

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**

**FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA**

**UNIDAD DE INVESTIGACION**



**INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN**

**“MODELO CINETICO E ISOTERMA DE ADSORCION EN LA  
DESHIDRATACION DE ARRACACHA (*Arracacia xanthorrhiza B.*)”**

**BERNARDINO RAMIREZ DURAND**

**Callao, 2021**

**PERÚ**





## **DEDECATORIA**

Con eterno amor a Dios por ser mi guía en el camino de la felicidad.

A la memoria de mis queridos padres MOISES y HEREMENEGILDA, que ya gozan de la presencia de Dios y cuyas enseñanzas siempre son vigentes para mí.

A mi esposa DELIA y a mis hijos: YURI y MELISA, por su amor y compañía, que me inspiran a superarme permanentemente en los avatares de la vida



## **AGRADECIMIENTO**

El autor agradece a la Universidad Nacional del Callao por una parte del financiamiento en la presentación del presente trabajo, a la Facultad de Ingeniería Química, a los laboratorios de Química de Alimentos y de Investigación

A todas las personas de una u otra manera, colaboraron en la realización y conclusión del presente trabajo de investigación.

A handwritten signature in black ink, consisting of a circular flourish at the top and several vertical strokes below, enclosed within a thin circular border.

## INDICE

INDICE .....	1
INDICE DE TABLAS .....	3
INDICE DE FIGURAS.....	5
RESUMEN .....	7
ABSTRACT.....	8
INTRODUCCIÓN .....	9
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
1.1 Descripción de la realidad problemática. ....	11
1.2 Formulación del problema. ....	12
1.2.1 Problema general:.....	12
1.2.2 Problemas específicos:.....	12
1.3 Objetivos:.....	12
1.3.1 Objetivo general.....	12
1.3.2 Objetivos específicos:.....	12
1.4 Limitantes de la investigación. ....	12
II. MARCO TEÓRICO .....	14
2.1 Antecedentes. ....	14
2.2. Bases teóricas:.....	15
2.2.1. La Arracacha ( <i>Arracacia xanthorrhiza B.</i> ).....	15
2.2.2. La deshidratación:.....	18
2.2.3. Mecanismo y la cinética de la deshidratación. ....	19
2.2.4. Isoterma de adsorción y actividad de agua ( $a_w$ ).....	20
2.3. Conceptual .....	24
2.4. Definición de términos básicos.....	27
2.4.1. Medición del valor de actividad de agua ( $a_w$ ). ....	27
2.4.2. Modelamiento matemático.....	28
2.4.3. Métodos estadísticos para estimar los parámetros de los modelos .....	31



III. HIPÓTESIS Y VARIABLES .....	33
3.1. Hipótesis .....	33
3.1.1. Hipótesis General.....	33
3.1.2. Hipótesis específicas .....	33
3.2. Definición conceptual de las variables .....	33
3.2.1. Operacionalización de la variable .....	34
3.2.1.1. Definición Operacional de la variable .....	34
IV. DISEÑO METODOLÓGICO.....	35
4.1 Tipo y diseño de la investigación. ....	35
4.2. Método de investigación. ....	35
4.2.1 Procedimiento de deshidratación experimental .....	35
4.2.2. Preparación experimental de la Isotherma de adsorción .....	38
4.3. Población y muestra.....	39
4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado. ....	39
4.5. Técnicas e instrumentos de recolección de la información. ....	40
4.6. Análisis y procesamiento de datos.....	40
V. RESULTADOS.....	41
5.1. Resultados del mecanismo y cinética de deshidratación. ....	41
5.2. Determinación experimental de la isoterma de adsorción de la Arracacha ( <i>Arracacia xanthorrhiza B.</i> ) deshidratada.....	44
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	61
6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados. ....	61
6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares. ....	62
CONCLUSIONES .....	63
RECOMENDACIONES .....	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
ANEXOS .....	68



## INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Aporte nutricional de la arracacha comparada con yuca y papa por cada 100 g de producto.	17
Tabla 2. Ecuaciones para obtener la $a_w$ en soluciones saturadas de sales en función de la temperatura.	27
Tabla 3. Regresión lineal de los modelos empleados para el ajuste de isotermas de adsorción	31
Tabla 4. Operacionalización de las variables de investigación	34
Tabla 5. Datos de deshidratación de la Arracacha: Efecto de la temperatura (60°C y 70°C), para velocidad de aire 5 m/s y espesor de rodaja 4 mm.	41
Tabla 6. Datos de deshidratación de la Arracacha: Efecto del espesor de rodajas (4 mm y 9 mm), a 60°C y velocidad de aire 2 m/s	42
Tabla 7. Datos de deshidratación de la Arracacha: Efecto de la velocidad del aire (2 m/s y 5 m/s), a 70°C y espesor de rodaja 4 mm	43
Tabla 8. Soluciones salinas con su correspondiente actividad de agua ( $a_w$ ) a (20°C y 35°C).	44
Tabla 9. Comparación de la isoterma de adsorción experimental de la arracacha deshidratada a 20 °C y 35 °C.	45
Tabla 10. Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo B.E.T. a 20°C.	46
Tabla 11. Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo Henderson a 20°C	47
Tabla 12. Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo Caurie a 20°C	48
Tabla 13. Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo Oswin a 20°C	49
Tabla 14. Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo G.A.B. a 20°C	50
Tabla 15. Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo Halsey a 20°C	51



Tabla 16.	Isotermas de adsorción experimentales y calculado con los modelos BET, Henderson, Caurie Oswin, GAB, Halsey a 20°C	52
Tabla 17.	Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo B.E.T. a 35°C	53
Tabla 18.	Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo Henderson. a 35°C	54
Tabla 19.	Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo Caurie. a 35°C	55
Tabla 20.	Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo Oswin a 35°C	56
Tabla 21.	Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo G.A.B. a 35°C	57
Tabla 22.	Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo Halsey. a 35°C	58
Tabla 23.	Isoterma de adsorción experimental y calculados con los modelos: BET, Henderson, Caurie Oswin, GAB y Halsey a 35°C	59
Tabla 24.	Resumen de los parámetros y estadísticos obtenidos para cada modelo utilizado para la isoterma de adsorción de Arracacha deshidratado a 20°C y 35°C	60





## INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tubérculo fresco de la Arracacha “Arracacia xanthorrhiza B.”	16
Figura 2. Esquema de transferencia de calor y masa durante la deshidratación	19
Figura 3. Curva típica de deshidratación de alimentos	19
Figura 4. Curva típica de isoterma de adsorción de humedad en alimentos.	21
Figura 5. Influencia de la actividad de agua en diversos procesos de deterioro de los alimentos.	24
Figura 6. Relación de la variable dependiente con las variables independientes.	33
Figura 7. Equipo experimental de laboratorio para deshidratación	36
Figura 8. Muestra de la Arracacha fresca y las rodajas	37
Figura 9. Dispositivo experimental para determinar la isoterma de adsorción.	39
Figura 10. Curvas de deshidratación de la arracacha: Efecto de la temperatura (60°C Y 70°C), para velocidad de aire 5 m/s y espesor de rodaja 4 mm.	41
Figura 11. Curvas de deshidratación de la arracacha: Efecto del espesor de rodajas (4 mm y 9 mm), a 60°C y velocidad de aire 2 m/s.	42
Figura 12. Curvas de deshidratación de la Arracacha: Efecto de velocidad de aire (2 m/s y 5 m/s), a 70°C y espesor de rodaja de 4 mm.	43
Figura 13. Comparación de las curvas experimentales de isotermas de adsorción de Arracacha deshidratada a 20°C y 35°C	45
Figura 14. Comparación de Isoterma experimental con el modelo B.E.T. a 20°C.	46
Figura 15. Comparación de la curva Isoterma experimental con el modelo Henderson a 20°C.	47



Figura 16.	Comparación de la curva de Isotherma experimental con el modelo Caurie a 20°C	48
Figura 17.	Comparación de Isotherma experimental con el modelo Oswin a 20°C	49
Figura 18.	Comparación de la Curva de Isotherma experimental con el modelo G.A.G. a 20°C	50
Figura 19.	Comparación de la curva de Isotherma experimental con el modelo Halsey. a 20°C	51
Figura 20.	Comparación de la curva de Isotherma experimental con los modelos de BET, Henderson, Caurie Oswin, GAB, Halsey a 20°C	52
Figura 21.	Comparación de la curva de Isotherma experimental con el modelo B.E.T. a 35°C	53
Figura 22.	Comparación de la curva de Isotherma experimental con el modelo Henderson. a 35°C	54
Figura 23.	Comparación de la curva de Isotherma experimental con el modelo Caurie. a 35°C	55
Figura 24.	Comparación de la curva de Isotherma experimental con el modelo Oswin. a 35°C	56
Figura 25.	Comparación de la curva de Isotherma experimental con el modelo GAB. a 35°C	57
Figura 26.	Comparación de la curva de Isotherma experimental con el modelo Halsey a 35°C..	58
Figura 27.	Comparación de la curva de Isotherma experimental con los modelos BET, Henderson, Caurie, Oswin, GAB y Halsey a 35°C.	59



## RESUMEN

La importancia del agua y su presencia en los alimentos, ha suscitado mucho interés en diversos aspectos relacionados con la industria alimentaria. El propósito de este trabajo fue encontrar la cinética e isoterma de adsorción en procesos de deshidratación de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza B.*) en rodajas. Se construyó un deshidratador de laboratorio en el que se llevaron a cabo pruebas de deshidratación a condiciones de temperatura de 60°C y 70°C, para espesores de rodajas de 4 mm y 9 mm y velocidades de aire 2 m/s y 5 m/s. Para encontrar las isotermas de adsorción se utilizaron el método gravimétrico estático a una humedad relativa controlada. Los datos experimentales se ajustaron mediante modelos matemáticos de BET, Henderson, Caurie, Oswin, GAB y Halsey. La bondad de ajuste de los pronósticos se midió mediante el coeficiente de regresión ( $R^2$ ) y el porcentaje de error medio relativo (%E). El modelo de Caurie ajustaron de mejor manera los datos experimentales, donde la humedad de seguridad que proporcionaría la máxima estabilidad al alimento deshidratado durante el almacenamiento ( $\tau_s$ ) y el parámetro característico de la de cada producto (R) no presentan dependencia de la temperatura.

**Palabras clave:** Arracacha, zanahoria blanca, actividad de agua, isoterma de adsorción, humedad de equilibrio, deshidratación.



## ABSTRACT

The importance of water and its presence in food has generated a lot of interest in various aspects related to the food industry. The purpose of this work was to find the kinetics and isotherm of adsorption in dehydration processes of sliced arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* B.). A laboratory dehydrator was built in which dehydration tests were carried out at temperature conditions of 60 ° C and 70 ° C, for slice thicknesses of 4 mm and 9 mm and air speeds of 2 m / s and 5 m / s. To find the adsorption isotherms, the static gravimetric method was used at a controlled relative humidity. The experimental data were fitted using mathematical models by BET, Henderson, Caurie, Oswin, GAB, and Halsey. The goodness of fit of the forecasts was measured by the regression coefficient ( $R^2$ ) and the percentage of relative mean error (% E). The Caurie model better adjusted the experimental data, where the safety humidity that would provide maximum stability to the dehydrated food during storage ( $a_w$ ) and the characteristic parameter of each product ( $R$ ) do not present temperature dependence.

**Keywords:** Arracacha, white carrot, water activity, adsorption isotherm, equilibrium humidity, dehydration.



## INTRODUCCIÓN

La arracacha (*Arracacia xanthorrhiza B*) conocida también como zanahoria blanca, es una hortaliza andina, uno de los alimentos nativos cultivada principalmente por su raíz reservante que es de sabor agradable y su inclusión en la dieta alimentaria de la población, como parte de nuestra cultura, costumbres e historia. La agricultura andina, que fue el sustento del desarrollo de las culturas prehispánicas, esto se ha mantenido en el tiempo gracias a la sabiduría y labor del hombre del campo, a través de la tecnología ancestral ha hecho perdurar especies que hoy asombran al mundo.

La arracacha es un alimento sostenible, pero es altamente inestable al deterioro físico, químico, bioquímica y microbiológico. Su composición lo hace muy apropiado para las reacciones causantes de la degradación y al desarrollo microbiano; generalmente a medida que el contenido de humedad o actividad de agua (aw) es más alto, está expuesto a un mayor nivel de degradación y proliferación de microorganismos. Para conservarlas se requiere optar mejor tecnología y apropiadas entre ellas la deshidratación, la cual asegure el procesamiento para integrar la producción y la industrialización, con lo cual se contribuiría con el desarrollo agroindustrial, tan requerido para darle valor agregado a nuestras materias primas y mejores condiciones de vida a los involucrados en el proceso productivo.

La arracacha como alimento se puede colocar en un puesto privilegiado, ya que es de bajo costo y de una calidad nutricional comparable con la papa y la yuca (Hurtado, J. 1997). Teniendo en cuenta lo anterior, es importante buscar alternativas mejores para su conservación, alargando su vida de anaquel sin que el producto deshidratado pierda propiedades alimenticias en gran proporción, debido a que su consumo es muy popular en las zonas frías del Perú y los andes de sur América, pero poco conocido en zonas urbanas gracias a su alta perecibilidad después de ser cosechado.

Por otra parte, son muy pocos los trabajos sobre la arracacha. Debido a su condición de producto altamente perecedero, tiene una corta vida útil (máximo de 6 días) lo cual dificulta su almacenamiento por un tiempo prolongado en condiciones ambientales y presenta daños por conservación a bajas temperaturas (Seminario, J. 1999).



Por lo expuesto, una de las formas de prolongar la vida útil de esta raíz es por medio de la operación de deshidratación, con su estudio experimental se determina los parámetros óptimos para la reducción de la pérdida de cosecha, definir un ambiente difícil para el crecimiento microbiano, reducir el costo de transporte y almacenamiento por la disminución del peso y volumen de los productos

En este sentido el presente trabajo tiene por objetivo obtener los parámetros de la cinética de deshidratación de la arracacha y la modelación de la isoterma de adsorción a diferentes temperaturas, manteniendo en gran parte la calidad del producto alimenticio, más allá de lo económico y lo comercial, tiene relevancia social y cultural para nuestros campesinos, que hacen posible el sustento vital de la población.



## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 Descripción de la realidad problemática.

La Arracacha (*Arracacia xanthorrhiza B.*) es conocido con el nombre de apio blanco en Venezuela, zanahoria blanca en Ecuador, virraca en Colombia. Esta hortaliza se cultiva por su raíz que es de sabor agradable y de fácil digestibilidad, ya que posee un almidón muy fino y otras propiedades alimenticias. Su cultivo de la arracacha hace parte de la cultura de los pueblos de la región andina por tiempos inmemoriales transmitidos de generación en generación, hasta que hoy en día su cultivo es de interés agroindustrial. Su principal inconveniente es su corta vida de almacenamiento en fresco (de 6 días) y su vulnerabilidad a sufrir daños durante el transporte. Para incentivar al sector productivo y aumentar su competitividad, es necesario impulsar la investigación tecnológica de esta raíz, generando nuevo conocimiento, con el objetivo de ofrecer nuevas técnicas agrícolas, la ingeniería de procesos que es un conjunto de disciplinas que tienen que ver con la cadena productiva de esta materia prima de producción o cosecha anual y estacional. Por lo expuesto, una buena alternativa tecnológica es la deshidratación, operación para eliminar la humedad, facilita el transporte y costos de almacenamiento y, puede ser consumida en épocas de carencias o escases y en cualquier lugar.

Los resultados de este trabajo pretenden apoyar a los profesionales de la industria alimentaria, para los estudiantes de ingeniería de alimentos, ciencia y tecnología de alimentos y a los agricultores mejoren su condiciones económicas y nutricionales.



## **1.2 Formulación del problema.**

### **1.2.1 Problema general:**

Es posible determinar experimentalmente el modelo cinético e isoterma de adsorción en la deshidratación de Arracacha (*Arracacia xanthorrhiza B.*).

### **1.2.2 Problemas específicos:**

- Como evaluar el mecanismo y la cinética de la deshidratación de Arracacha.
- Es posible determinar la isoterma de adsorción de la Arracacha deshidratada.
- Es posible establecer el modelo cinético e isoterma de adsorción en la deshidratación de la Arracacha.

## **1.3 Objetivos:**

### **1.3.1 Objetivo general**

- Determinar el modelo cinética e isoterma de adsorción en la deshidratación de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza B.*).

### **1.3.2 Objetivos específicos:**

- Presentar el mecanismo y la cinética de deshidratación de arracacha
- Determinar la isoterma de adsorción de arracacha deshidratada.
- Definir experimentalmente el modelo cinético e isoterma de adsorción en la deshidratación de arracacha.

## **1.4 Limitantes de la investigación.**

La limitación de esta investigación es la no existencia de una Norma Técnica Peruana referente a raíces y hortalizas deshidratadas, para





contrastar los resultados nutricionales de los productos finales. obtenidos, sobre las condiciones óptimas de procesamiento en toda la cadena productiva. Hay abundante información teórica, manuales y técnicas sobre deshidratación experimental de hortalizas y de otros alimentos sólidos.

Se cuenta con el equipo experimental de diseño propio, es un secador intermitente de bandejas con circulación de aire por convección, móvil y versátil dotado con sistema de control de variables (temperatura y velocidad de aire) a voluntad del investigador. La Facultad de Ingeniería Química cuenta con un laboratorio de Química de Alimentos y otro laboratorio para: Investigación, Desarrollo e innovación, en estos ambientes se desarrolló el presente proyecto.



## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes.

Jiménez, F. (2005), menciona que la Arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* B.) es la planta cultivada más antiguo de América, así mismo el área de cultivo más importante se encuentra ubicada en Colombia y con frecuencia se ha asumido que es nativa de ese país. Además, Colombia es el país donde se cultiva en forma más intensa y donde se conoce mayor variación.

Quincho, T. y Ore, V. F. (2015), señalan que los resultados de un estudio en el que se utilizó la arracacha especie amarilla (*Arracacia xanthorrhiza* B.), hortaliza con importancia en la alimentación por su fácil digestión de sus almidones compuesta de calcio, fósforo, hierro, niacina, vitamina A, piridoxina-B6, riboflavina-B2, ácido ascórbico, proteínas, fibras y carbohidratos.

Basso, N., et al, (2016), proponen sobre las pérdidas y desperdicios de alimentos para despertar el interés y propiciar sistemas agroalimentarios más eficientes, sostenibles e inclusivos; que se traduzcan en una producción de excelente calidad, y que impulsen el consumo de alimentos responsable. Perder y despreciar alimentos significa un costo ambiental, un costo económico y por sobre todo un costo ético.

CIP. (2000), Centro Internacional de la Papa, señala que, actualmente la arracacha es cultivada a lo largo de la cordillera de Los Andes, desde Venezuela hasta el norte de Chile y noroeste de Argentina. Se puede cultivar con mejor desarrollo entre 1800 a 2500 metros sobre el nivel del mar (msnm). Los investigadores del CIP, calculan que unas 30000 hectáreas se dedican al cultivo de la Arracacha en América del Sur y América Central. Además, citan que la Arracacha es más conocida por sus raíces, ninguna parte de esta planta queda sin aprovecharse. Los tallos y las hojas se usan como alimento para animales, que tienen su



alto contenido de oxidantes, también se usan en muchas aplicaciones medicinales tradicionales.

Martínez, E.; Lira, L. (2010), todos los alimentos contienen agua en mayor o menor proporción. El agua se encuentra en los alimentos en dos formas: agua libre y agua ligada. El agua libre es la forma predominante, se libera con facilidad por evaporación o por secado. El agua ligada esta combinada o unida en alguna forma química a las proteínas y a las moléculas de sacáridos y adsorbida en la superficie de las partículas coloides. Sin embargo, en algunas ocasiones, es difícil determinar con exactitud y precisión la cantidad de agua de un alimento Fito Pedro, (2001), conceptualiza que La deshidratación es probablemente el método más antiguo y de uso más frecuente en la conservación de alimentos. Actualmente es una técnica versátil y muy extendida en la industria alimentaria, así como un tema de interés continuo en la investigación de alimentos. El término deshidratación se refiere a la eliminación de la humedad de un material con el objetivo primordial de reducir la actividad microbiana y el deterioro del producto. Ikhu-Omoegbe, (2006), sugieren que la vida útil de productos empacados está influenciada por la temperatura y la humedad relativa de almacenamiento y por lo tanto, de la humedad relativa de equilibrio (HRE) que lo rodea al producto. Manifiesta también que la contaminación microbiana y el deterioro físico-químico de productos están influenciados por la actividad de agua ( $a_w$ ).

## **2.2. Bases teóricas:**

### **2.2.1. La Arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* B.)**

*La Arracacha* es también conocida como apio criollo, zanahoria blanca es una planta alimenticia, originaria de los andes entre 600 y 2500 msnm. cultivada principalmente en el Perú, Bolivia, Colombia, Ecuador, Venezuela y Costa Rica. La parte comestible, el tubérculo es rico en nutrientes que proporciona diversos



beneficios a la salud. Por tanto, se busca enfocar la importancia de este tubérculo como fuente de alimentación del poblador andino. La presentación completa de esta planta se muestra en la figura 1.

**Figura 1.**

*Tubérculo fresco de la Arracacha “Arracacia xanthorrhiza B.”.*



Fuente: Soto (2004).

El valor nutritivo de esta raíz se muestra en la Tabla 1, el comparativo químico proximal entre la arracacha blanca, amarilla y morada con la yuca y papa.



**Tabla 1.**

*Aporte nutricional de la arracacha comparada con yuca y papa por cada 100 g de producto.*

Componentes	Arracacha			Papa	Yuca
	Blanca	Amarilla	Morada		
Valor energético (cal)	104.00	97.00	102.00	103.00	161.00
Humedad (%)	73.00	75.10	73.40	73.20	59.00
Proteína (g)	0.80	0.70	0.80	2.00	0.60
Grasa (g)	0.20	0.30	0.20	0.40	0.02
Carbohidratos (g)	24.90	22.90	24.40	23.30	39.10
Fibra (g)	0.60	1.10	1.00	0.70	0.90
Calcio (mg)	29.00	27.00	26.00	6.00	35.00
Fosforo (mg)	58.00	50.00	52.00	52.00	62.00
Hierro (mg)	1.20	1.10	0.90	0.40	0.40
Tiamina (mg)	0.06	0.09	0.07	0.07	0.03
Riboflavina (mg)	0.04	0.08	0.06	0.06	0.04
Niacina (mg)	3.40	2.84	2.80	1.85	0.66
Ácido ascórbico (mg)	28.00	27.10	23.00	9.00	36.30

**Fuente:** Jiménez, 2005

La Arracacia xanthorrhiza, es una raíz poco conocida científicamente, pero reconocida en la mayoría de los países latinoamericanos y de las regiones andinas por representar un alimento tradicional, consumido hervido en agua con otros tubérculos y hortalizas. Desde el punto de vista nutricional, aporta calorías, fibra y minerales principalmente calcio, fósforo, magnesio, hierro (Jiménez, 2005). La harina y almidón de esta raíz presentan propiedades funcionales y reológicas que permite diseñar una variedad de productos atractivos al consumidor como, por ejemplo, las mezclas en polvo para preparar sopas instantáneas, proveen los requerimientos mínimos para disminuir los problemas de la nutrición a corto plazo (Seminario, 2000).

La Universidad Nacional de Cajamarca (2013), destacan que, aunque la arracacha es poco reconocida científicamente, representa un alimento tradicional, con importantes valores nutricionales, aportando



calorías, fibra y minerales. Mencionando además que posee apreciables contenidos de potasio 2,13%, hierro 139,5 ppm, vitamina C 13 mg/100 g de materia fresca; 27,78 equivalentes de retinol (ER) en provitamina A, 27,28 en 100 g de materia fresca. La recomiendan para niños que empiezan a consumir alimentos sólidos, para ancianos, convalecientes, etc. Además, es un producto ecológicamente sano, en cuya producción no se usa fertilizantes ni pesticidas.

### **2.2.2 La deshidratación:**

Generalmente, se entiende por deshidratación la operación mediante la cual se elimina total o parcialmente el agua de la sustancia que lo contiene, aplicando calor bajo condiciones controladas. En la actualidad puede afirmarse que la deshidratación es una operación unitaria de separación plenamente desarrollada y con unos fundamentos teóricos bien establecidos, tanto para la deshidratación de productos de procedencia química, biológicos y alimenticios.

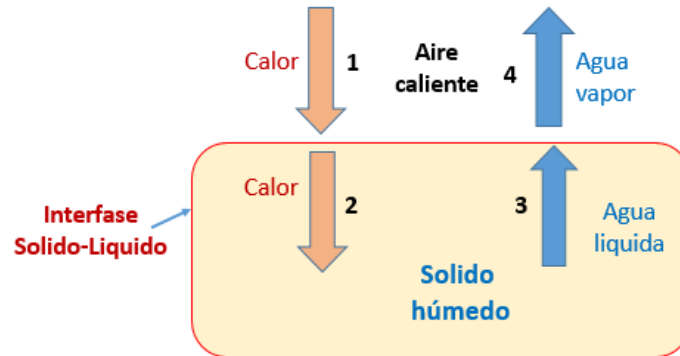
En el caso de alimentos húmedos, el proceso de deshidratación se esquematiza en la figura 2, en la cual se visualizan involucradas los factores de fenómenos de transporte de calor y masa simultáneamente que han sido estudiadas en esta investigación.

En estos últimos años, la deshidratación es una de las operaciones de conservación de alimentos más ampliamente utilizados en la elaboración de productos, ya sean intermedios o finales, siendo un rubro de mucha importancia económica dentro de la agroindustria por la gran demanda y aceptación que tienen los productos deshidratados.



## Figura 2

Esquema de transferencia de calor y masa durante la deshidratación



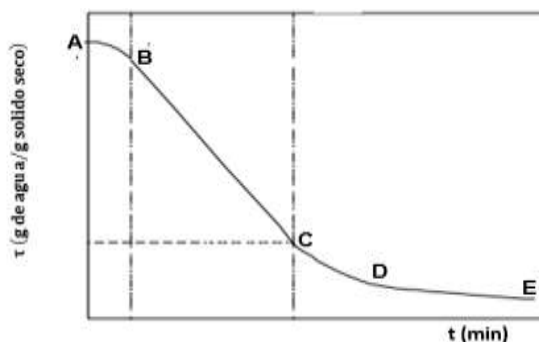
### 2.2.3. Mecanismo y la cinética de la deshidratación.

Cuando se coloca un producto sólido húmedo en contacto con una corriente de aire caliente y se mantienen constantes la temperatura, humedad, velocidad y dirección de flujo sobre el sólido de dicha corriente de aire, se logrará deshidratar el sólido.

Si el cambio en el contenido de humedad del producto (expresado en base seca: **g agua/g de sólido seco**). Se va registrando a intervalos pequeños de tiempo durante todo el proceso de deshidratación, pueden obtenerse, según el dato graficado, la curva que se muestra en la Figura 3.

## Figura 3

Curva típica de deshidratación de alimentos.



En dichas curvas pueden distinguirse varias etapas del proceso de deshidratación:

**Etapas AB.** Periodo de estabilización de las condiciones, es decir, la superficie de sólido se equilibra con el aire de deshidratación y alcanza su temperatura de evaporación.

**Etapas BC,** Periodo de velocidad constante, en el que ocurre buena parte de la deshidratación y la pérdida de humedad es directamente proporcional al tiempo.

**Etapas CD,** primer periodo de velocidad decreciente.

**Etapas DE,** segundo periodo de velocidad decreciente. En ambas etapas la humedad del alimento disminuye menos rápido que en la etapa BC para incrementos de tiempo iguales.

