento del tipo II, debido a la formación de curvas sigmoideas de acuerdo a la clasificación de las isotermas de Van der Waals, características de la mayoría de los alimentos; el punto de inflexión indica el cambio de la capacidad de ligar agua o a las cantidades relativas de agua unida y libre (**Pulla, 2011**). Las isotermas de adsorción de tipo II es un indicativo de un adsorción física en multicapas, es decir, el adsorbato cubre al adsorbente hasta que se forma una monocapa y el proceso continúa con adsorción en multicapas (**Rosas, 1999**).

Además, se evidenció que la humedad presentó un comportamiento lineal hasta una a_w de aproximadamente 0.45, pues a partir de este valor, su comportamiento se va tornando de forma exponencial para todas las temperaturas aplicada. Por tal razón, este comportamiento sugiere que a partir de una a_w de 0.45, un incremento en la humedad relativa del ambiente propicia un considerable aumento en la humedad de equilibrio de la muestra seca de tuna blanca, el cual compromete la calidad del producto durante el

almacenamiento donde existan humedades relativas mayores al 45%. De modo similar **Ferreira & Pena, (2003)** encontraron comportamientos parecidos en las isotermas de adsorción de harina de pijuayo (*Bactris gasipaes*), observándose que este producto requirió de mayores cuidados al ser manipulado o almacenado en humedades relativas superiores al 60%. También, se encontró un comportamiento similar en pulpa de cajá liofilizada en polvo, con humedades relativas de 65%, observándose que el producto se ve afectado durante el almacenamiento (**Oliveira et al., 2014**).

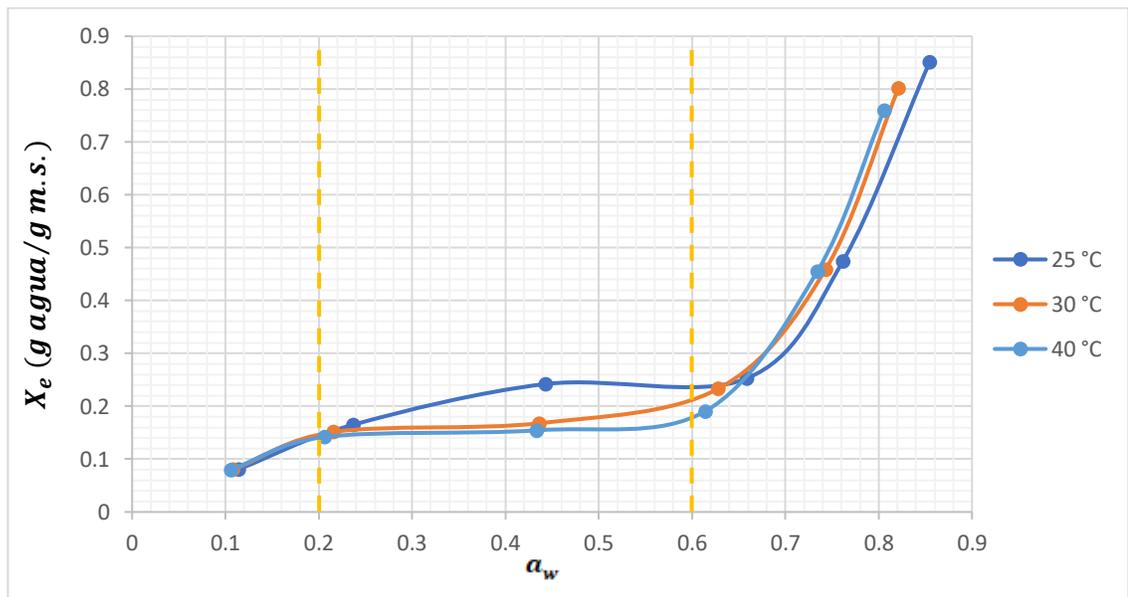


Figura 7. Comparación de isotermas de adsorción de humedad de la tuna blanca mediante la división de regiones y sus diferentes temperaturas empleadas

La Figura 7, compara las isotermas de adsorción obtenidas a las diferentes temperaturas empleadas, de las cuales se determina que las curvas presentan una tendencia higroscópica hasta un aproximado de $a_w < 0.3$ y sigmoidea hasta una $a_w < 0.66$, mientras que a valores de a_w superiores la tendencia higroscópica varía totalmente.

Normalmente, el área total de la isoterma se divide en tres zonas, cada zona tiene relación directa con el efecto de sorción pura, condensación capilar y comportamiento de los solutos. La zona I de $a_w = 0 - 0.2$ posee fuerzas intermoleculares covalentes de Van der Waals, permitiendo que las moléculas de agua se ligen a sus puntos más activos, es decir,

en esta zona las moléculas de hidratos de carbono de la tuna blanca se saturan por una monocapa de agua (**Badui, 2006**).

Según **Ibarz & Barbosa, (2005)** la zona II se presenta entre una $a_w = 0.2 - 0.6$, en este intervalo se encuentra el remanente de agua en un producto deshidratado debido a que es difícil de eliminar por su retención en las estructuras microcapilares, por lo tanto, el agua se encuentra en multicapas y su tendencia higroscópica no es tan fuerte, como se observa en la Figura 2. Sin embargo, el agua que integra la zona III corresponde a un intervalo de $a_w > 0.6$, que se presenta en esta libre; de manera que, esta agua corresponde al agua absorbida del ambiente, que llena los macrocapilares de la muestra seca de tuna blanca, evidenciados en el aumento de la X_e a partir de la $a_w = 0.62$ como se detalla en la Tabla 7. Precisamente, esa parte de agua la que se liga a sustancias de bajo peso molecular, por ende, esta fracción de agua da lugar a reacciones químicas, enzimáticas o microbiológicas (**Agama, 2018**).

Por otro lado, fue evidente que existió un entrecruzamiento de las curvas de adsorción cercano a una a_w de 0.66, siendo más marcado a temperaturas de 30 y 40 °C, características similares a las mencionadas por Tsami, (1991) que reportó entrecruzamientos en frutas desecadas en un rango de a_w de 0.5 – 0.7 con temperaturas que oscilan de 15 a 45 °C. Es importante mencionar, que el entrecruzamiento de las curvas puede deberse a un aumento de la actividad enzimática y del movimiento entre moléculas de agua, carbohidratos y proteínas (**Gálvez et al., 2006**).

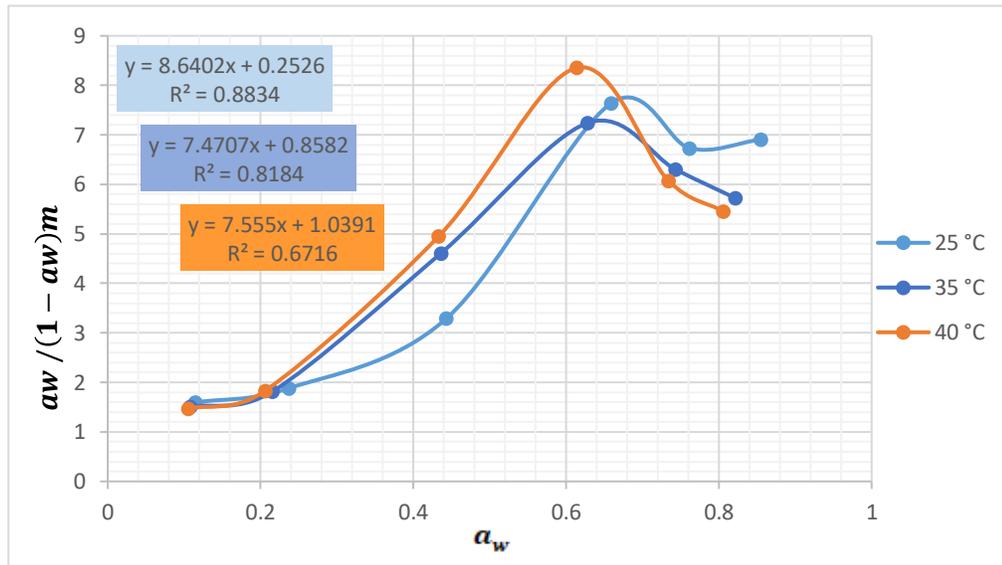
Además, se notó que la curva a temperatura de 25 °C a partir de una $a_w > 0.2$ tiene una prolongación mayor que las curvas a temperatura de 30 y 40 °C; observándose ligeras desviaciones en la X_e , probablemente causadas por un proceso de cristalización de algún componente, es decir, a medida que aumenta la temperatura, también aumenta la movilidad molecular, las moléculas chocan en la orientación adecuada para formar un núcleo cristalino; estos cambios estructurales se dan en alimentos ricos en carbohidratos de alto peso molecular como la tuna blanca, mostrados en la Tabla 6 (**Casa, 2013**).

3.1.3. Modelado de las isothermas de adsorción

Los datos obtenidos experimentalmente de la muestra seca de tuna blanca (*Napolea coccinellifera* L.) fueron ajustados a los diferentes modelos matemáticos (BET, GAB, Halsey y Oswin) para caracterizar el fenómeno de sorción de agua con los valores de humedad de equilibrio (X_e) en función de la actividad de agua (a_w).

3.1.3.1. Modelo Matemático BET (Brunauer, Emmett, Teller)

Tabla 8. Cálculo de parámetros del modelo matemático BET en la determinación de isothermas de adsorción para todos los datos experimentales



Parámetros	25 °C	35 °C	40 °C
A	0,252580513	0,85823333	1,0390961
B	8,640171043	7,47074698	7,5549604
R²	0,883353801	0,81840187	0,6716148
C	35,20759166	9,70479707	8,2707044
m_o	0,112451134	0,12006272	0,1163595

Figura 8. Proyección gráfica de $\frac{a_w}{(1-a_w)^m}$ vs a_w del modelo matemático BET para el ajuste de todos los datos experimentales

El modelo El modelo BET se ajusta a las isothermas dentro de un intervalo limitado de valores de $a_w=0$ a 0.5; sin embargo, el concepto del valor de monocapa de BET, se acepta como punto de referencia del contenido de humedad de mayor estabilidad para los alimentos secos (**Talens, 2018**).