**El punto C** es el límite entre la etapa de velocidad constante y la de velocidad decreciente. La humedad para la cual se aprecia este límite se denomina **humedad crítica**.

La cinética del proceso de deshidratación por aire depende de la geometría y espesor del producto como de las propiedades del aire caliente, como son la humedad relativa ambiental, temperatura y velocidad de flujo de aire, por lo que para la deshidratación de alimentos frutas y hortalizas es recomendable utilizar temperaturas entre 40 – 80°C (Fito, P. 2001).

#### **2.2.4. Isotherma de adsorción y actividad de agua ( $a_w$ )**

**a). La isoterma de adsorción** en los alimentos representan las propiedades higroscópicas integradas de muchos componentes cuyas propiedades de adsorción pueden cambiar debido a las interacciones físicas y químicas causadas por el calor u otros pre-tratamientos (Díaz, R., 2008).





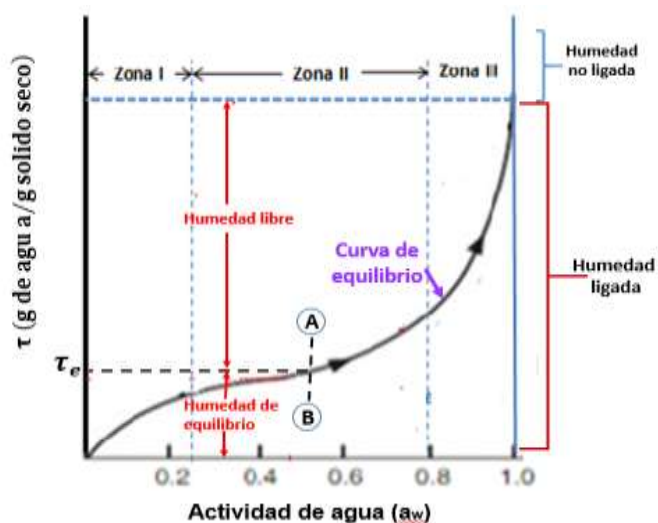
Los alimentos rara vez se deshidratan hasta su contenido de humedad de equilibrio (HE), ya que en este punto el alimento se encuentra demasiado ávido de agua y cualquier cambio en el medio ambiente circundante (temperatura y/o humedad) puede provocar una adsorción indeseable de agua por parte del alimento.

En la Figura 4, se encuentra representada una curva de equilibrio. En ella se observan dos puntos **A** y **B**, que se encuentran por encima y por debajo de la curva de equilibrio. Si se tuviera un sólido ubicado en el punto **A** respecto de su curva de la curva de equilibrio, este perdería agua, y al cabo de algún tiempo su humedad sería la del ambiente que lo rodea. Análogamente, si se encontrara en el punto **B**, ganaría agua hasta alcanzar también la humedad correspondiente al equilibrio, lo que se conocen como **equilibrio higroscópico**. En ambos casos la humedad y la temperatura del aire, se mantienen constantes.

La curva de equilibrio, es de una importancia fundamental en el estudio de un proceso de deshidratación de alimentos y en el mantenimiento de la estabilidad del producto durante el almacenamiento.

**Figura 4**

*Curva típica de isoterma de adsorción de humedad en alimentos.*



Con fines didácticos en la Figura 4 se delimitan en tres zonas hipotéticas que ubican el agua en un producto; la que integra la **Zona III** se considera libre; se encuentra en macrocapilares; forma parte de las soluciones que disuelven las sustancias de bajo peso molecular; es la más abundante y fácil de congelar y evaporar, y su eliminación reduce la actividad acuosa,  $a_w$  a 0.8. En la **Zona II** el agua se localiza en diferentes capas más estructuradas y en micro capilares; es más difícil de quitar que la anterior, pero al lograrlo se obtienen valores de  $a_w$  de aproximadamente 0.3. Finalmente, El agua en la **Zona I** representa la capa monomolecular BET, es más difícil de eliminar en los procesos térmicos comerciales de deshidratación

También en la Figura 4 observan dos tipos de humedad en el alimento como **Humedad no ligada**, para la  $a_w = 1$ , se dice que el alimento contiene esencialmente agua libre. Este es el caso de los productos biológicos muy húmedos, excepto aquellos muy ricos en materia soluble. Durante la deshidratación el agua se comporta como si estuviera pura. y la otra es la **Humedad libre**, para la  $a_w < 1$ , se dice que el producto contiene agua ligada. La separación de esta agua es más difícil ya que la presión de vapor que ella ejerce es más baja que la que ejercería si estuviera pura. La humedad libre sería el único disponible para el crecimiento de los microorganismos y para intervenir en las otras transformaciones, ya que la humedad ligada, está unido a la superficie sólida y no actúa por estar “no disponible o inmóvil”.

**b). La actividad de agua ( $a_w$ )** es un parametro que indica la disponibilidad de agua en un alimento para que existan reacciones químicas, bioquímicas, reacciones enzimáticas y desarrollo microbiano (Badui, 2006). La  $a_w$  es una medida cualitativa de la disponibilidad de agua líquida en un sistema, es decir, la cantidad de agua libre que puede reaccionar. Se define como la relación entre la presión de vapor que ejerce el agua del alimento en la interfase sólido-gas ( $P$ ) y la presión de vapor del agua pura ( $P^0$ ) a una misma temperatura.



$$a_w = \frac{p}{p^o} = \frac{HR}{100} = \frac{M_a}{M_a + M_s} \quad (1)$$

Donde:

HR = humedad relativa.

$M_a$  = moles de agua (g/18)

$M_s$  = moles de soluto (g/pm).

En el equilibrio, la actividad de agua del alimento se iguala a la humedad relativa del ambiente en el cual se encuentra. En estas condiciones, el alimento no gana ni pierde agua.

La  $a_w$  tiene un valor máximo de 1 y un valor mínimo de cero (0). Cuanto más cercano a cero es este valor, mejor se conservará el producto alimenticio.

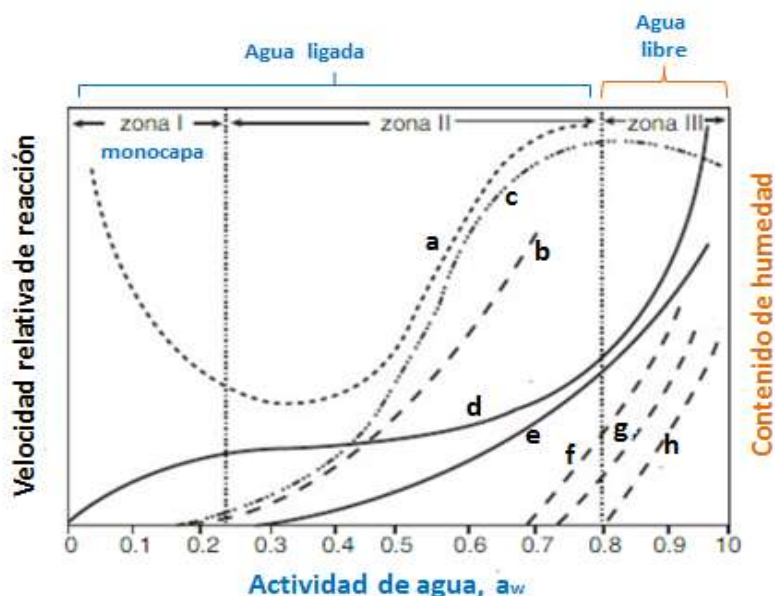
A pesar de lo manifestado, la actividad de agua se sigue utilizando por sus beneficios prácticos. Por tal motivo la FDA de los Estados Unidos y la Comunidad Económica Europea, la usan para categorizar la seguridad de los alimentos (Badui, 2006).

Por lo dicho, la actividad de agua ( $a_w$ ) es un parámetro de gran utilidad para expresar la susceptibilidad de los alimentos a las diversas reacciones de deterioro. Para efectos estrictamente didácticos y con datos muy generales, se ha elaborado la figura 5, en la que aprecian tres zonas hipotéticas en las que se puede dividir el agua contenida en un producto alimenticio.



## Figura 5

*Influencia de la actividad de agua en diversos procesos de deterioro de los alimentos.*



Nota: a) Oxidación de lípidos; b) Reacciones hidrolíticas; c) Oscurecimiento no enzimático; d) Isotherma de adsorción; e) Actividad enzimática; f) Crecimiento de hongos; g) Crecimiento de levaduras y h) Crecimiento de bacterias.

Fuente: Badui, 2006.

### 2.3. Conceptual:

Definiendo algunos conceptos involucrados con la presente investigación:

**El agua del alimento**, el agua contenida en un alimento está más o menos disponible para participar en las reacciones químicas, microbiológicas y deterioro del alimento. Esta disponibilidad varía de un producto a otro según su composición, algunas estructuras o moléculas retienen más agua que otras; varía incluso para un mismo

producto, un fruto maduro no se comporta de la misma forma que un fruto verde.

**Secado**, reducción del contenido de agua de los alimentos mediante evaporación de la misma, utilizando las condiciones ambientales naturales de la energía solar.

**Deshidratación**, se entiende por deshidratación la operación mediante la cual se elimina total o parcialmente el agua del alimento que lo contiene, aplicando calor artificial bajo condiciones controladas. En la actualidad puede afirmarse que la deshidratación es una operación unitaria de separación plenamente desarrollada y con fundamentos teóricos bien establecidos, tanto para la deshidratación de productos de procedencia química, biológicos y alimenticios.

#### **Expresiones para calcular la humedad:**

El contenido de humedad es una magnitud que expresa la cantidad de agua en un material sólido y se puede representar en términos de una base de masa seca o de una base de masa húmeda. Aunque ambas expresiones representan el contenido de humedad de una muestra, sus valores numéricos son distintos, por lo que, al expresar el contenido de humedad sin indicar la base de masa, se puede incurrir en un error de interpretación.

Debido a que la mayoría de los materiales sólidos están constituidos de materia seca y agua, se puede establecer que la masa total ( $m_h$ ) del material es igual a la suma de su masa seca ( $m_s$ ) y de su masa de agua ( $m_{H_2O}$ ).

$$m_h = m_s + m_{H_2O} \quad (2)$$

**Contenido de humedad en base húmeda:** Es el cociente entre la masa de agua dentro del material y su masa total.

$$\tau_{bh} = \frac{m_{H_2O}}{m_h} \times 100 \quad (3)$$



**Contenido de humedad en base seca:** Es el cociente entre la masa de agua en el material y su masa seca.

$$\tau_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_s} \times 100 \quad (4)$$

En materiales sólidos en los que hay absorción o evaporación de agua la masa de agua cambia, sin embargo, su masa seca se mantiene constante.

**Propiedades físicas del producto,** especialmente tamaño, geometría y dimensiones de la partícula (muestra), sus cambios micro estructurales, la evolución de los parámetros de calidad (color, sabor, textura) durante el secado.

**La temperatura de aire:** Cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre el medio de calentamiento y el alimento, mayor será la velocidad de transferencia de calor.

**Velocidad del aire:** el aire en movimiento absorbe el vapor de agua de la superficie del alimento, previniendo así la creación de atmósfera saturada. La velocidad del aire actúa aumentando los coeficientes globales de transferencia de materia y de calor, al disminuir el espesor de la capa límite, lo que disminuye el tiempo de secado de los alimentos.

**Humedad relativa del aire (HR):** el aire seco tiene el poder de absorber y retener la humedad. Cuando más seco esté, mayor será la velocidad del proceso de deshidratación. Sin embargo, debido a la complejidad del proceso de deshidratación, no existe una teoría generalizada que explique el mecanismo de transferencia de humedad interna, que es el paso limitante de la velocidad.



## 2.4. Definición de términos básicos:

### 2.4.1. Medición del valor de actividad de agua ( $a_w$ ).

La  $a_w$  puede ser estimada midiendo la presión de vapor, la presión osmótica, el descenso crioscópico, evaluaciones psicrométricas (punto de rocío y depresión de bulbo húmedo), potencial de succión o usando el método de isopiético, equilibrio bitérmico, higrómetros eléctricos y de cabello (Barbosa-Canavás, et al, 2000).

En este trabajo, la  $a_w$  se determina a partir del contenido de humedad de la muestra en equilibrio, bajo condiciones preestablecidas, con soluciones salinas saturadas de  $a_w$  conocida usado como referencia. Dentro de los métodos sencillos de determinación, el **método gravimétrico** basadas en la determinación del contenido de humedad relativa de las soluciones de sales en frascos herméticamente cerrados a una temperatura, después de que esta ha alcanzado el equilibrio con una atmósfera de humedad relativa conocida.

La selección de estas soluciones salinas y las ecuaciones correspondientes para calcular la  $a_w$  a la temperatura de experimentación se exponen en la siguiente tabla 1.

**Tabla 2.**

*Ecuaciones para obtener la  $a_w$  en soluciones saturadas de sales en función de la temperatura.*

Solución salina de:	Formulación Química	Ecuación
Cloruro de litio	LiCl	$\ln a_w = (500.95 \times 1/T) - 3.85$
Cloruro de magnesio	MgCl <sub>2</sub>	$\ln a_w = (30.335 \times 1/T) - 2.13$
Carbonato de potasio	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	$\ln a_w = (145.00 \times 1/T) - 1.30$
Nitrato de magnesio	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	$\ln a_w = (356.60 \times 1/T) - 1.82$
Nitrato de sodio	NaNO <sub>2</sub>	$\ln a_w = (435.96 \times 1/T) - 1.88$
Cloruro de sodio	NaCl	$\ln a_w = (228.92 \times 1/T) - 1.04$
Sulfato de amonio	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	$\ln a_w = (154.75 \times 1/T) - 0.689$
Cloruro de potasio	KCl	$\ln a_w = (367.53 \times 1/T) - 1.39$
Cloruro de bario	BaCl <sub>2</sub>	$\ln a_w = (165.61 \times 1/T) - 0.6617$



## 2.4.2. Modelamiento matemático.

Es de interés para el investigador disponer de diferentes modelos matemáticas que permitan reproducir con mayor o menor grado de aproximación la relación  $\tau = f(a_w)$  y calcular los valores de algunos parámetros que nos informen a cerca de las condiciones de máxima estabilidad del alimento durante su conservación.

A continuación, citaremos los modelos más utilizados:

**a). Modelo de Brunauer, Emmet y Teller (BET)**, fue el primer modelo que tuvo mayor aplicación en la adsorción de agua en alimentos. El modelo propuesto es:

$$\tau_e = \frac{\tau_m \cdot c \cdot a_w}{(1 - a_w)(1 + (c - 1) \cdot a_w)} \quad (5)$$

Linearización del modelo B.E.T.:

$$\frac{a_w}{(1 - a_w) \tau_e} = \frac{1}{\tau_m \cdot c} + \frac{c - 1}{\tau_m \cdot c} a_w \quad (6)$$

**b). Modelo de Henderson**, (Henderson, 1952). Existen diferentes formas de expresar la ecuación de este modelo, que es preciso citar debido a su amplia utilización en tecnología de alimentos. Una de sus expresiones es:

$$\tau_e = 0,01 \left( \frac{(-\ln(1 - a_w))}{(c(273 + t))} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

Linearización del modelo Henderson:

$$\ln \left( \ln \left( \frac{1}{1 - a_w} \right) \right) = \ln(c(273 + t)) + n \cdot \ln(100 \cdot \tau_e) \quad (8)$$





**c). Modelo de Caurie, (1971).** Este modelo suele dar buenos resultados para muchos alimentos en el intervalo  $a_w = 0 - 0.85$ . La ecuación propuesta es:

$$\tau_e = \exp\left(a_w \cdot \ln R - \frac{1}{4,5 \cdot \tau_s}\right) \quad (9)$$

Linearización del modelo Caurie:

$$\ln \frac{1}{\tau_e} = \frac{1}{4,5 \cdot \tau_s} - \ln R \cdot a_w \quad (10)$$

**d). Modelo de Oswin, (1946).** Esta es una ecuación puramente empírica, cuya buena capacidad de ajuste es sorprendente en relación con su escasa utilización. La ecuación empírica propuesta es:

$$\tau_e = A \cdot \left(\frac{a_w}{1-a_w}\right)^B \quad (11)$$

Linearización del modelo Oswin:

$$\ln \tau_e = \ln A + B \cdot \ln \left(\frac{a_w}{1-a_w}\right) \quad (12)$$

**e). Modelo de Anderson, de Boer y Guggenheim (G. A. B., 1981),** Está basado en un modelo cinético, es reconocido como el más versátil y ampliamente utilizado, con resultados satisfactorios para un gran número de productos alimenticios (Flores, 2008). GAB presenta el modelo siguiente:

$$\tau_e = \frac{\tau_m \cdot c \cdot K \cdot a_w}{(1-K \cdot a_w)(1-K \cdot a_w + c \cdot K \cdot a_w)} \quad (13)$$

Linearización del modelo G.A.B. :

$$\frac{a_w}{\tau_e} = \frac{1}{\tau_m \cdot c \cdot K} + \frac{c-2}{\tau_m \cdot c} a_w + \frac{K(1-c)}{\tau_m \cdot c} a_w^2 \quad (14)$$



f). **Modelo de Halsey (1948)**, esta ecuación teórica, desarrollada a partir de la ecuación de B. E. T., es muy versátil y se ajusta muy bien en el intervalo de  $a_w = 0.1 - 0.8$ .

$$\tau_e = \left( \frac{A}{\ln\left(\frac{1}{a_w}\right)} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (15)$$

Linearización del modelo Halsey:

$$\ln \tau_e = \frac{\ln(A)}{B} - \frac{1}{B} \ln \left( \ln \left( \frac{1}{a_w} \right) \right) \quad (16)$$

Dónde:

$\tau_e$ : Humedad del producto en equilibrio (g de agua /g. Sólido seco).

$\tau_m$ : Humedad del mono capa del modelo de B. E.T. y GAB.

$a_w$ : Actividad de agua.

C: Constante característica del producto de los modelos de BET y GAB.

K: Factor de corrección del modelo GAB.

n: Parámetro característico del producto del modelo de Henderson.

A y B: son dos parámetros que dependen del producto, en los modelos de Oswin y de Halsey.

t: Temperatura del sistema en equilibrio, °C.

$\tau_s$ : Humedad de seguridad que proporcionaría la máxima estabilidad al alimento deshidratado durante el almacenamiento.

R: Parámetro característico de cada producto, en el modelo de Caurie.



### 2.4.3. Métodos estadísticos para estimar los parámetros de los modelos:

Los valores de los parámetros de los diferentes modelos utilizados en esta investigación se han calculado agrupando adecuadamente las variables que aparecen en las ecuaciones, de forma que uno de los grupos fuese función lineal de otro:

$$g(\tau, a_w) = b_0 + b_1 \cdot h_1(\tau, a_w) + b_2 \cdot h_2(\tau, a_w) + \dots \quad (17)$$

Donde los  $b_i$  son funciones de los parámetros del modelo. En la tabla 3, aparecen las expresiones de los parámetros como una función en cada caso

**Tabla 3**  
*Regresión lineal de los modelos empleados para el ajuste de isotermas de adsorción*

Modelo	g	bo	b1	h1	b2	h2
B.E.T.	$\frac{a_w}{(1-a_w)\tau_e}$	$\frac{1}{\tau_m \cdot C}$	$\frac{C-1}{\tau_m \cdot C}$	$a_w$		
Henderson	$\text{Ln} \left[ \text{Ln} \left( \frac{1}{1-a_w} \right) \right]$	$\text{Ln} [C(273+t)]$	<b>n</b>	$\text{Ln}(100 \cdot \tau_e)$		
Caurie	$\text{Ln} \frac{1}{\tau_e}$	$\frac{1}{4.5\tau_s}$	$-\text{Ln}R$	$a_w$		
Oswin	$\text{Ln}(\tau_e)$	$\text{Ln}(A)$	$B$	$\text{Ln} \left( \frac{1}{1-a_w} \right)$		
G.A.B.	$\frac{a_w}{\tau_e}$	$\frac{1}{\tau_m \cdot C \cdot K}$	$\frac{C-2}{\tau_m \cdot C}$	$a_w$	$\frac{K(1-C)}{\tau_m \cdot C}$	$a_w^2$
Halsey	$\text{Ln} \tau_e$	$\frac{\text{Ln}(A)}{B}$	$-\frac{1}{B}$	$\text{Ln} \left( \text{Ln} \left( \frac{1}{a_w} \right) \right)$		



Los datos experimentales se modelaron con las ecuaciones de: B. E T, Henderson, Caurie, Oswin, GAB y de Halsey, las que se presentan en la tabla 3 y el ajuste de estos fue realizado a través del **análisis de regresión lineal y regresión no lineal**. La calidad del ajuste de los modelos propuestos se evaluó por medio del coeficiente de correlación lineal ( $R^2$ ), el que debe ser superior a 0,90 y evaluadas a través del error relativo promedio porcentual (**%E**) ampliamente utilizado en isotermas de alimentos, calculada utilizando la siguiente expresión:

$$\%E = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|\tau_{ei} - \tau_{ci}|}{\tau_{ei}} \quad (18)$$

Dónde:

$\tau_{ei}$ : Contenido de humedad de equilibrio experimental (g de agua/g solido seco.)

$\tau_{ci}$ : Contenido de humedad de equilibrio calculada a partir de cada modelo en (g de agua/g solido seco)

N: Es el número de datos experimentales.



### III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

#### 3.1. Hipótesis:

##### 3.1.1. Hipótesis General:

- Es posible determinar el modelo cinética e isoterma de adsorción en la deshidratación de la Arracacha (*Arracacia xanthorrhiza B.*).

##### 3.1.2. Hipótesis específicas:

- Es factible evaluar el mecanismo y la cinética de deshidratación de la Arracacha
- Es posible determinar la isoterma de adsorción de la Arracacha deshidratada.
- Es viable construir el modelo cinético e isoterma de adsorción en la deshidratación de la Arracacha.

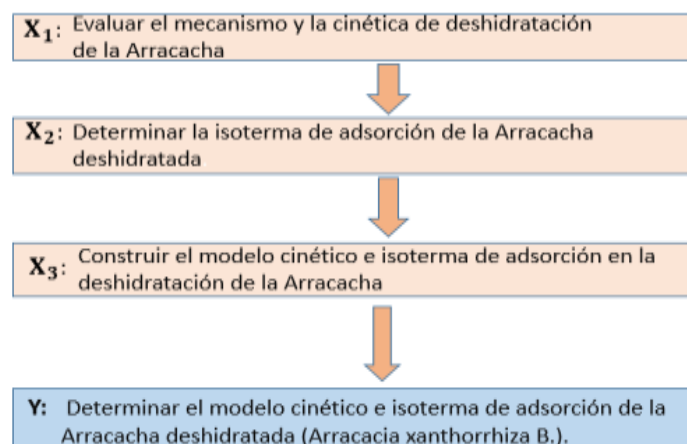
#### 3.2. Definición conceptual de las variables

La relación entre la variable dependiente Y, y las variables independientes  $X_i$  ( $i = 1, 2$  y  $3$ ) del proyecto de investigación, se representa en la siguiente Figura 6.

$$Y = f(X_1, X_2, X_3).$$

**Figura 6**

*Relación de la variable dependiente con las variables independientes.*



### 3.2.1. Operacionalización de la variable:

#### 3.2.1.1. Definición Operacional de la variable:

La definición operacional de las variables de investigación, se presenta en la siguiente tabla 3.

**Tabla 4**

*Operacionalización de las variables de investigación*

<b>Variables dep.</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>indicadores</b>	<b>método</b>
<b>Y:</b> Determinar el modelo cinética e isoterma de adsorción en la deshidratación de la Arracacha ( <i>Arracacia xanthorrhiza B.</i> ).	Humedad relativa. Velocidad de deshidratación Actividad de agua Peso muestra. Temperatura	g de agua/ mss. g de agua/ $a_w$	Método experimental y correlacional  <b>Y = f(X1, X2, X3)</b>
<b>Variables ind.</b>	<b>dimensiones</b>	<b>indicadores</b>	<b>método</b>
<b>X1:</b> Evaluar el mecanismo y la cinética de deshidratación de la Arracacha.	Tamaño y forma Peso. Velocidad de aire Balance de masa Temperatura Concentración	V de aire/m <sup>3</sup> s °C $T_w (m_h/m_s)$	Método experimental correlacional V= f(peso,T,t,HR)
<b>X2:</b> Determinar la isoterma de adsorción de la Arracacha deshidratada.	sales Actividad de agua peso Humedad relativa	g de agua/mss. T (=cte.). Higrómetro	Método gravimétrico Actividad de agua Humedad relativa
<b>X3:</b> Construir el modelo cinético e isoterma de adsorción de la Arracacha.	Parámetros cinéticos y de humedad equilibrio	Validación con modelos teóricos	Correlación y ajuste de parámetros cinéticos



## IV. DISEÑO METODOLÓGICO

### 4.1 Tipo y diseño de la investigación.

#### **Tipo de investigación:**

De acuerdo a la naturaleza de los problemas y objetivos formulados es una investigación tecnológica, experimental, correlacional y operativa, porque propone alternativa de solución y busca un modelado de la cinética de deshidratación y de la isoterma de adsorción de la Arracacha, que mejore las condiciones de procesos y optimice la calidad del producto.

#### **El diseño de la investigación**

- Preparación del equipo de deshidratación, definir las condiciones de operación de deshidratación y control de variables como: temperatura, tiempo, humedad relativa y velocidad del aire.
- Preparación y montaje del sistema experimental para determinar la humedad de equilibrio, con respectivas soluciones salinas saturadas y definir las condiciones de isotermas de adsorción.
- Preparación de muestras de Arracacha. determinación experimental de datos de deshidratación y de humedad de equilibrio. Análisis de la data y tabulación de las mismas
- Correlacionar los datos con las variables con mejor ajuste, tanto para la cinética de deshidratación e isoterma de adsorción.

### 4.2. Método de investigación.

#### **4.2.1 Procedimiento de deshidratación experimental:**

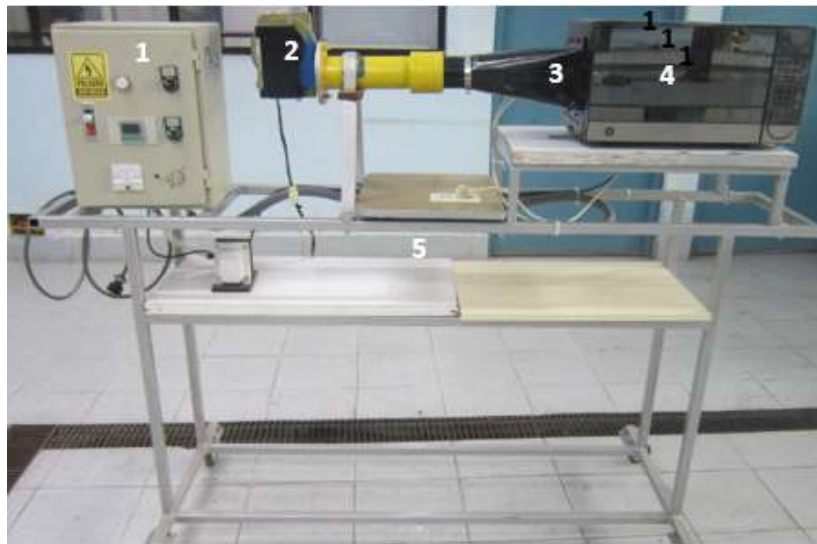
Para el estudio del mecanismo y cinética del proceso de deshidratación se cuenta con secador de diseño propio con las características a un deshidratador industrial, pero a nivel de laboratorio semi automatizado, el cual se muestra en la figura 7,



que permite regular y controlar las variables según requiera el experimentador o investigador.