En la Tabla 8, se observó que los valores de humedad obtenidos de la monocapa (m_o) para todos los datos, fueron en aumento para el modelo BET entre (0.11246 – 0.1163 g agua/g sólido seco) que para GAB (**Tabla 9**), esto se debe a que los dos modelos no son similares, pues según **Timmermann et al., (2001)** afirma que la gran mayoría de las veces los resultados obtenidos por GAB son mejores que BET cuando se trabaja con datos experimentales de a_w de 0 a 0.95 basados en el mismo principio de la monocapa. De hecho, resultados similares se obtuvieron en muestras de ají seco (*Capsicum annum L.*) de los cuales se comparó que los valores de la monocapa obtenidos por el modelo BET (0.0558– 0.0634 g agua/g sólido seco) aumentaron a medida que incrementó las temperaturas de 25 – 40°C; debido a que, cuando los fenómenos de solución soluto – solvente empiezan a ser importantes, el modelo deja de ser aplicable para BET, por su limitada aplicabilidad de valores de a_w en un alimento (**Pulla, 2011**).

Por otro lado, el modelo BET compara la velocidad de condensación y evaporación, y considera la diferencia de energía existente en la monocapa, siendo aplicable hasta una a_w de 0.55 (**Andrade et al., 2011**). La constante de BET relacionada al calor de sorción (C_{BET}) presentó una diferencia en sus valores a medida que aumentó la temperatura de 25 – 40°C, con un intervalo de (35.207 – 8.207); aunque, a diferencia de los valores obtenidos por GAB (**Tabla 9**) siguen siendo menores, pero sus valores fueron > 2 , valor que es representativo en isothermas de tipo II aplicando el modelo BET, pues según **Brunauer et al., (1938)** menciona, que valores superiores a 2 demuestran el efecto de adsorción multicapa como resultado de formación de una capa monomolecular, indicando que el agua presente en esta capa se encuentra agrupada en la superficie seca, dando como resultado una presión de vapor reducida.

Cabe destacar, que se observó el ajuste de datos del modelo BET mediante el coeficiente de determinación (R^2), presentando valores de (0.8834, 0.8184 y 0.6716) a 25, 30 y 40 °C respectivamente; evidenciándose que los datos no se ajustaron al modelo BET, debido a que sus valores se encontraron medianamente alejados de 1 que significa un ajuste lineal perfecto, es decir, cuanto más cercano este a 1, mayor será el ajuste del modelo.

3.1.3.2. Modelo Matemático GAB (Guggenheim, Anderson y De Boer)

Tabla 9. Parámetros del modelo matemático GAB en la determinación de isothermas de adsorción de la tuna blanca

Parámetros	25 °C	30 °C	40 °C
α	-7,0781	-12,213	-15,655
β	6,957	11,449	14,533
ϵ	0,4611	0,0439	0,3955
R^2	0,5234	0,8242	0,7949
K_{GAB}	0,95673889	1,06240284	0,87379988
C_{GAB}	17,770064	247,478699	39,8919377
m_0	0,12756234	0,086638	0,065098

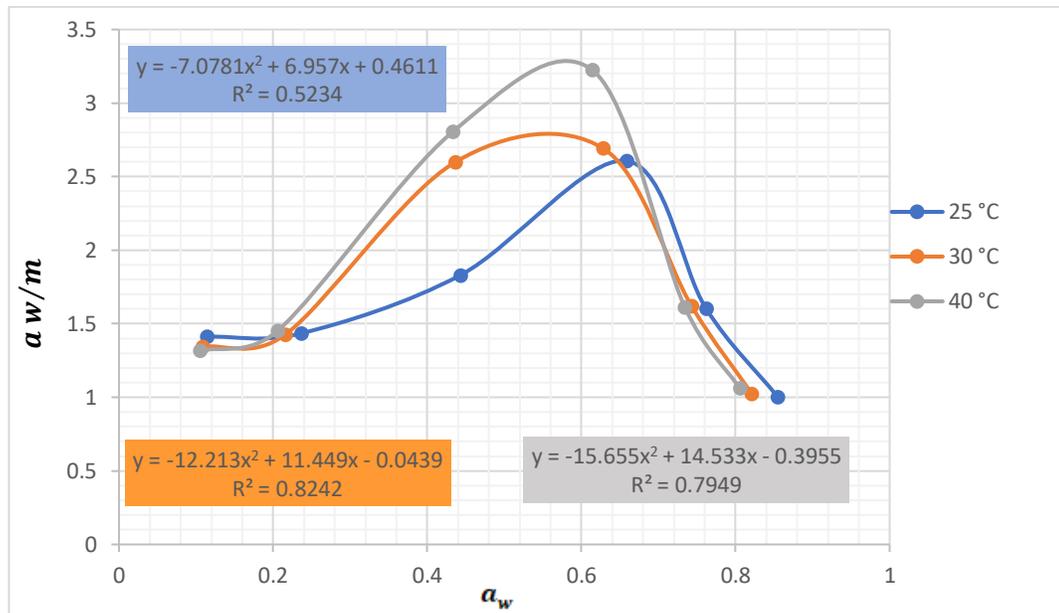


Figura 9. Proyección gráfica de $\frac{a_w}{m}$ del modelo matemático GAB

El ajuste del modelo GAB se aplica para procesos multicapa y es empleado para establecer el tiempo de vida de anaquel evaluando la insaturación de la humedad segura del alimento,

ampliamente utilizado para alimentos principalmente para frutas hasta una a_w de 0.95 (Viades, 2011).

En la Tabla 9, se observó que el contenido de humedad de la monocapa (m_o) fue inversamente proporcional a la temperatura para los datos experimentales de la muestra seca de tuna blanca basado en el modelo GAB, pues existió una disminución de 0.1275 a 0.0650, a medida que la temperatura aumentó de 25 a 40 °C.

De hecho, según Alakali et al., (2009) evidenció resultados parecidos en muestras secas de jengibre (*Zinziber officinal*) donde el valor de la monocapa disminuyó de 5.209 a 1.885 para temperaturas de 20 a 50 °C, ajustados mediante el modelo GAB. Cabe recalcar, que este comportamiento que se genera en la monocapa puede ser atribuido a la reducción del número de sitios activos para la unión con el agua, como resultado de los cambios físicos y químicos inducidos por la temperatura, por lo que, se puede afirmar que la m_o muestra dependencia con la temperatura.

Es importante mencionar que el calor de absorción de la monocapa (C_{GAB}) es función de la interacción de los sitios activos del alimento y las moléculas de agua de la atmósfera (Choque et al., 2009). Ahora bien, se evidenció que los valores obtenidos para C_{GAB} no mostraron una clara relación con el efecto de la temperatura, variando de 17.770, 247.47 y 39.819 para 25, 30 y 40 °C; probablemente debido a los cambios irreversibles que se asocian con el aumento de la temperatura, como las reacciones enzimáticas y desnaturalización proteica, pues se estudiaron con más de 30 diferentes productos alimenticios y se observó que para el 74% de ellos el valor de C_{GAB} no disminuyó con el incremento de la temperatura (Martinelli, 2008). De hecho, según Montes et al., (2009) obtuvo resultados semejantes para muestra seca de ñame (*Dioscorea rotundata*) con valores de C_{GAB} entre 0.379, 0.133, 0.448 a temperaturas de 45, 55 y 70 °C.

Por otra parte, el valor de K_{GAB} proporciona una medida de las interacciones entre las moléculas del agua de la multicapa con el adsorbente, y su valor tiende a estar entre el de la energía de las moléculas en la monocapa y el del agua líquida. Si K es igual a 1, las multicapas tienen propiedades de agua líquida, por lo tanto el comportamiento de sorción puede ser modelado por la ecuación BET (Pérez et al., 2006). Los valores obtenidos de

K_{GAB} de la muestra seca de tuna blanca fueron 0.9567, 1.0624 y 0.8737 para 25, 30 y 40 °C. Es decir, los valores no indican una dependencia con el incremento de la temperatura; aunque sus valores fueron cercanos e igual a 1 a 30 °C, se puede estimar que el proceso tiene una menor sorción a la predicha por el método BET. Según **Chenlo et al., (2005)** observó un comportamiento idéntico al estudiar las isothermas de sorción de pimientos de padrón (*Capsicum annuum* L. Var. Longum) con valores K_{GAB} de 0.758, 1.037 y 0.903 a temperaturas de 5, 25 y 45 °C.

De acuerdo con el comportamiento ya mencionado anteriormente para los parámetros K_{GAB} y C_{GAB} del modelo matemático GAB, se puede deducir que los datos no se ajustaron a dicho modelo, pues sus coeficientes de determinación R^2 (0.5234, 0.8242 y 0.7949) se encontraron alejados de 1, indicando que existió variabilidad de los datos. Por lo cual el modelo GAB no presenta el mejor ajuste de datos experimentales de las isothermas de sorción de la tuna blanca, debido a que, una desventaja en los modelos de tres parámetros que aportan un significado físico, es que sus valores tiene un rango de validez para que posean un significado físico, en algunas ocasiones, cuando el ajuste de datos se aplica en isothermas de tipo II el modelo aporta resultados pobres (**Blahovec, 2004**).