### Figura 7

*Equipo experimental de laboratorio para deshidratación.*



**Dónde:** 1. Cónsola ordenador con control de temperatura y velocidad de aire; 2. Soplador o ventilador; 3. Sistema de calefacción eléctrica; 4. Cámara de deshidratación con bandeja giratoria y sensor de temperatura (termocupla tipo K); 5. Armazón de altura idóneo sobre ruedas que facilita el trabajo.

### Trabajo experimental

1. Puesta en marcha del deshidratador desde la cónsola, precalentar hasta las condiciones experimentales elegidas o deseadas y mantenerlas constantes durante la prueba a estudiar.
2. Cortar la Arracacha (muestra) en rodajas de espesor uniforme previamente definida
3. Distribuir las rodajas uniformemente sobre la bandeja y anotar el peso inicial.
4. Tomar mediciones de peso de la muestra a intervalos de tiempo previamente definidas. Se sigue con el experimento hasta que





- alcance el contenido de humedad de equilibrio, que se dará después de observar que peso de la muestra casi no cambia.
5. Una vez completadas las etapas anteriores, tomar una muestra del material deshidratado para la determinación de su humedad en una balanza de humedad expresados en base seca (bs), es decir en gramos de agua/ g de solido seco.
  6. Para los otros experimentos cambiar las condicione de operación y continuar con las etapas descritos.
  7. Durante el experimento se reportan los datos para luego ser procesados.
  8. Con los datos experimentales se calcula la humedad

$$\tau = \frac{g \text{ de agua}}{g \text{ de solido seco}} = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \quad (12)$$

La materia prima o muestra es la Arracacha fresca sanas y limpias, se preparó en rebanadas o rodajas con diferentes espesores, deshidratados en función del tiempo y a temperatura preestablecidas y mantenidas constantes todo el proceso, a dos espesores de rodajas y a dos velocidades de aire: reportando, en cada caso, a intervalos de tiempo la disminución de peso de la muestra hasta un peso constante. Los datos finalmente serán procesados utilizando algún método estadístico.

### Figura 8

*Muestra de la Arracacha fresca y las rodajas.*



## **Instrumentos y equipos utilizados**

- Deshidratador con aire caliente convectivo se esquematiza en la Figura 1, equipado de bandejas, con caudal y temperatura de aire ajustable desde la consola de acuerdo a las variables y condiciones experimentales que permita estudiar los mecanismos y la cinética de deshidratación de las rodajas de la Arracacha.
- Equipo con calibrador para corte de rodajas.
- Balanza digital de 2 Kg con precisión de 1mg para utilizarla en el pesado de la muestra antes, durante y después de la deshidratación.
- Anemómetro digital de alta sensibilidad, para medir la velocidad y caudal del aire.
- Termómetro por infrarrojo.
- Vernier o pie de rey.

### **4.2.2. Preparación experimental de la Isoterma de adsorción**

La construcción de las curvas de isotermas de adsorción, se basó en el método estático gravimétrico o método de control continuo de cambio de peso, lo cual se describe a continuación:

- Se prepara soluciones saturadas de sales en recipientes de vidrio herméticamente cerrados, con  $a_w$  o (HR/100) preestablecidas.
- Las muestras aquí es la arracacha deshidratada en rodajas, las mismas se pesan y se cuelgan por encima de la solución salina desde la tapa del frasco herméticamente cerrado
- Cada tres días se pesan hasta obtener un peso constante. Aquí la muestra ganará o perderá peso en función a la  $a_w$  dentro de cada frasco.
- Los datos obtenidos se analizan y se determina la isoterma de adsorción.



### Figura 9.

*Dispositivo experimental para determinar la isoterma de adsorción.*



#### 4.3. Población y muestra.

La investigación es experimental a nivel de laboratorio, en la cual el tamaño de muestra a estudiar es de 5 Kg de Arracacha fresca. La experimentación se realizará a dos temperaturas fijadas y mantenidas constantes durante la operación o medición *in situ* de variación de humedad en cada rango de tiempo y, de manera similar se desarrollará para dos velocidades de aire en el deshidratador

#### 4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado.

La investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Química de Alimentos y en el Laboratorio de Investigación, Desarrollo e innovación de la Facultad de Ingeniería Química de Universidad Nacional del Callao.

#### **4.5. Técnicas e instrumentos de recolección de la información.**

El equipo experimental es un deshidratador intermitente de bandeja rotatoria incorporado con un tablero de control de donde se controla y se regula la velocidad del aire, la temperatura. Aparte se cuenta con instrumentos como balanza de precisión, termocuplas, anemómetro, cronometro y otros.

Para determinar las isotermas de adsorción se utilizaron muestras de Arracacha deshidratado en rodajas, empleando el método estático gravimétrico de soluciones salinas saturadas, cual ha sido reportado en muchos trabajos (Bell y Labuza, 2000).

#### **4.6. Análisis y procesamiento de datos.**

Para el análisis de los datos experimentales del mecanismo y cinética de deshidratación en función al tiempo de las rodajas de Arracacha, para dos temperaturas prefijadas, se analizaron mediante la regresión no lineal, utilizando programas como Excel, Polymath, y luego estimar y evaluar los parámetros cinéticos de deshidratación sean óptimos.

De igual manera, los análisis de los datos experimentales de humedad de equilibrio se determinaron la isoterma de adsorción en función de actividad de agua ( $a_w$ ) o humedad relativa, utilizando el programa Excel, para modelar la isoterma de adsorción de la Arracacha, luego evaluar los resultados con los modelos teóricos propuestos.



## V. RESULTADOS

Después de las corridas experimentales, se presentan los resultados obtenidos.

### 5.1. Resultados del mecanismo y cinética de deshidratación.

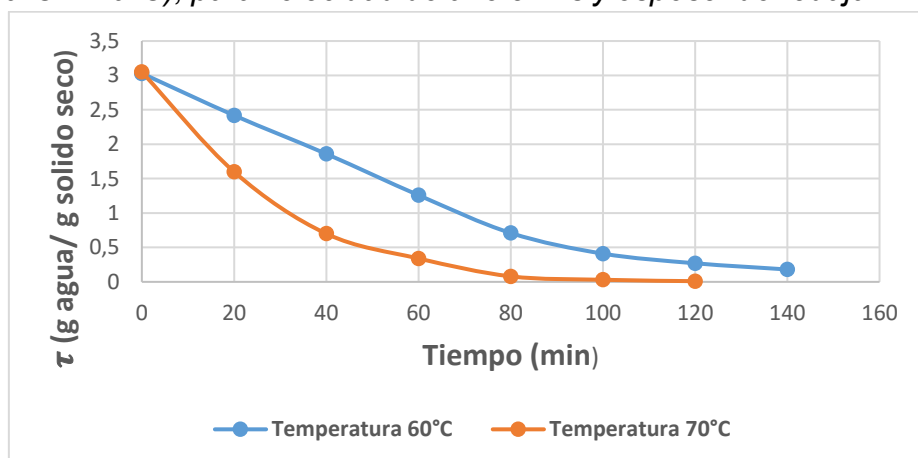
**Tabla 5**

*Datos de deshidratación de la Arracacha: Efecto de la temperatura (60°C y 70°C), para velocidad de aire 5 m/s y espesor de rodaja 4 mm.*

Tiempo (min)	$\tau$ (g de agua / g solido seco)	
	60°C	70°C
0	3.03	3.05
20	2.42	1.6
40	1.86	0.7
60	1.26	0.34
80	0.71	0.08
100	0.41	0.03
120	0.27	0.01
140	0.18	0.01

**Figura 10**

*Curvas de deshidratación de la arracacha: Efecto de la temperatura (60°C Y 70°C), para velocidad de aire 5 m/s y espesor de rodaja 4 mm.*



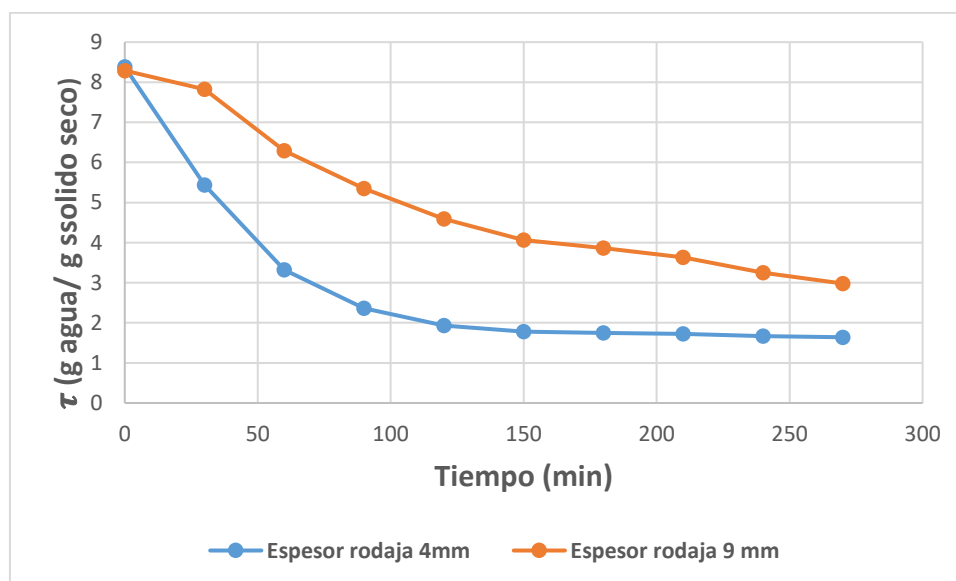
**Tabla 6**

*Datos de deshidratación de la Arracacha: Efecto del espesor de rodajas (4 mm y 9 mm), a 60°C y velocidad de aire 2 m/s*

Tiempo (min)	$\tau$ (g de agua /g solido seco)	
	Espesor rodaja 4 mm	Espesor rodaja 9 mm
0	8.38	8.29
30	5.44	7.82
60	3.32	6.29
90	2.36	5.35
120	1.93	4.59
150	1.78	4.06
180	1.75	3.86
210	1.72	3.63
240	1.67	3.25
270	1.64	2.98
300		2.45

**Figura 11**

*Curvas de deshidratación de la arracacha: Efecto del espesor de rodajas (4 mm y 9 mm), a 60°C y velocidad de aire 2 m/s.*



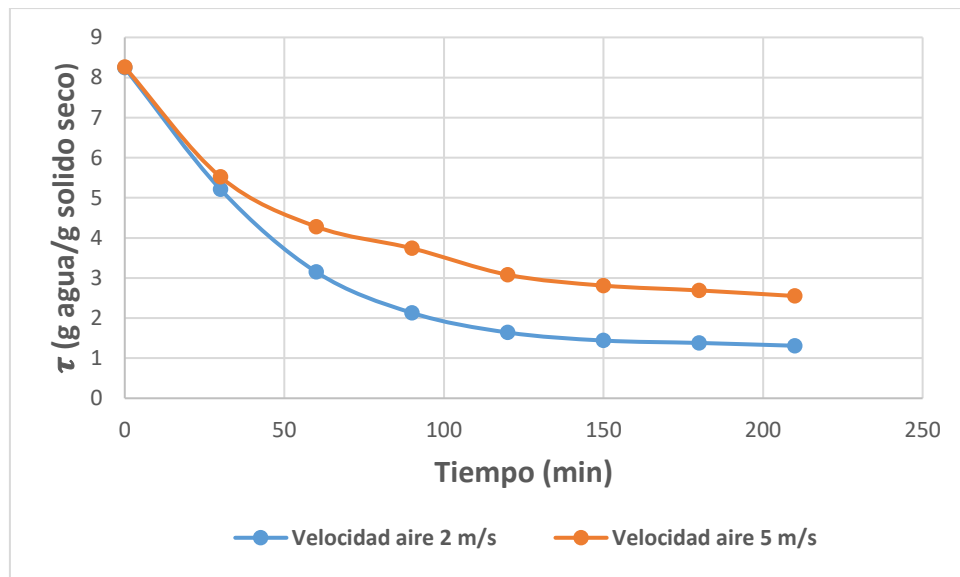
**Tabla 7**

*Datos de deshidratación de la Arracacha: Efecto de la velocidad del aire (2 m/s y 5 m/s), a 70°C y espesor de rodaja 4 mm.*

Tiempo (min)	$\tau$ (g de agua /g solido seco)	
	Velocidad aire 2 m/s	Velocidad de aire 5 m/s
0	8.24	8.26
30	5.21	5.52
60	3.15	4.28
90	2.13	3.74
120	1.64	3.08
150	1.44	2.81
180	1.38	2.69
210	1.31	2.55

**Figura 12**

*Curvas de deshidratación de la Arracacha: Efecto de velocidad de aire (2 m/s y 5 m/s), a 70°C y espesor de rodaja de 4 mm.*



## 5.2. Determinación experimental de la isoterma de adsorción de la Arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* B.) deshidratada

Lo primero es preparar las soluciones salinas por técnicas gravimétricas y calcular la actividad de agua ( $a_w$ ) para las temperaturas de experimentación (20 y 35°C) utilizando las ecuaciones citadas en la Tabla 2, los resultados obtenidos se presentan en el Tabla 8.

**Tabla 8**

*Soluciones salinas con su correspondiente actividad de agua ( $a_w$ ) a (20°C y 35°C).*

Sal		Actividad de agua ( $a_w$ ) a:	
Nombre	Formula	20°C	35°C
Cloruro de litio	LiCl	0.113	0.113
Cloruro de magnesio	MgCl <sub>2</sub>	0.331	0.321
Carbonato de potasio	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.444	0.436
Nitrato de magnesio	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.547	0.499
Nitrito de sodio	NaNO <sub>2</sub>	0.675	0.628
Cloruro de sodio	NaCl	0.772	0.749
Sulfato de amonio	SO <sub>4</sub> (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0.851	0.803
Cloruro de potasio	KCl	0.873	0.836
Cloruro de bario	BaCl <sub>2</sub>	0.908	0.895

La obtención de las humedades de equilibrio se utilizó el dispositivo experimental presentado en la Figura 9, las muestras son mantenidos en una estufa a la temperatura experimental predetermina constante, dichas muestras se pesan periódicamente hasta alcanzar un peso constante, a la cual se dice que ya alcanzo la humedad de equilibrio, los resultados se presentan en la Tala 9.