3.1.3.3. Modelo matemático Oswin

Tabla 10. Parámetros del modelo matemático Oswin en la determinación de isothermas de adsorción de la tuna blanca

Parámetros	25 °C	30 °C	40 °C
A	0,259486	0,248889	0,238579
B	0,543077	0,557565	0,549940
R²	0,9289	0,8989	0,8487

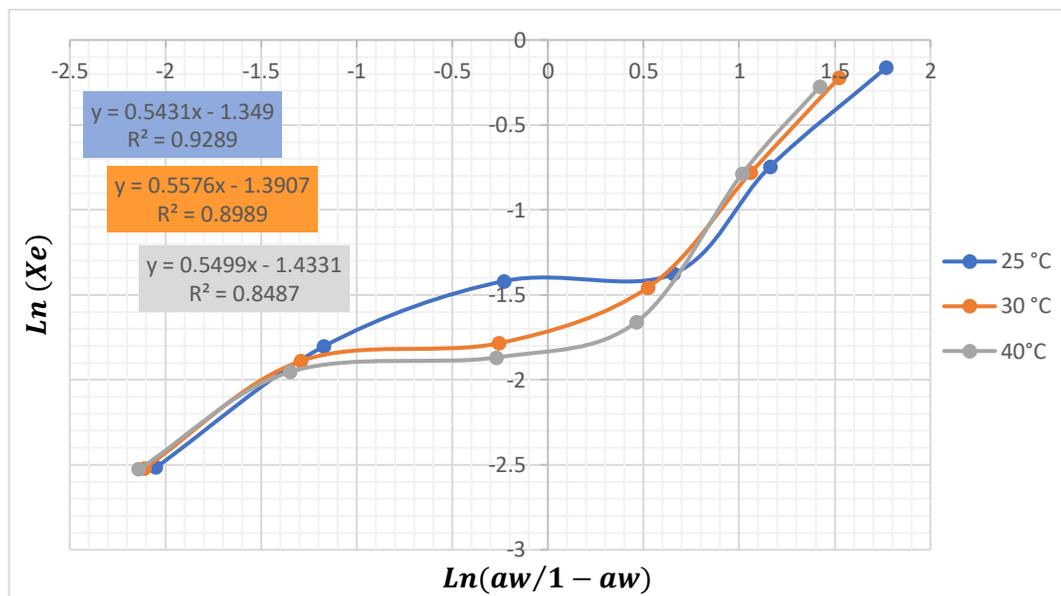


Figura 10. Proyección gráfica entre $\ln(X_e)$ vs $\ln(a_w/1 - a_w)$ de las isothermas de adsorción de la tuna blanca aplicando el modelo Oswin

Se sabe que el modelo Oswin es una ecuación empírica, basada en la expansión de una serie matemática para curvas sigmoidales, por lo cual, se ajusta muy bien entre valores de actividad de agua (a_w) de 0.0 – 1.0 (Pulla, 2011). En la Tabla 10, se determinó los parámetros característicos del modelo Oswin, los cuales mostraron una disminución con el incremento de la temperatura de 25 a 40°C; para el parámetro A de 0.2594 - 0.2385 y para B existió un incremento de 0.5430 - 0.5499 respectivamente. Según Choque et al., (2009) los parámetros característicos A y B del modelo Oswin muestran relación con la temperatura para diferentes isothermas, además, que este modelo se ajusta bien en isothermas de tipo II (sigmoideas) las cuales tienen una adsorción física en multicapas, las mismas isothermas sigmoidales que se obtuvieron en la muestra seca de tuna blanca.

De hecho, Montes et al., (2009) detalló resultados parecidos en muestras secas de ñame (*Dioscorea rotundata*) con valores en A de 0.353 – 0.221 y para B de 0.495 – 1.332 a temperaturas de 45 a 70°C. También, en harina de maíz (*Zea mays* L.) para las constantes A se alcanzó valores de 0.114 – 0.086 y para B de 0.237 – 0.345 utilizando temperaturas de 7 a 45°C, mostrando relación directa con la temperatura (Gálvez et al., 2006).

Por lo tanto, en la Figura 8 se evidenció que el ajuste de datos mediante el modelo Oswin presentó coeficientes de determinación (R^2) de 0.9289, 0.8989 y 0.8487 aplicando

temperaturas de 25, 30 y 40 °C; demostrando que para la muestra seca de tuna blanca este modelo presentó un buen ajuste de datos experimentales a 25°C, mientras que 30 y 40 °C existió una diferencia poco significativa, debido a que esta ecuación ajusta cerca del 57% de las isothermas de los alimentos y su aproximación se debe a que la ecuación de Oswin es el mejor modelo para describir las isothermas de alimentos que tienen un alto contenido en fibra y carbohidratos (Olalde et al., 2015). De manera parecida, el modelo Oswin fue el modelo más adecuado para el ajuste de datos en isothermas de adsorción de harina de maíz (*Zea mays* L.) con un R^2 de 0.99 (Gálvez et al., 2006).

3.1.3.4. Modelo matemático Halsey

Tabla 11. Determinación de parámetros para el ajuste de isothermas de adsorción de la tuna blanca mediante el modelo matemático Halsey

Parámetros	25°C	30 °C	40 °C
A	0,122044	0,132777	0,138468
B	-1,188628	-1,104212	-1,050736
R²	0,9333	0,9323	0,8938

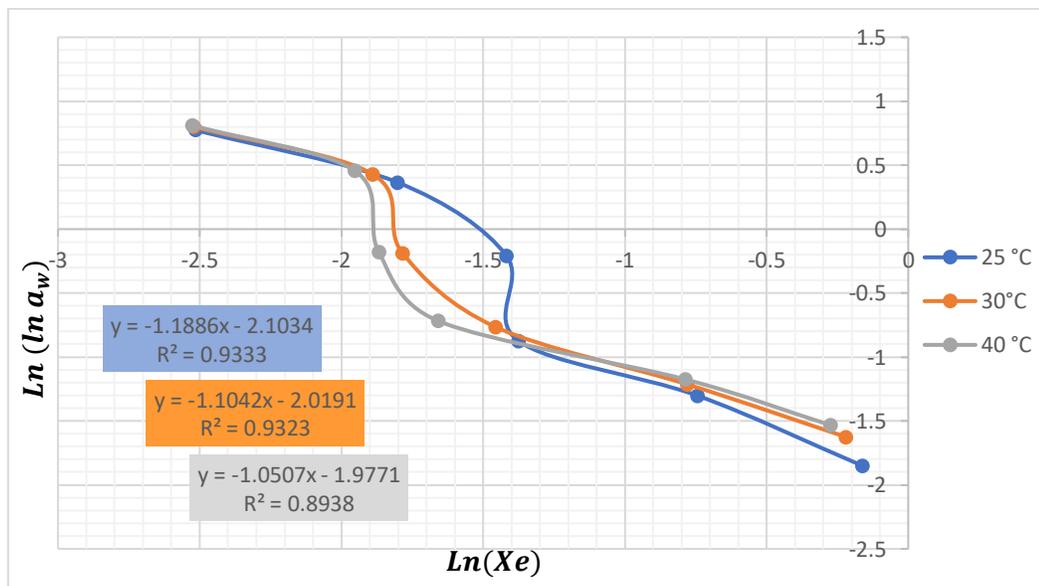


Figura 11. Proyección gráfica entre el $\ln(\ln a_w)$ vs $\ln(X_e)$ de las isotermas de adsorción de la tuna blanca aplicando el modelo matemático Halsey

El modelo Halsey considera la condensación de las multicapas, asumiendo que la magnitud del parámetro B caracteriza el tipo de interacción entre el vapor y el sólido, siendo A y B constantes que dependen de la temperatura y la naturaleza del alimento (Lima, 2006). En base a los datos presentados en la Tabla 11, se determinó que los valores obtenidos para las constantes A (0.1220 – 0.1384) y B (-1.1886 – (1.0507)) tuvieron relación directa con el aumento de temperatura de 25 a 40 °C, pues el parámetro A disminuyó a medida que la temperatura aumento, mientras que, los valores del parámetro B disminuyeron progresivamente. Además, fue evidente que los valores obtenidos para la constante B fueron pequeños, por lo tanto, las fuerzas de atracción predominantes fueron las de Van der Waals, pues según Lima, (2006) menciona que si la magnitud del parámetro B es grande la atracción entre el sólido es muy específica, por lo que no se extiende muy lejos de la superficie, pero si la magnitud de B es pequeña, las fuerzas de atracción predominantes son las de Van der Waals y son capaces de llegar a grandes distancias de la superficie.

Inclusive, valores semejantes para el parámetro B fueron reportados por Choque et al., (2019) quien al estudiar las isotermas de sorción de granos y harina de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) indicó una disminución de 3.265 – 2.375 a temperaturas de 18 a 30 °C, concluyendo que al ser B pequeño sus fuerzas de atracción fueron las de Van der Waals.

Por su parte, en la Figura 10 se pudo predecir el comportamiento de adsorción de humedad de la tuna blanca a partir de su coeficiente de determinación (R^2), del cual se obtuvo 0.9333, 0.9323 y 0.8938 a 25, 30 y 40 °C; evidenciándose que los datos si se ajustaron al modelo Halsey con un porcentaje > 90% para 25 y 30 °C, con una diferencia poco significativa a 40 °C. Parte del correcto ajuste de datos, se debe a que el modelo Halsey es utilizado para analizar isotermas de sorción de diversos alimentos, mostrando un buen ajuste con productos ricos en fibra y almidón, como el maíz, papa, trigo, algunas verduras

y frutas, con valores de a_w entre 0.1 – 0.8; característica principal de la tuna al ser un fruta con alto contenido de fibra (Choque et al., 2009).

3.1.4. Calor isostérico de adsorción

Tabla 12. Calor isostérico de adsorción (q_{st}) de la tuna blanca (*Napolea coccinellifera* L.)