Con estos valores se preparan la relación entre la actividad de agua ( $a_w$ ) y la humedad de equilibrio a una temperatura constante es llamada isoterma de adsorción experimental, que son ajustados y analizados matemáticamente mediante modelos de adsorción.





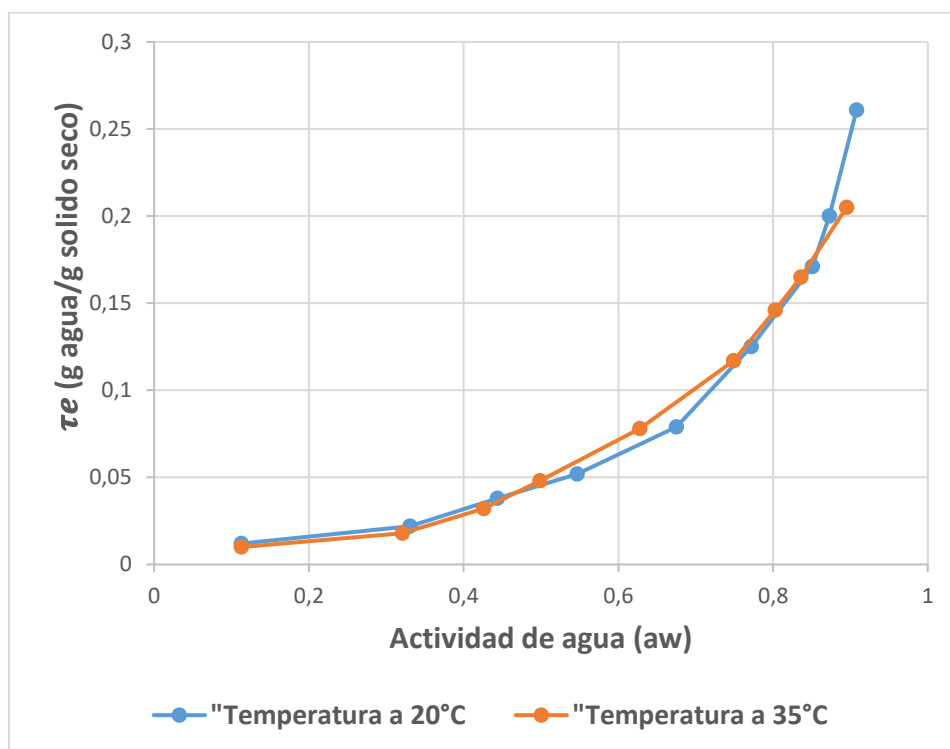
**Tabla 9**

*Comparación de la isoterma de adsorción experimental de la arracacha deshidratada a 20 °C y 35 °C.*

Sal	Temperatura			
	20°C		35°C	
	$a_w$	$\tau_e$	$a_w$	$\tau_e$
LiCl	0.113	0.012	0.113	0.010
MgCl <sub>2</sub>	0.331	0.022	0.321	0.018
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.444	0.038	0.436	0.032
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.547	0.052	0.499	0.048
NaNO <sub>2</sub>	0.675	0.079	0.628	0.078
NaCl	0.772	0.125	0.749	0.117
SO <sub>4</sub> (NH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.851	0.171	0.803	0.146
KCl	0.873	0.200	0.836	0.165
BaCl	0.908	0.261	0.895	0.205

**Figura 13.**

*Comparación de las curvas experimentales de isotermas de adsorción de Arracacha deshidratada a 20°C y 35°C.*



## Ajuste matemático de las isothermas de adsorción a 20°C.

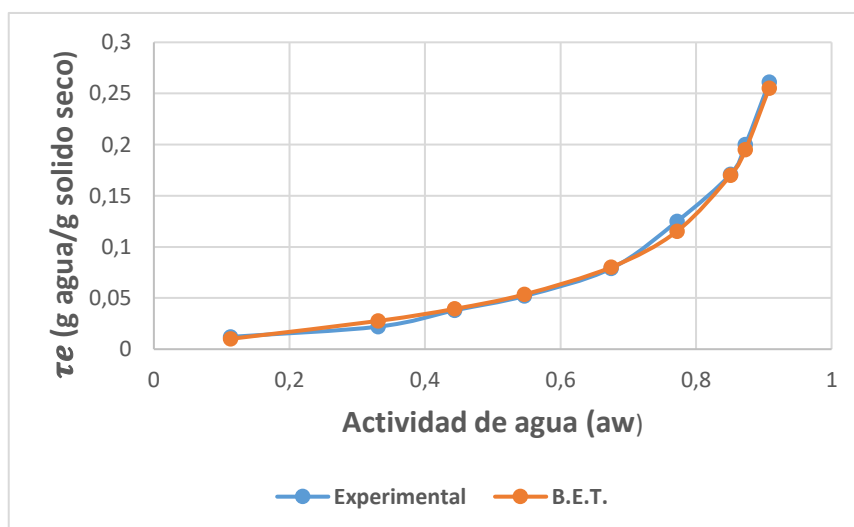
Los datos experimentales de isothermas de adsorción fueron ajustados a los modelos matemáticos de BET, Henderson, Caurie, Oswin GAB y Halsey, la calidad de ajuste de los modelos de isothermas a los datos experimentales fue con los valores de ( $R^2$ ) y (%E).

**Tabla 10**

*Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo B.E.T. a 20°C.*

aw	Isoterma de adsorción ( $\tau_e$ : g agua/g solido seco)	
	Experimental	B. E.T.
0.113	0.012	0.010687649
0.331	0.022	0.027191969
0.444	0.038	0.037231958
0.547	0.052	0.049460984
0.675	0.079	0.073917165
0.772	0.125	0.109612624
0.851	0.171	0.172214936
0.873	0.2	0.203386901
0.908	0.261	0.283565314

**Figura 14.** Comparación de la curva de Isoterma experimental con el modelo B.E.T. a 20°C.



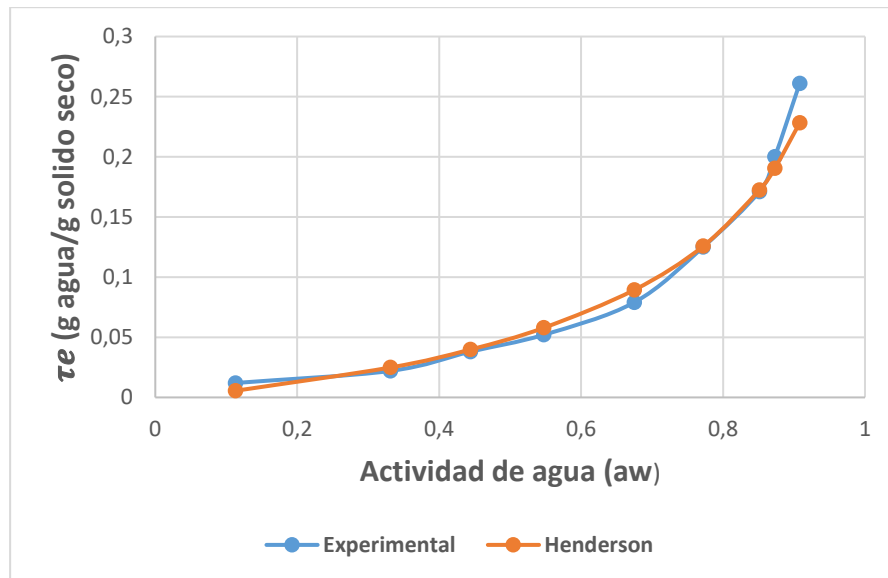
**Tabla 11.**

*Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo Henderson a 20°C.*

Aw	Isoterma de adsorción ( $\tau_e$ : g agua/g solido seco)	
	Experimental	Henderson
0.113	0.012	0.00551136
0.331	0.022	0.02484877
0.444	0.038	0.03981298
0.547	0.052	0.05779651
0.675	0.079	0.08938253
0.772	0.125	0.12574094
0.851	0.171	0.17227144
0.873	0.2	0.19045073
0.908	0.261	0.2281783

**Figura 15.**

*Comparación de la curva Isoterma experimental con el modelo Henderson a 20°C.*



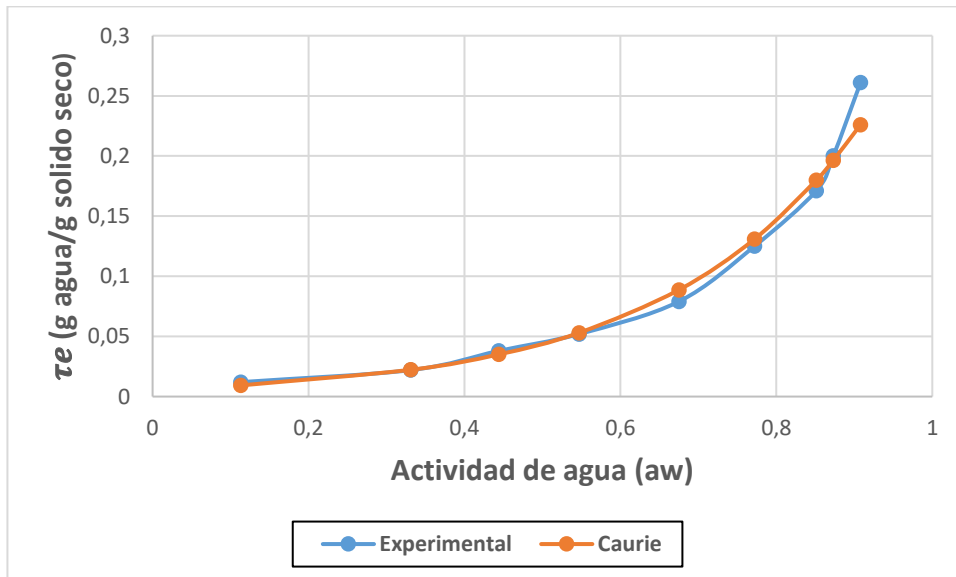
**Tabla 12**

*Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo Caurie a 20°C.*

Aw	Isoterma de adsorción ( $\tau_e$ : g agua/g solido seco)	
	Experimental	Caurie
0.113	0.012	0.009292986
0.331	0.022	0.022294845
0.444	0.038	0.03509154
0.547	0.052	0.053059964
0.675	0.079	0.088698261
0.772	0.125	0.130924089
0.851	0.171	0.179781006
0.873	0.2	0.196380063
0.908	0.261	0.226003137

**Figura 16.**

*Comparación de la curva de Isoterma experimental con el modelo Caurie a 20°C.*



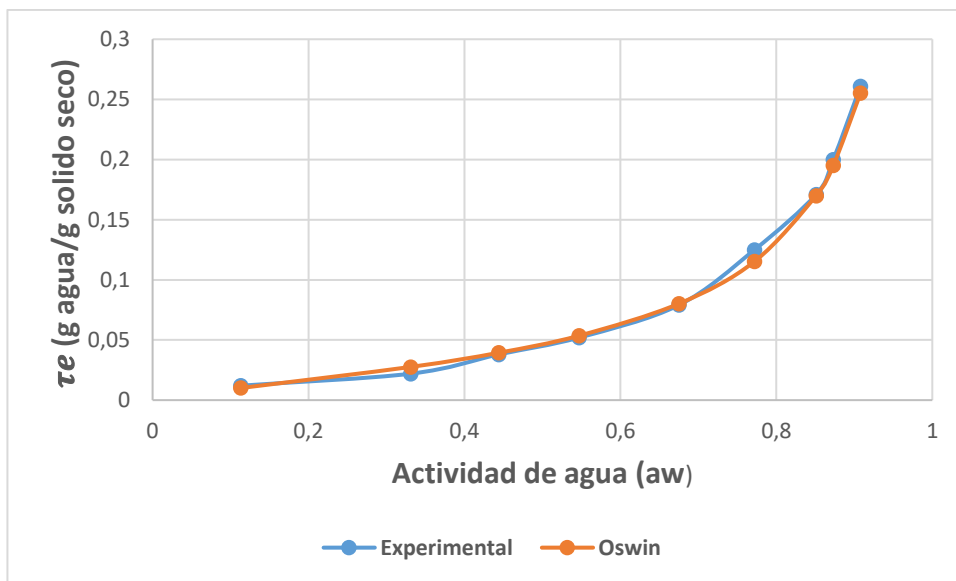
**Tabla 13**

*Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo Oswin a 20°C*

Aw	Isoterma de adsorción ( $\tau_e$ : g agua/g solido seco)	
	Experimental	Oswin
0.113	0.012	0.01007696
0.331	0.022	0.02761468
0.444	0.038	0.03941073
0.547	0.052	0.05358498
0.675	0.079	0.08017572
0.772	0.125	0.11527989
0.851	0.171	0.17000424
0.873	0.2	0.19509534
0.908	0.261	0.25524833