X_e (b.s.)	q_{st} (kJ/mol)
0,2	31,51587532
0,3	-1,308430195
0,4	-1,201733019
0,5	-1,274172721
0,6	-1,318336431
0,7	-1,668086343

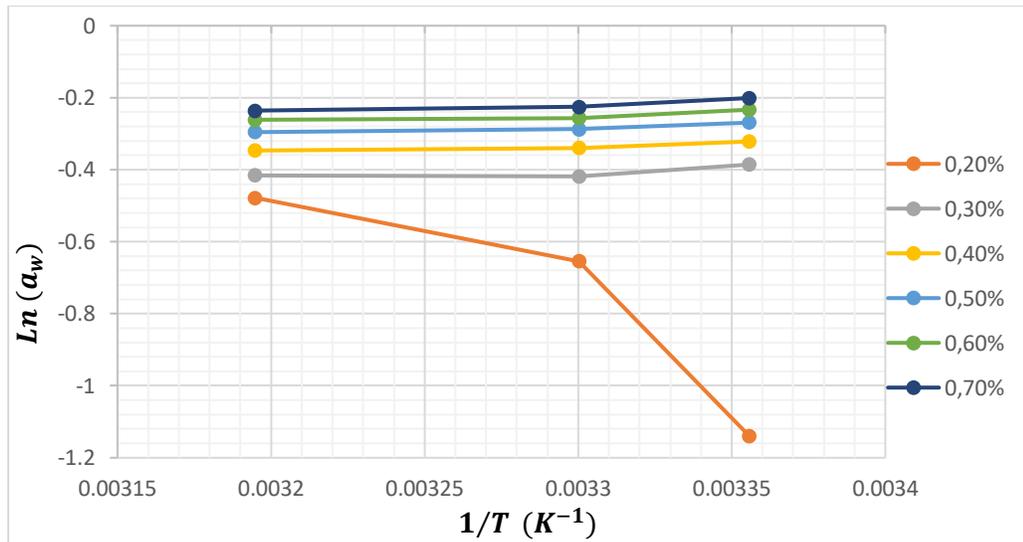


Figura 12. Proyección gráfica entre el $\ln(a_w)$ vs $1/T$ a las diferentes humedades de equilibrio aplicadas para la muestra de tuna blanca

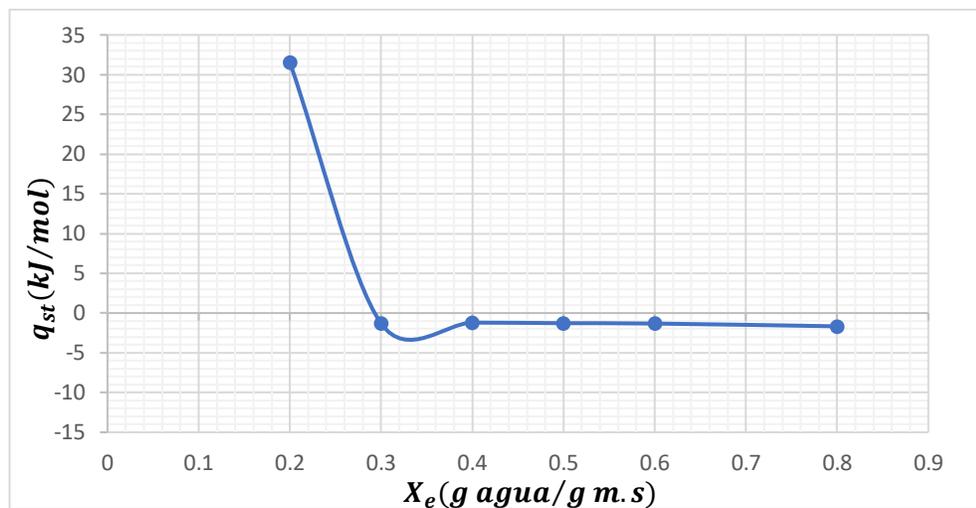


Figura 13. Influencia de la humedad de equilibrio (X_e) en función del calor de adsorción (q_{st}) para la muestra seca de tuna blanca

El calor isostérico de adsorción neto es una medida de la energía liberada en la sorción de agua por el producto, considerado como un indicador de las fuerzas intermoleculares de atracción entre los locales de sorción y el vapor de agua (**Duarte, 2008**). En la Figura 11, se muestra la relación del calor isostérico de adsorción (q_{st}) para la muestra seca de tuna blanca, para lo cual se consideró valores de humedad de equilibrio (X_e) predeterminados (0.2 – 0.7) a las diferentes temperaturas aplicadas (25, 30 y 40) °C respectivamente. A partir de la ecuación de Clausius Clapeyron se graficó la relación entre el $\ln(a_w)$ vs y la temperatura absoluta inversa $1/T$ a un contenido de humedad constante, formando isósteras en líneas rectas. En efecto, los calores isostéricos de adsorción netos (q_{st}) se derivaron de la pendiente obtenida en la proyección gráfica; notándose la influencia de la temperatura en las isósteras, pues para bajos contenidos de humedad la a_w fue incrementando a medida que aumento también la temperatura.

Cabe considerar, que a partir de la pendiente se obtuvo el calor isostérico neto de adsorción (q_{st}) con cada valor de humedad, donde se pudo apreciar que a un valor de $X_e = 0.2$ se obtuvo un $q_{st} = 31.515 \text{ kJ/mol}$, mientras que para $X_e = 0.7$ su q_{st} fue de -1.668 kJ/mol , por ende, se puede decir que el calor isostérico de adsorción tiende a decrecer con el aumento de la humedad, como se observa en la Tabla y Figura 12. Según **Pulla, (2011)** menciona que la sorción ocurre en los sitios disponibles más activos, dando origen a una

alta energía de interacción, es decir, que a medida que la mayoría de estos sitios llegan a ser ocupados, la sorción ocurre en menores sitios disponibles, dando origen a bajos calores de sorción, indicando que los altos q_{st} a bajos contenidos de humedad indican una fuerte interacción entre los componentes agua-alimento en las frutas secas. Por lo tanto, la muestra seca de tuna blanca demostró tener una fuerte interacción del agua con la superficie del alimento durante el proceso de secado, lo que permitirá controlar el gasto de energía y obtener mayor rendimiento.

Sin duda, similares tendencias se observaron en la determinación de isothermas de adsorción de humedad en rodajas secas de jengibre (*Zinziber officinale*) donde los valores de q_{st} disminuyeron de 6.573 a 0.261 kJ/mol, para contenidos de humedad de 0.10 a 0.22 *g agua/g m.s.* ; aludiendo que durante la adsorción de las primeras capas de las moléculas de agua fue sustancialmente mayor que el calor de condensación del agua pura (Alakali et al., 2009). También, se observó que al aumentar el contenido de humedad (X_e) de 0.3 – 0.7 (*g agua/g m.s.*) los valores para q_{st} se tornaron negativos, debido a que existió un mayor grado de agua ligada en la superficie del alimento (Tsami, 1991).

3.1.5. Energía de activación

Tabla 13. Determinación de la energía de activación (E_a) para los parámetros termodinámicos obtenidos mediante el modelo GAB

Modelo	Parámetros	Pendiente	E_a [kJ/mol]	R^2
GAB	m_o	3989,02625	-33,1647642	0,9317
	C_{GAB}	-2083,70864	17,3239536	0,0159
	K_{GAB}	733,876054	-6,10144552	0,3758

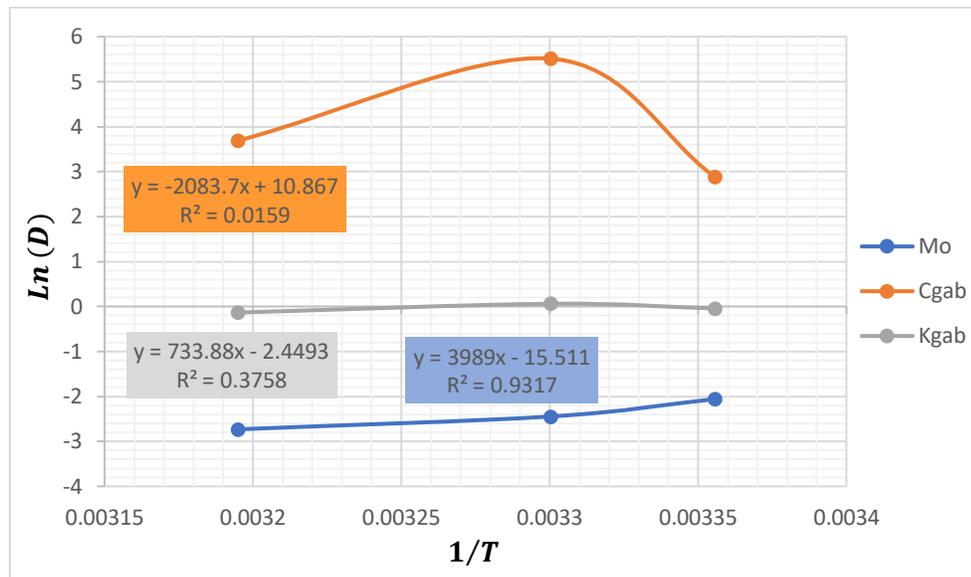


Figura 14 Proyección gráfica del $\ln(D)$ vs $1/T$ en la obtención de la energía de activación (E_a) mediante los parámetros termodinámicos del modelo GAB

La higroscopicidad en los alimentos se ve afectada por algunos parámetros como la temperatura, presión y potencial químico. Cada lugar activo de la superficie del alimento es un sitio de adsorción, por ende, para que el adsorbato migre de la monocapa, se requiere de energía de activación, por tanto, debido a que las dislocaciones moleculares suceden por acción de calor, el efecto de la temperatura se puede evaluar a través de la ecuación Arrhenius (Choque et al., 2009).

De hecho, en la Tabla 13 se resumen los valores obtenidos para la energía de activación de los diferentes parámetros del modelo GAB y el coeficiente de determinación (R^2), pero no todas las constantes presentaron dependencia con la temperatura. En el caso de la monocapa (m_o), la energía que se disipa para que se absorba agua hacia la superficie de la muestra seca de tuna blanca fue de 33.164 kJ/mol , en un intervalo de $25 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$. Es decir, que se necesita tal cantidad de energía para unir la primera monocapa de agua entre el sistema sólido de agua, donde la formación del enlace sólido – agua (adsorción) requiere de mayor energía (Gálvez et al., 2006).

Es por ello, que el coeficiente de determinación (R^2) de la monocapa fue de 0.9317, valor muy cercano a 1, demostrando tener una dependencia con el aumento de la temperatura, a diferencia del ajuste de datos (R^2) para C_{GAB} (0.0159) y K_{GAB} (0.3758), los cuales no

presentaron una dependencia con la temperatura ya que sus valores suelen estar entre la energía de las moléculas en la m_o y el agua líquida.

Ahora bien, resultados cercanos fueron determinados por **Pulla, (2011)** en muestras secas de ají (*Capsicum annuum* L.), para la monocapa obtuvo una E_a de 10.1597 kJ/mol en un rango de temperatura de 25, 35 y 40°C ; fue evidente que el valor de E_a calculado en la muestra seca de tuna blanca fue mayor que el del ají, probablemente se debe a que la tuna presenta mayores grupos activos capaces de absorber agua por la presencia marcada de carbohidratos (grupos OH) y proteínas (grupo amino NH^{+2} y carboxilo COOH) para la unión con el agua (**Gálvez et al., 2006**).

CAPITULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Las isotermas de adsorción de la tuna blanca (*Napolea coccinellifera* L.) mostraron una tendencia cóncava con un punto de inflexión, es decir, presentaron un comportamiento del tipo II por la formación de curvas sigmoidales, característico en

la mayoría de los alimentos. De hecho, este comportamiento es un indicativo de una adsorción física en multicapas, evidenciándose un comportamiento lineal hasta una $a_w = 0.45$ comprometiendo la calidad del producto en humedades relativas $> 45\%$.

- Los datos obtenidos experimentalmente, demostraron que la humedad de equilibrio (X_e) aumentó con el incremento de la (a_w), argumentando que la muestra seca de tuna blanca tuvo gran higroscopicidad, siendo un fruto con alta capacidad para absorber la humedad atmosférica. También, fue evidente que la humedad de equilibrio disminuyó con el aumento de la temperatura, siendo inversamente proporcional al incremento de temperatura para un mismo valor de a_w , tendencia característica de la mayoría de los alimentos.
- En la construcción de isotermas de adsorción de la tuna blanca, se utilizaron soluciones salinas saturadas en un rango de a_w (humedades relativas) de 0.11 a 0.85, a temperaturas de 25, 30 y 40 °C, hasta obtener las humedades de equilibrio (X_e) de las muestras secas, las cuales alcanzaron un peso constante, es decir, alcanzaron un equilibrio con el ambiente. Así pues, se observó que la X_e fue directamente proporcional a la a_w empleada por las diferentes sales.
- De acuerdo con los datos obtenidos mediante las ecuaciones matemáticas, se evidenció que los modelos que mejor ajustaron los datos experimentales de las isotermas de adsorción de la tuna blanca fueron los de Halsey y Oswin, pues se obtuvieron valores para R^2 mayores al 92 y 93 % respectivamente, debido a que, los parámetros de estos dos modelos mostraron relación directa con la temperatura. Además, que son apropiados para isotermas de alimentos que tienen un alto contenido en fibra y carbohidratos, característico en la tuna blanca.
- Respecto al calor isostérico de adsorción (q_{st}) y la energía de activación (E_a), se observó que el q_{st} disminuyó con el incremento de humedad de la tuna blanca, demostrando tener una fuerte interacción del agua con la superficie del alimento. Mientras que, la E_a obtenida mediante la ecuación de Arrhenius para los parámetros termodinámicos del modelo GAB, mostraron que la monocapa (m_o) presentó

dependencia con la temperatura, necesaria para que se disipe la energía y se pueda absorber agua hacia la superficie, ya que su R^2 fue mayor al 93%. A diferencia, de las constantes C_{GAB} y K_{GAB} que no presentaron dependencia al aumento de temperatura, pues su R^2 estuvo por debajo del 30 %.

4.2. Recomendaciones

- Realizar un estudio para determinar el tiempo de vida útil de la tuna blanca (*Napolea coccinellifera* L.) durante su almacenamiento, con las condiciones de humedad relativa expuestas en el trabajo.
- Aplicar temperaturas más elevadas (50 – 70) °C, en la determinación de isotermas de adsorción de la tuna blanca, para evaluar la influencia de estas en el alimento, la interacción del agua y la termodinámica del proceso.
- Utilizar otros modelos matemáticos (Smith, Henderson, Peleg, Lewicki) para determinar un mejor ajuste de datos de las isotermas de adsorción de la tuna blanca y relacionar con los valores obtenidos experimentalmente.
- Para obtener los parámetros de los diferentes modelos matemáticos, calor isostérico y energía de activación, es importante recurrir a técnicas de linealización mediante las propiedades básicas de logaritmos y función exponencial.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, F. M. (2010). *La tuna peruana*.
<https://www.monografias.com/trabajos52/exportacion-tuna/exportacion-tuna>
- Agama, A. (2018). Estudio de las condiciones óptimas de almacenamiento de papilla para niños de 6 a 36 meses a base de harina de papa nativa (*Solanum tuberosum* ssp.), variedades Yema de Huevo y Santa Rosa con sabor a mora (*Rubus glaucus*) y taxo (*Passiflora tripartita*). *New England Journal of Medicine*, 372(2), 2499–2508.
https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/27135/1/AL_656.pdf
- Aguado, J., Calles, J. A., Cañizares, P., López, B., Santos, A., & Serrano, D. (2012). *Ingeniería de la industria alimentaria. Vol III*.
<https://www.untumbes.edu.pe/vcs/biblioteca/document/varioslibros/0904>.
Ingeniería de la industria alimentaria. Vol. I Conceptor básicos.pdf
- Alakali, J., Irtwange, S. V., & Satimehin, A. (2009). Moisture adsorption characteristics of ginger slices. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 29(1), 155–164.
<https://doi.org/10.1590/s0101-20612009000100024>
- Andrade, R., Lemus, R. M., & Pérez, C. E. (2011). Models of sorption isotherms for food: uses and limitations. *Vitae*, 18, 325–334.
<http://aprendeonline.udea.edu.co/revistas/index.php/vitae/article/viewArticle/10682>
- Badui, S. (2006). Salvador Badui Dergal. In *Química de los alimentos*.
- Blahovec, J. (2004). Sorption isotherms in materials of biological origin mathematical and physical approach. *Journal of Food Engineering*, 65(4), 489–495.
<https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2004.02.012>
- Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60(2), 309–319.
https://doi.org/10.1021/JA01269A023/ASSET/JA01269A023.FP.PNG_V03
- Casa, F. (2013). *Influencia de la deshidratación en la calidad de diferentes variedades de pimiento. Estudio de las condiciones de almacenamiento*.
https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/33786/TFM_Casa.pdf?sequence=1 Francisco

- Cerezal, P., & Duarte, G. (2005). Algunas características de tunas (*Opuntia ficus-índica* (L.) Miller) cosechadas en el altiplano andino de la 2 da Región de Chile. *Undefined*.
- Chenlo, F., Moreira, R., Chaguri, L., & Santos, F. (2005). Isotermas de desorción de pimientos padron (*Capsicum annum* L. Var. Longum). *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 5(1), 18–24. <https://doi.org/10.1080/11358120509487666>
- Choque, D., Cáceres, N., & Solano, A. (2009). *Evaluación de las isotermas de adsorción del maíz morado (Zea mays L.) Calor Isostérico y Energía de Activación*.
- Choque, D., Ligarda, C. A., Ramos, B. S., Taipe, F., Peralta, D. E., & Solano, A. M. (2019). Evaluación de las isotermas de sorción de granos y harina de kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Revista ION*, 31(2), 67–81. <https://doi.org/10.18273/revion.v31n2-2018005>
- Clemente, G. (2003). *Efecto de la contraccion en la cinetica de secado de musculos de jamon*. 323.
- Díaz, J. E. (2003). “Deshidratación por aire caliente de musculo de camarón gigante de malasia (*macrobruchium rosenbergii*.” *Universidad Nacional de San Martín*. http://hdl.handle.net/11458/62#.Yf3K_Y6jeZo.mendeley
- Duarte, A. L. (2008). *Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (Ricinus communis L.) durante a secagem e o armazenamento*. 186.
- El Comercio, C. (2011). *La tuna cuatro variedades se producen en el país - El Comercio*. <https://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/tuna-cuatro-variedades-se-producen.html>
- El Telégrafo. (2017). *El Telégrafo - El cultivo de tuna ocupa 180 hectáreas en el país*. <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/193/1/el-cultivo-de-tuna-ocupa-180-hectareas-en-el-pais>
- Espino, E., Rafael, H., & Tingal, I. (2012). Morfofisiología de Tuna (*Opuntia ficus-indica* Mill.). *Ingeniería*, 37. http://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/UNC/2853/TUNA_FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- FAO. (2018). Fichas técnicas Productos frescos de frutas. *Prodar IICA*, 79. <http://www.fao.org/3/a-au173s.pdf>
- Fennema, O. R. (2000). *Química de los alimentos* (S. Acribia (ed.); Segunda).