**Figura 17**

*Comparación de Isoterma experimental con el modelo Oswin a 20°C*



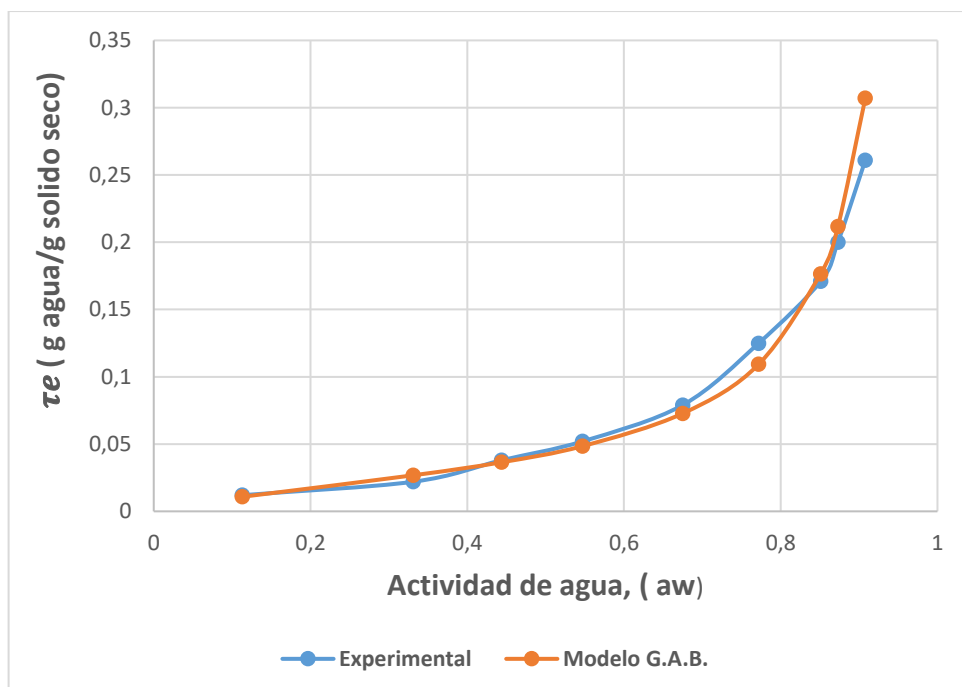
**Tabla 14**

*Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo G.A.B. a 20°C*

Aw	Isoterma de adsorción ( $\tau_e$ : g agua/g solido seco)	
	Experimental	G.A.B.
0.113	0.012	0.010821351
0.331	0.022	0.026798761
0.444	0.038	0.036504835
0.547	0.052	0.048449209
0.675	0.079	0.072780324
0.772	0.125	0.109355343
0.851	0.171	0.176639872
0.873	0.2	0.211717688
0.908	0.261	0.30717006

**Figura 18**

*Comparación de la Curva de Isoterma experimental con el modelo G.A.G. a 20°C*



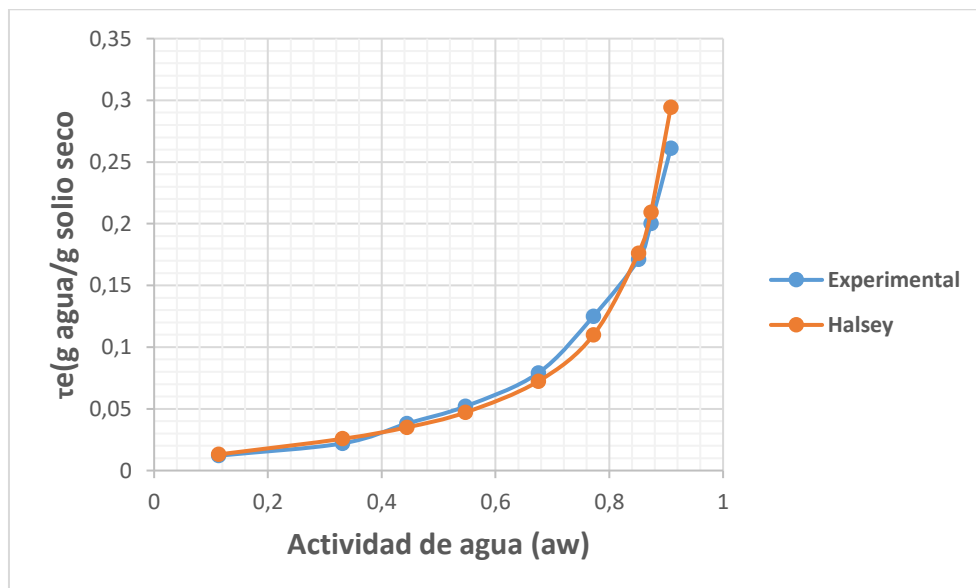
**Tabla 15**

*Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo Halsey a 20°C*

Aw	Isoterma de adsorción ( $\tau$ : g agua/g solido seco)	
	Experimental	Halsey
0.113	0.012	0.01302533
0.331	0.022	0.02568655
0.444	0.038	0.03497835
0.547	0.052	0.04707392
0.675	0.079	0.0722568
0.772	0.125	0.10974966
0.851	0.171	0.17602235
0.873	0.2	0.20910071
0.908	0.261	0.29426728

**Figura 19**

*Comparación de la curva de Isoterma experimental con el modelo Halsey. a 20°C*



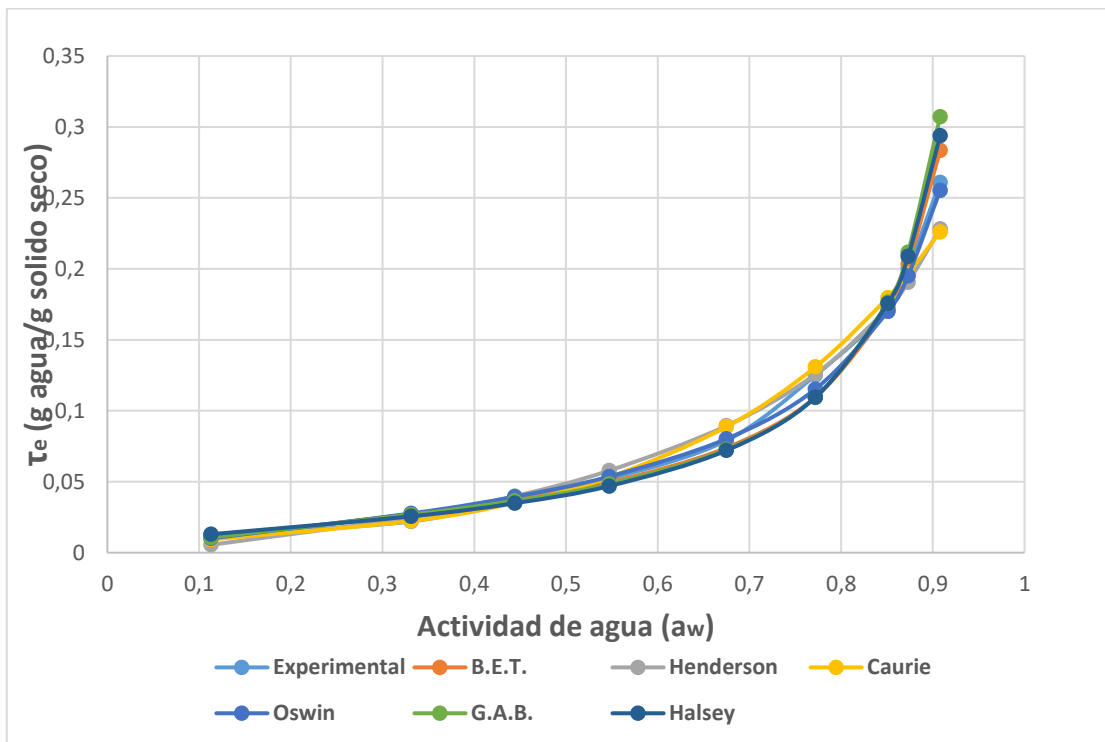
**Tabla 16**

*Isotermas de adsorción experimentales y calculado con los modelos BET, Henderson, Caurie Oswin, GAB, Halsey a 20°C*

Aw	Isoterma de adsorción ( $\tau_e$ ), ( g agua/g solido seco)						
	Exp.	BET	Henderson	Caurie	Oswin	GAB	Halsey
0.113	0.012	0.0106	0.00551	0.00922	0.0106	0.01081	0.01302
0.331	0.022	0.0271	0.02488	0.02224	0.02764	0.02678	0.02568
0.444	0.038	0.0372	0.03982	0.03501	0.03940	0.03654	0.03497
0.547	0.052	0.0494	0.05776	0.05309	0.05354	0.04849	0.04707
0.675	0.079	0.0739	0.08932	0.08868	0.08015	0.07270	0.0722
0.772	0.125	0.1096	0.12570	0.13094	0.11529	0.10935	0.10974
0.851	0.171	0.1722	0.17221	0.17971	0.17004	0.17669	0.1760
0.873	0.2	0.2033	0.19040	0.19630	0.19505	0.21177	0.20911
0.908	0.261	0.2835	0.22818	0.22603	0.25528	0.30710	0.29426

**Figura 20**

*Comparación de la curva de Isoterma experimental con los modelos de BET, Henderson, Caurie Oswin, GAB, Halsey a 20°C*





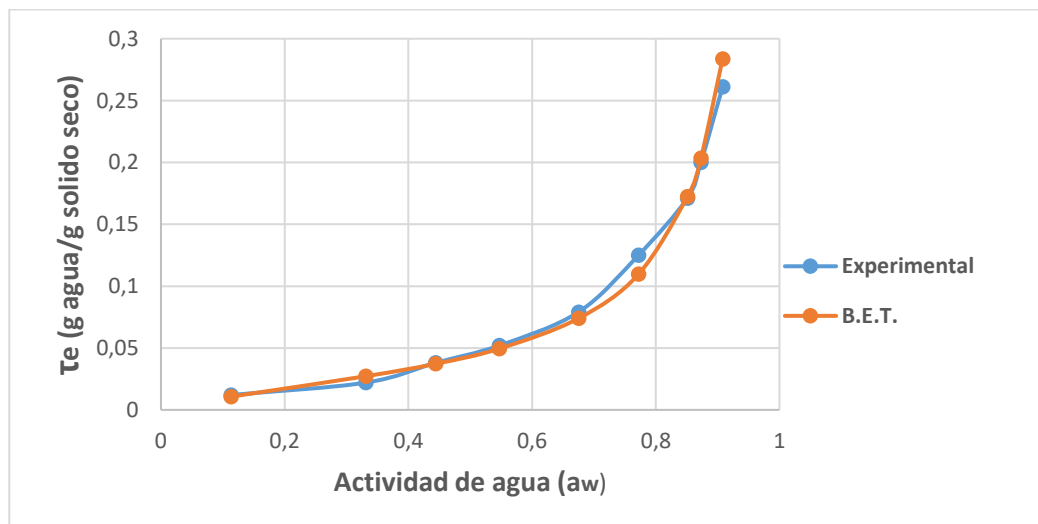
**Tabla 17**

*Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo B.E.T. a 35°C.*

aw	Isoterma de adsorción ( $\tau e$ ) (g agua/g solido seco)	
	Experimental	B. E. T.
0.113	0.010	0.00869914
0.321	0.018	0.02429207
0.436	0.032	0.03494122
0.499	0.048	0.04223385
0.628	0.078	0.06353581
0.749	0.117	0.10159421
0.803	0.146	0.13310786
0.836	0.165	0.16240981
0.895	0.205	0.26024293

**Figura 21**

*Comparación de la curva de Isoterma experimental con el modelo B.E.T. a 35°C*



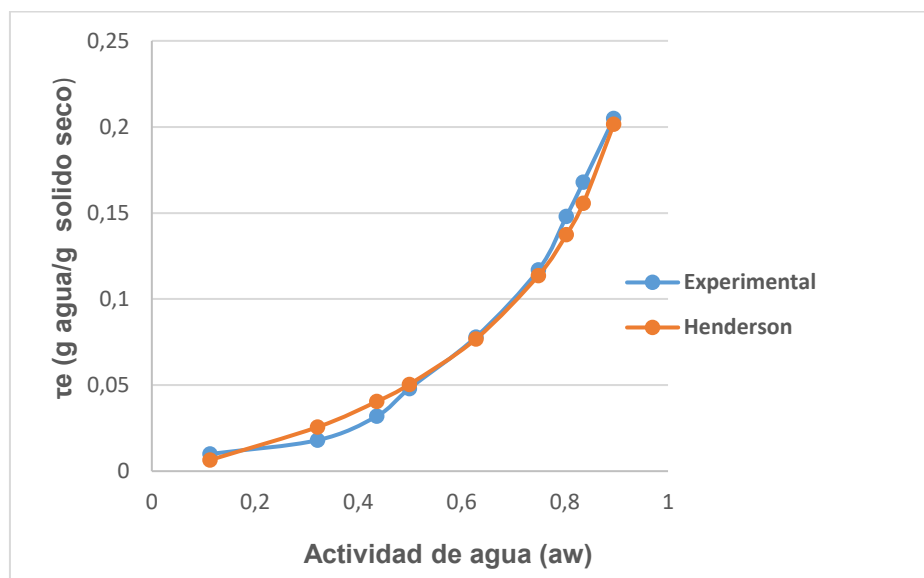
**Tabla 18**

*Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo Henderson a 35°C.*

Aw	Isoterma de adsorción ( $\tau e$ ) (g agua/g solido seco)	
	Experimental	Henderson
0.113	0.010	0.0064923
0.321	0.018	0.02561499
0.436	0.032	0.04051903
0.499	0.048	0.05049776
0.628	0.078	0.07681618
0.749	0.117	0.11371292
0.803	0.146	0.13738509
0.836	0.165	0.15571248
0.895	0.205	0.2015801

**Figura 22**

*Comparación de la curva de Isoterma experimental con el modelo Henderson. a 35°C*



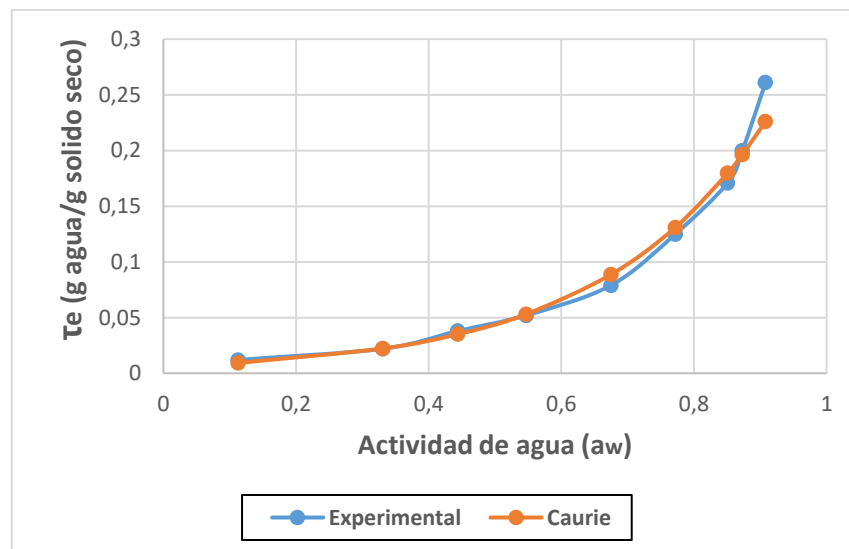
**Tabla 19**

*Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo Caurie a 35°C.*

<b>Aw</b>	<b>Isoterma de adsorción (<math>\tau e</math>)</b>	
	<b>(g agua/g solido seco)</b>	
	<b>Experimental</b>	<b>Caurie</b>
0.113	0.010	0.00924444
0.321	0.018	0.02126897
0.436	0.032	0.03371449
0.499	0.048	0.04339305
0.628	0.078	0.0727523
0.749	0.117	0.11812866
0.803	0.146	0.14665648
0.836	0.165	0.16738352
0.895	0.205	0.2120105