- Ferreira, C., & Pena, R. (2003). Comportamento higroscópico da farinha de pupunha (*Bactris gasipaes*) / Hygroscopic behavior of the pupunha flour (*Bactris gasipaes*). *Food Science and Technology (Campinas)* VO - 23, 2003(2), 251. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edssci&AN=edssci.S0101.20612003000200025&lang=es&site=eds-live>
- Fiorentin, L. D., Menon, B. T., de Barros, S. T. D., Pereira, N. C., da Lima, O. C. M., & Modenes, A. N. (2010). Isotermas de sorção do resíduo agroindustrial bagaço de laranja. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(6), 653–659. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000600012>
- Francisquetti, M. C. C. (2017). *Produção de uvas-passas variedade Crimson: modelagem matemática e estudo experimental*. 154.
- Gabas, A. L., Telis-Romero, J., Giraldo-Gómez, G. I., & Telis, V. R. N. (2009). Propiedades termodinámicas de sorción de agua de la pulpa de lulo en polvo con encapsulantes. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 29(4), 911–918. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612009000400032>
- Gálvez, A. V., Aravena, E. L., & Mondaca, R. L. (2006). Adsorption isotherms for corn (*Zea mays* L.) flour. *Ciencia e Tecnologia de Alimentos*, 26(4), 821–827. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612006000400017>
- Gálvez, V., Aravena, L., Mondaca, L., Adsorción, I. D. E., Harina, E. N., Zea, D. E. M., Adsorción, I. D. E., Harina, E. N., Zea, D. E. M., Gálvez, A. V., Aravena, E. L., & Mondaca, R. L. (2006). *Isotermas de adsorción en harina de maíz (Zea mays L.)*.
- Gil, J., Muratona, S., Yacanto, P., Soteras, E. M., & Abaca, C. (2013). Isotermas De Adsorción Y Desorción De Agua En Leche Descremada En Polvo. *Avances En Ciencias e Ingeniería*, 4(1), 51–59.
- González, M. ., & Orellana, A. . (2003). Recolección de germoplasma de chile tipo habanero (*Capsicum cillillellse* Jacq.) en el departamento del Peten. *Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola (ICTA)*.
- Huanca Alca, J. J. (2017). Evaluar los parámetros durante el tratamiento térmico para obtención de mucílago de la penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*). *Tesis UNA*, 1–79.

- Ibarz, A., & Barbosa, G. V. (2005). Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. In *Mundi-Prensa*. <https://es.scribd.com/doc/241914696/Operaciones-unitarias-en-la-ingenieria-de-alimentos-libro-pdf>
- INECC. (2007). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/70/usos.html>
- Jiménez, A. J., Chávez, E. S., Verdalet, J. L., Guzman, I., Martínez, J. A., & Aquino, N. E. (2014). Betalaínas, polifenoles y actividad antioxidante en tuna roja mínimamente procesada, almacenada en atmósferas controladas. *Gayana. Botánica*, 71(2), 222–226. <https://doi.org/10.4067/S0717-66432014000200005>
- Labuza, T. P., & Bell, L. N. (2000). *Moisture sorption : practical aspects of isotherm measurement and use*. 122.
- Leal, M. C. (2010). *Caracterização e análise experimental do recobrimento de sementes de jambu (Spilanthes oleracea) em leito fluidizado*.
- Lima, E. E. (2006). *Produção e armazenamento da farinha de facheiro*.
- Madalli, D. P. (2015). Thematic harvesting of agricultural resources from generic repositories. *Information Processing in Agriculture*, 2(2), 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.05.002>
- MAGAP. (2018). *La producción de tuna, una actividad rentable – Ministerio de Agricultura y Ganadería*. <https://www.agricultura.gob.ec/la-produccion-de-tuna-una-actividad-rentable/>
- Marques, P. A. A. (2009). Influência de encapsulantes e do método de secagem nas propriedades físico-químicas e atributos de qualidade de polpa de maracujá (*Passifora edulis* f. *flavicarpa*). *Aleph*, 204 f. : il. <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/101967?locale-attribute=es>
- Martinelli, L. (2008). “*Construção e desenvolvimento de um secador de leito pulso - fluidizado para secagem de past as e polpas.*”
- Montes, E., Torres, R., Andrade, R., Pérez, O., Marimon, J., & Meza, I. (2009). Modelado de las isothermas de desorción del ñame (*Dioscorea rotundata*). *DYNA (Colombia)*, 76(157), 145–152.

- Olalde, R. O., Suárez, E. J. D., Ángel, J., & Pabello, G. (2015). *Harina de cáscara de tuna como fuente de fibra y su efecto sobre las características físico - químicas y sensoriales de salchichas bajas en sodio y grasa Cactus pear peel flour as a fiber source and its effect on physicochemical and sensory characteristic*. 9(2), 54–65.
- Oliveira, G. S., da Costa, J. M. C., & Afonso, M. R. A. (2014). Caracterização e comportamento higroscópico do pó da polpa de cajá liofilizada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18(10), 1059–1064. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/AGRIAMBI.V18N10P1059-1064>
- Peña, M., Pennington, C., & Zevallos, R. y P. (2010). Guía ilustrada de la flora leñosa de los bosques estacionalmente secos de Jaén, Perú. *Universidad Nacional Agraria La Molina, Royal Botanical Garden Edinburgh*, 228.
- Pérez, A., Beristain, C., Lobato, C., Rodríguez, H., & Vernon, C. (2006). Thermodynamic analysis of the sorption isotherms of pure and blended carbohydrate polymers. *Journal of Food Engineering*, 77(4), 753–760. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2005.08.002>
- Pérez, É. (2020). “Elaboración De Productos a Base De Tuna (Opuntia Ficusindica) Como Aporte Comercial Y Nutricional a La Comunidad De La Parroquia Eloy Alfaro Del Cantón Latacunga.” *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43(1), 89.
- Pulla, V. (2011). *Determinación de las isothermas de adsorción del ají (capsicum annum L.) seco*.
- Ramírez, M. (2013). *Fenología y valor nutracéutico de diversas variedades pigmentadas de tuna (Opuntia sp)*. Instituto de Horticultura Biotecnología Agrícola. <https://docplayer.es/3086955-Instituto-de-horticultura-biotecnologia-agricola.html>
- Rodríguez, E., Paul, E., Ramírez, R., Salomón, M., & Ordoñez, R. (2012). *Morfofisiología de tuna (Opuntia ficus indica Mill.)*. 5.
- Rosas, V. (1999). *Tipos de isoterma de adsorción*. <https://lqi.tripod.com/FQAv/isoterms.htm>
- Sáenz, C. H., Berger, J. C., García, L., Galletti, V. G., Cortázar, I., Higuera, C., Mondragón, A., Rodríguez-Félix, E., & Sepúlveda, M. T. V. (2006). Utilización agroindustrial de nopal. *Boletín de Servicios Agrícolas de La FAO N° 162*. Roma.

- Segura, M. (2016). *Determinación de Isotermas de Sorción de un microencapsulado de jugo de tuna morada (Opuntia ficus indica)*. [https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/24715/Nieves Segura%2C María Nayelli.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/24715/Nieves_Segura%2C_María_Nayelli.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Talens, P. (2018). Determinación de la istoerma de sorción de agua de un alimento. *Universidad Politécnica de Valencia*.
- Timmermann, E. O., Chirife, J., & Iglesias, H. A. (2001). Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters? *Journal of Food Engineering*, 48(1), 19–31. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00139-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00139-4)
- Tous, J., & Ferguson, L. (1996). *Frutas Mediterraneas*. [https://hort.purdue.edu/newcrop/proceedings1996/V3-416.html#Table 2](https://hort.purdue.edu/newcrop/proceedings1996/V3-416.html#Table%202)
- Tsami, E. (1991). Net isosteric heat of sorption in dried fruits. *Journal of Food Engineering*, 14(4), 327–335. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(91\)90022-K](https://doi.org/10.1016/0260-8774(91)90022-K)
- Viades, J. (2011). *Adsorción de agua en alimentos Isoterma de adsorción de Guggenheim, Anderson y de Boer (GAB)*. https://www.academia.edu/23302707/Adsorción_de_agua_en_alimentos_Isoterma_de_adsorción

ANEXOS

Anexo 1. Determinación de la humedad de equilibrio para las muestras secas de tuna blanca (*Napolea coccinellifera* L.) mediante soluciones salinas saturadas, aplicando diferentes temperaturas de estudio

Tabla 14. Datos obtenidos de las muestras secas de tuna blanca, empleando el método gravimétrico estático (variaciones de peso de las muestras) mediante soluciones salinas hasta alcanzar la humedad de equilibrio, X_e (g agua/g m. s.) a temperatura de 25°C

Días	Soluciones salinas saturadas					
	Temperatura de 25 °C					
	a_w					
	0.1142	0.2367	0.4432	0.6585	0.7617	0.8546
<i>KOH</i>	<i>CH₃CO₂K</i>	<i>K₂CO₃</i>	<i>NaNO₂</i>	<i>NaCl</i>	<i>KCl</i>	
1	2.1001	2.1001	2.1001	2.1001	2.1001	2.1001
2	2.1008	2.1248	2.1364	2.1380	2.1713	2.2271
3	2.1015	2.1495	2.1727	2.1759	2.2425	2.3541
4	2.1022	2.1742	2.2090	2.2138	2.3137	2.4811
5	2.1029	2.1989	2.2453	2.2517	2.3849	2.6081
6	2.1036	2.2236	2.2816	2.2896	2.4561	2.7213
7	2.1043	2.2483	2.3179	2.3275	2.5273	2.8621
8	2.1050	2.2730	2.3542	2.3654	2.5985	2.9891
9	2.1057	2.2977	2.3905	2.4033	2.6697	3.1091
10	2.1064	2.3464	2.4268	2.4412	2.7409	3.2361
11	2.1071	2.3711	2.4631	2.4791	2.8121	3.3631
12	2.1078	2.3958	2.4994	2.5170	2.8833	3.4901
13	2.1085	2.4205	2.5357	2.5549	2.9545	3.6171
14	2.1092	2.4452	2.5720	2.5928	3.0257	3.7441
15	2.1231	2.4465	2.6085	2.6307	3.0975	3.8877
X_e (b. s.) ^a	0.0809	0.1649	0.2421	0.2526	0.4749	0.8512

Tabla 15. Datos obtenidos de las muestras secas de tuna blanca, empleando el método gravimétrico estático (variaciones de peso de las muestras) mediante soluciones salinas hasta alcanzar la humedad de equilibrio, $X_e(g\text{ agua}/g\text{ m. s.})$ a temperatura de 30 °C

Días	Soluciones salinas saturadas					
	Temperatura de 30 °C					
	a_w					
	0.1081	0.2155	0.4363	0.6280	0.7430	0.8211
<i>KOH</i>	<i>CH₃CO₂K</i>	<i>K₂CO₃</i>	<i>NaNO₂</i>	<i>NaCl</i>	<i>KCl</i>	
1	2.1001	2.1001	2.1001	2.1001	2.1001	2.1001
2	2.1021	2.1289	2.1321	2.1446	2.1876	2.2531
3	2.1041	2.1577	2.1641	2.1891	2.2751	2.4061
4	2.1061	2.1865	2.1961	2.2336	2.3626	2.5591
5	2.1081	2.2153	2.2281	2.2781	2.4501	2.7121
6	2.1101	2.2441	2.2601	2.3226	2.5376	2.8651
7	2.1121	2.2729	2.2921	2.3671	2.6251	3.0181
8	2.1141	2.3017	2.3241	2.4116	2.7126	3.1711
9	2.1161	2.3305	2.3561	2.4561	2.8001	3.3241
10	2.1181	2.3593	2.3881	2.5006	2.8876	3.4771
11	2.1201	2.3881	2.4201	2.5451	2.9751	3.6301
12	2.1221	2.4178	2.4528	2.5899	3.0632	3.7836
$X_e(b. s.)^a$	0.0804	0.1512	0.1679	0.2332	0.4586	0.8016

Tabla 16. Datos obtenidos de las muestras secas de tuna blanca, empleando el método gravimétrico estático (variaciones de peso de las muestras) mediante soluciones salinas hasta alcanzar la humedad de equilibrio, $X_e(g\text{ agua}/g\text{ m. s.})$ a temperatura de 40 °C

Días	Soluciones salinas saturadas					
	Temperatura de 40 °C					
	a_w					
	0.1054	0.2061	0.4330	0.6140	0.7342	0.8056
<i>KOH</i>	<i>CH₃CO₂K</i>	<i>K₂CO₃</i>	<i>NaNO₂</i>	<i>NaCl</i>	<i>KCl</i>	
1	2.1001	2.1001	2.1001	2.1001	2.1001	2.1001
2	2.1022	2.1331	2.1361	2.1445	2.2063	2.2772
3	2.1043	2.1661	2.1721	2.1890	2.3125	2.4543
4	2.1064	2.1991	2.2081	2.2335	2.4187	2.6314
5	2.1085	2.2321	2.2441	2.2780	2.5249	2.8085
6	2.1106	2.2651	2.2801	2.3225	2.6311	2.9856
7	2.1127	2.2981	2.3161	2.3670	2.7315	3.1627
8	2.1148	2.3311	2.3521	2.4115	2.8435	3.3398
9	2.1169	2.3641	2.3881	2.4560	2.9497	3.5169
10	2.1192	2.3979	2.4245	2.5001	3.0560	3.6947
$X_e(b. s.)^a$	0.0800	0.1418	0.1544	0.1904	0.4551	0.7593

Anexo 2. Linealización de la ecuación del modelo matemático BET (Brunauer, Emmett, Teller)

- El modelo matemático presenta la forma lineal $y = A + Bx$

$$m = \frac{m_0 C a_w}{(1 - a_w)(1 + a_w(c - 1))}$$

$$\frac{a_w}{(1 - a_w)m} = \frac{1}{m_0 C} + \frac{a_w(C - 1)}{m_0}$$

$$A = \frac{1}{m_0 C} \quad B = \frac{C-1}{m_0 C}$$

$$C = \frac{B}{A} + 1 \quad m_0 = \frac{1}{A+B}$$

Tabla 17. Datos obtenidos mediante el modelo matemático BET para la determinación de isothermas de adsorción de la muestra de tuna blanca

25 °C		30 °C		40 °C	
a_w	$\frac{a_w}{(1 - a_w)m}$	a_w	$\frac{a_w}{(1 - a_w)m}$	a_w	$\frac{a_w}{(1 - a_w)m}$
0,1142	1,59360949	0,1081	1,50748667	0,1054	1,47272524
0,2367	1,88053898	0,2155	1,81678082	0,2061	1,83077916
0,4432	3,28780261	0,4363	4,60984669	0,433	4,94603906
0,6585	7,63364088	0,628	7,2391597	0,614	8,35437802
0,7617	6,73066141	0,743	6,3040789	0,7342	6,06949514
0,8546	6,90505063	0,8211	5,72569227	0,8056	5,4577017

Tabla 18. Parámetros del modelo matemático BET en la determinación de isothermas de adsorción en datos experimentales de $a_w < 0.6$

Parámetros	25 °C	35 °C	40 °C
A	0,84481242	0,12965362	- 0,01283282
B	5,32365424	9,92913976	11,1323598
R2	0,95307396	0,9452956	0,95617698
C	7,30158144	77,5820454	- 866,491555
m_0	0,16211484	0,0994155	0,08993188

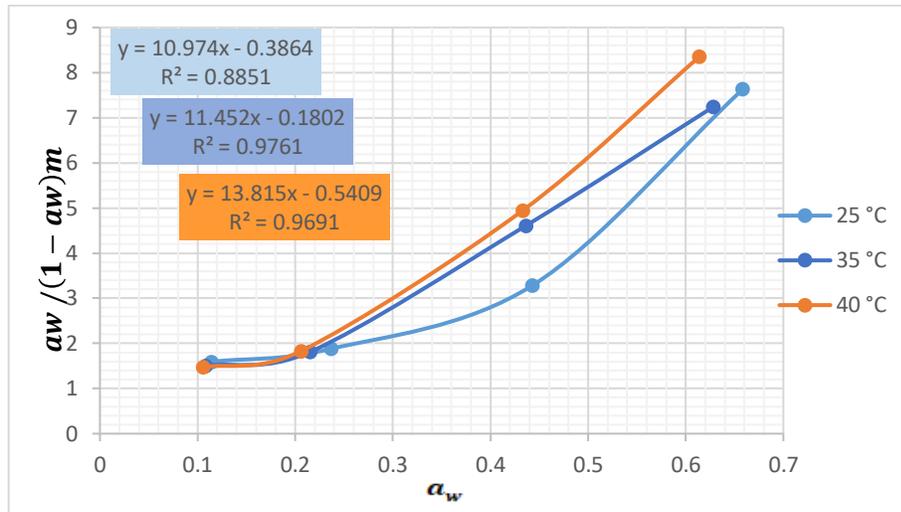


Figura 15. Proyección gráfica de $\frac{a_w}{(1-a_w)m}$ vs a_w del modelo matemático BET para datos experimentales de $a_w < 0,6$

Anexo 3. Linealización de la ecuación del modelo matemático GAB (Guggenheim, Anderson y De Boer)

- El modelo matemático presenta la forma cuadrática $y = \alpha x^2 + \beta x + \epsilon$

$$m = \frac{m_0 C_{GAB} K_{GAB} a_w}{(1 - K_{GAB} a_w)(1 - (1 - C_{GAB})K_{GAB} a_w)}$$

$$\frac{a_w}{m} = \alpha a_w^2 + \beta a_w + \epsilon$$

$$k = \frac{\sqrt{\beta^2 - 4\alpha\epsilon - \beta}}{2\epsilon} \quad C = \frac{\beta}{\epsilon k} + 2 \quad m_0 = \frac{1}{\epsilon k c}$$

Tabla 19. Datos para el cálculo de parámetros del modelo matemático GAB en la determinación de isothermas de adsorción de la tuna blanca

25 °C		30 °C		40 °C	
a_w	$\frac{a_w}{m}$	a_w	$\frac{a_w}{m}$	a_w	$\frac{a_w}{m}$
0,1142	1,41161928	0,1081	1,344527363	0,1054	1,3175
0,2367	1,4354154	0,2155	1,42526455	0,2061	1,45345557
0,4432	1,83064849	0,4363	2,598570578	0,433	2,80440415
0,6585	2,60688836	0,628	2,69296741	0,614	3,22478992
0,7617	1,60391661	0,743	1,620148277	0,7342	1,61327181
0,8546	1,00399436	0,8211	1,024326347	0,8056	1,0609772

Anexo 4. Linealización de la ecuación del modelo matemático Oswin

- Los parámetros característicos A y B del modelo Oswin muestran relación con la temperatura

$$X_e = A \left[\frac{a_w}{1 - a_w} \right]^B$$

$$\ln X_e = \ln(A) \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B$$

$$\ln X_e = \ln(A) + \ln \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B$$

$$\ln X_e = \ln(A) + B \ln \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)$$

$$\ln y = \ln A + B \ln x$$

$$y = b + mx$$

Tabla 20. Datos obtenidos para la linealización del modelo Oswin mediante los valores experimentales de la tuna blanca

25 °C		30 °C		40 °C	
$\ln(X_e)$	$\ln \left[\frac{a_w}{1 - a_w} \right]$	$\ln(X_e)$	$\ln \left[\frac{a_w}{1 - a_w} \right]$	$\ln(X_e)$	$\ln \left[\frac{a_w}{1 - a_w} \right]$
-2,51454145	-2,04853989	-2,5207411	-2,11029729	-2,52572864	-2,13861405
-1,80241605	-1,17085762	-1,88915182	-1,29208566	-1,95333766	-1,34859602
-1,41840442	-0,22818497	-1,78438671	-0,25619211	-1,86820864	-0,26962158
-1,37594807	0,65661684	-1,45585882	0,52364631	-1,65862816	0,46415756
-0,74465102	1,16202239	-0,77957691	1,06161996	-0,7872381	1,01603732
-0,16110816	1,77114496	-0,22114555	1,52381791	-0,27535832	1,42166945

Anexo 5. Linealización de la ecuación del modelo matemático Halsey

- Los parámetros A y B son constantes que dependen de la temperatura, el modelo presenta la forma exponencial $y = ae^{bx}$

$$a_w = \exp \left[\frac{-A}{X_e^B} \right]$$

$$\ln(-\ln(a_w)) = \ln(-A) - B \ln(X_e)$$

$$y = b + mx$$

Tabla 21. Logaritmos obtenidos de la muestra seca de tuna blanca mediante el modelo Halsey

25 °C		30 °C		40 °C	
$Ln(-Ln a_w)$	$Ln(X_e)$	$Ln(-Ln a_w)$	$Ln(X_e)$	$Ln(-Ln a_w)$	$Ln(X_e)$
0,77463683	-2,51454145	0,79962143	-2,5207411	0,81092695	-2,52572864
0,36531078	-1,80241605	0,42839641	-1,88915182	0,4570411	-1,95333766
-0,20612157	-1,41840442	-0,18702235	-1,78438671	-0,17791024	-1,86820864
-0,87277455	-1,37594807	-0,76525537	-1,45585882	-0,71793108	-1,65862816
-1,301209	-0,74465102	-1,21382372	-0,77957691	-1,17449877	-0,7872381
-1,85073426	-0,16110816	-1,62399143	-0,22114555	-1,53169968	-0,27535832

Anexo 6. Cálculo de la ecuación de Clausius Clapeyron para obtener el calor isostérico neto de adsorción (q_{st})

$$\frac{\partial \ln(a_w)}{\partial (1/T)} = -\frac{Q_{st} - \lambda}{R} = -\frac{q_{st}}{R}$$

$$\ln \frac{a_{w2}}{a_{w1}} = \frac{q_{st}}{R} \left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right]$$

$$Pendiente = -\frac{q_{st}}{R}$$

$$q_{st} = -Pendiente * R$$

$$q_{st} = -(-3790,48518 * 0,00831447 \text{ kJ/mol})$$

$$q_{st} = 31,51587532 \text{ kJ/mol}$$

Tabla 22. Datos obtenidos sobre los logaritmos de la actividad de agua (a_w), a las diferentes humedades de equilibrio y temperaturas empleadas

Temperatura		$Ln(a_w)$					
		$X_e(b.e)$					
°C	1/T (K ⁻¹)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
25	0,003355705	-1,13943428	-0,38566248	-0,32158362	-0,26918749	-0,23319389	-0,20089294
30	0,00330033	-0,65392647	-0,41855035	-0,33967737	-0,28768207	-0,25618341	-0,22564668
40	0,003194888	-0,4780358	-0,41551544	-0,34672461	-0,29571424	-0,26136476	-0,23572233

Anexo 7. Cálculo de la energía de activación (E_a) a partir de la ecuación de Arrhenius para los parámetros obtenidos por el modelo GAB

$$\ln(D) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{RT}$$

$$\ln(D) = -\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} \right) + \ln(D_0)$$

$$y = mx + b$$

$$Pendiente = -\frac{E_a}{R}$$

$$E_a = -Pendiente * R$$

$$E_a = -3989,02625 * 0,008314 \text{ kJ/mol}$$

$$E_a = -33,1647642$$

Tabla 23. Datos para el cálculo de la energía de activación (E_a) en base a los logaritmos de los parámetros del modelo GAB

Temperatura °C	1/T (K ⁻¹)	Ln(m_0)	Ln(C_{GAB})	Ln(k_{GAB})
25	0,0033557	-2,05915009	2,87751524	-0,04422477
30	0,00330033	-2,44601676	5,51132451	0,06053317
40	0,00319489	-2,73186145	3,68617424	-0,1349039

Anexo 8. Material fotográfico sobre el desarrollo experimental de isotermas de adsorción de la tuna blanca (*Napolea coccinellifera* L.)



Figura 16. Acondicionamiento de la muestra para el desarrollo experimental A: Recepción y clasificación de MP (tuna blanca) B: Pelado y desinfección C: Proceso de secado en estufa a 60 °C por 24 horas D: Toma de peso final de muestras secas E: Envasado de la muestra en frasco de vidrio F: Almacenamiento (desecador) de envase de vidrio, cubierto con papel aluminio

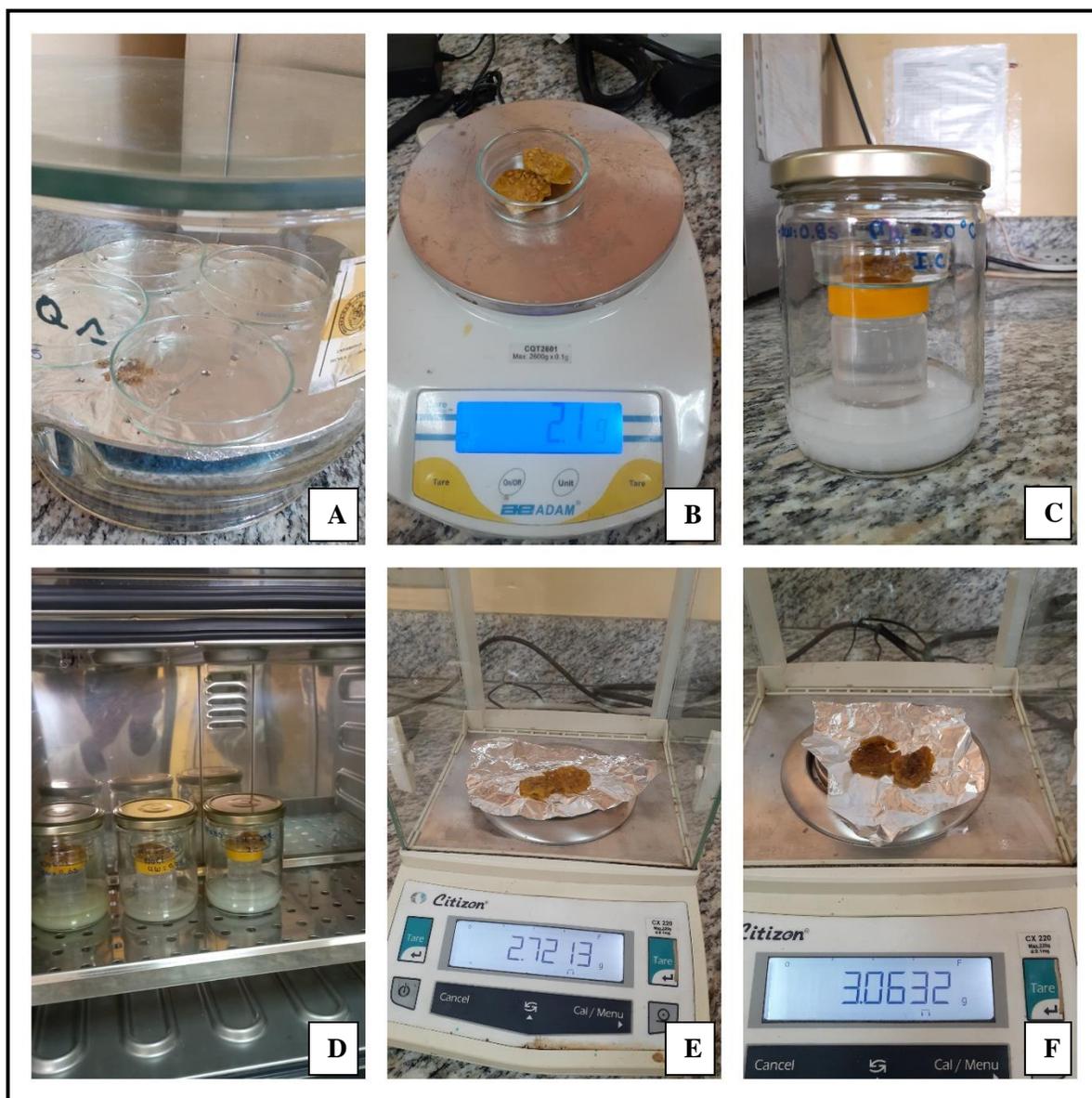


Figura 17. Proceso para la determinación experimental de isothermas de adsorción de la tuna blanca A: Esterilización placas de Petri (70 °C / 2 horas en estufa y enfriar en el desecador) B: Peso inicial de la muestra C: Preparación de soluciones salinas contiendo las muestras secas de tuna blanca D: Almacenamiento de frascos de vidrio en incubadora de laboratorio a temperatura constante (25, 30 y 40 °C) E: Retirado de las muestras secas para su posterior pesado, cada 24 horas (25 °C - Día 6/ KCl - $a_w = 0.8546$) F: Pesado continuo de las muestras hasta alcanzar el equilibrio o peso constante (30 °C - Día 12 /NaCl - $a_w = 0.7430$)