**Figura 23**

*Comparación de la curva de Isoterma experimental con el modelo Caurie. a 35°C*



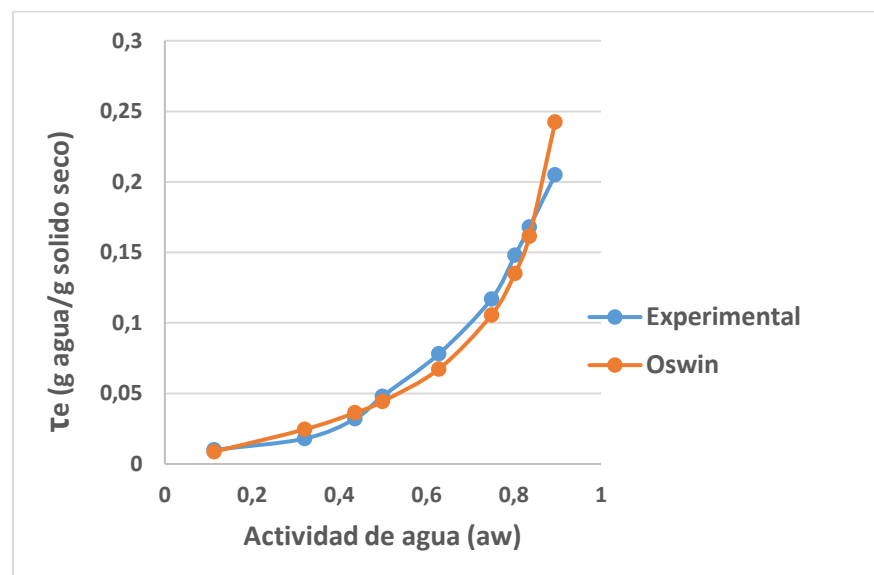
**Tabla 20**

*Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo Oswin a 35°C*

<b>Aw</b>	<b>Isoterma de adsorción (<math>\tau e</math>)</b>	
	<b>(g agua/g solido seco)</b>	
	<b>Experimental</b>	<b>Oswin</b>
0.113	0.010	0.00869416
0.321	0.018	0.0245519
0.436	0.032	0.03623849
0.499	0.048	0.04428952
0.628	0.078	0.06725462
0.749	0.117	0.10558005
0.803	0.146	0.13514833
0.836	0.165	0.16132258
0.895	0.205	0.24235894

**Figura 24**

*Comparación de la curva de Isoterma experimental con el modelo Oswin. a 35°C*



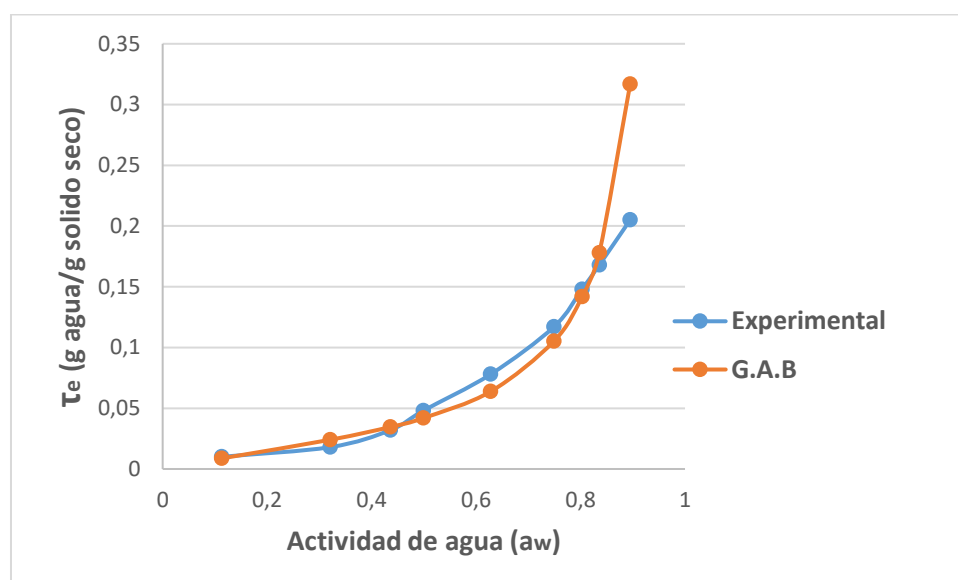
**Tabla 21**

*Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo G.A.B. a 35°C*

<b>Aw</b>	<b>Isoterma de adsorción (<math>\tau e</math>) (g agua/g solido seco)</b>	
	<b>Experimental</b>	<b>G.A.B.</b>
0.113	0.010	0.00873806
0.321	0.018	0.02405846
0.436	0.032	0.03458821
0.499	0.048	0.04189533
0.628	0.078	0.06378809
0.749	0.117	0.10515878
0.803	0.146	0.14181552
0.836	0.165	0.17804729
0.895	0.205	0.31672459

**Figura 25**

*Comparación de la curva de Isoterma experimental con el modelo GAB. a 35°C*



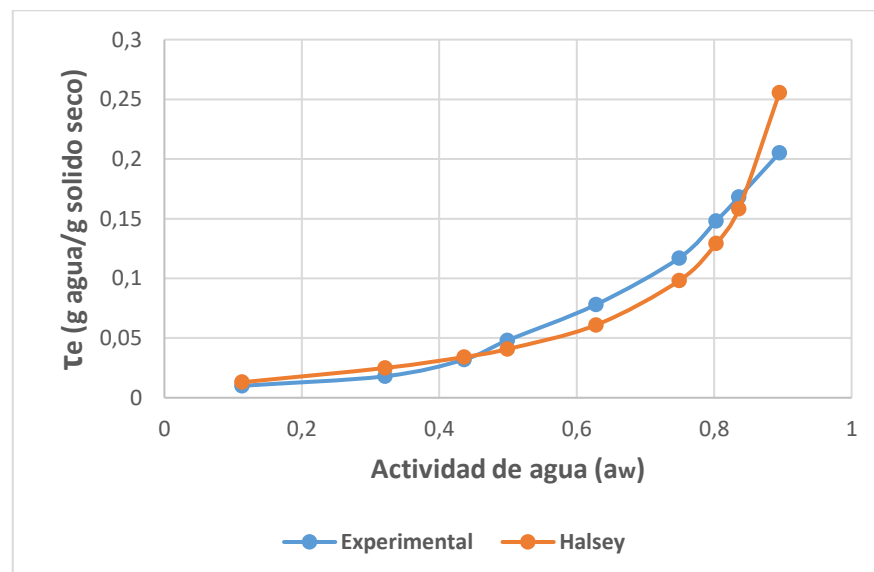
**Tabla 22**

*Isoterma de adsorción experimental y calculado con el modelo Halsey. a 35°C*

<b><math>A_w</math></b>	<b>Isoterma de adsorción (<math>\tau_e</math>)</b>	
	<b>(g agua/g solido seco)</b>	
	<b>Experimental</b>	<b>Halsey</b>
0.113	0.010	0.0129946
0.321	0.018	0.02493413
0.436	0.032	0.0341315
0.499	0.048	0.04075816
0.628	0.078	0.06090301
0.749	0.117	0.09803253
0.803	0.146	0.12913823
0.836	0.165	0.15817299
0.895	0.205	0.25540973

**Figura 26**

*Comparación de la curva de Isoterma experimental con el modelo Halsey. a 35°C*



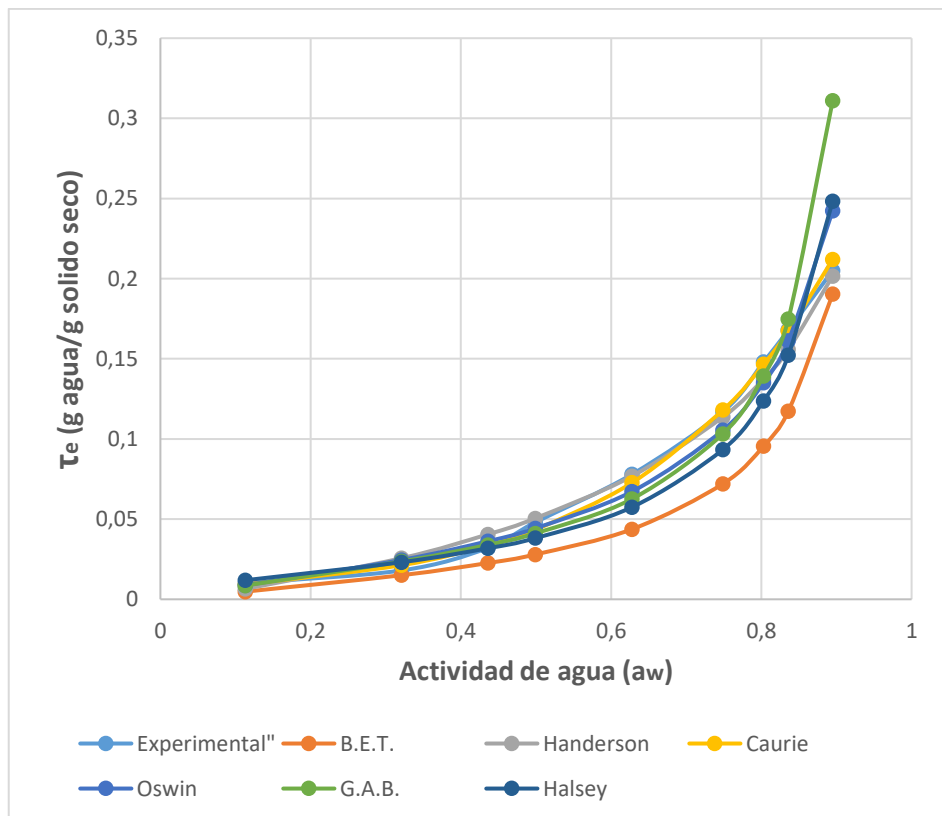
**Tabla 23**

*Isoterma de adsorción experimental y calculados con los modelos: BET, Henderson, Caurie Oswin, GAB y Halsey a 35°C*

A <sub>w</sub>	Humedad de equilibrio ( $\tau_e$ ), (g agua/g solido seco)						
	Exp.	BET	Henderson	Caurie	Oswin	GAB	Halsey
0.113	0.01	0.0048	0.0065	0.0092	0.0087	0.0086	0.0119
0.321	0.018	0.0150	0.0256	0.0213	0.0246	0.0236	0.0231
0.436	0.032	0.0226	0.0405	0.0337	0.0362	0.0340	0.0318
0.499	0.048	0.0280	0.0505	0.0434	0.0443	0.0411	0.0382
0.628	0.078	0.0437	0.0769	0.0728	0.0673	0.0626	0.0575
0.749	0.117	0.0721	0.1138	0.1181	0.1056	0.1033	0.0935
0.803	0.148	0.0956	0.1375	0.1467	0.1351	0.1393	0.1238
0.836	0.168	0.1174	0.1558	0.1674	0.1613	0.1748	0.1523
0.895	0.205	0.1903	0.2017	0.2120	0.2424	0.3110	0.2484

**Figura 27**

*Comparación de la curva de Isoterma experimental con los modelos BET, Henderson, Caurie, Oswin, GAB y Halsey a 35°C*



**Tabla 24**

Resumen de los parámetros y estadísticos obtenidos para cada modelo utilizado para la isoterma de adsorción de Arracacha deshidratado a 20°C y 35°C

Modelo	Parámetros del modelo	Temperatura (°C)	
		20	35
B.E.T.	$b_0$	8.6512	12.028
	$b_1$	28.734	23.157
	$\tau_m$	0.0267	0.02842
	<b>C</b>	4.3214	2.92526
	<b>R<sup>2</sup></b>	0.9206	0.6116
	<b>(%)E</b>	7.914	15.691
	$b_0$	-1.6427	-1.7526
Henderson	$b_1$	0.8032	0.8539
	<b>N</b>	0.8032	0.8539
	<b>C</b>	0.00066	0.000563
	<b>R<sup>2</sup></b>	0.9871	0.9593
	<b>(%)E</b>	12.752	16.100
	$b_0$	5.1291	5.1364
	Caurie	$b_1$	-4.0142
$\tau_s$		0.0433	0.04326
<b>R</b>		55.37897	54.92123
<b>R<sup>2</sup></b>		0.9947	0.9941
<b>(%)E</b>		7.871	5.902
$b_0$		-3.0666	-3.1138
Oswin		$b_1$	0.743
	<b>A</b>	0.04658	0.04443
	<b>B</b>	0.743	0.7917
	<b>R<sup>2</sup></b>	0.9896	0.9768
	<b>(%)E</b>	6.978	13.872
	$b_0$	8.2756	11.976
	G.A.B.	$b_1$	22.744
$b_2$		-31.5	-26.413
$\tau_m$		0.02532	0.02629
<b>C</b>		4.7152	3.09684
<b>K</b>		1.0122	1.02558
<b>R<sup>2</sup></b>		0.9081	0.8047
<b>(%)E</b>		9.959	17.786
Halsey	$b_0$	-3.5656	-3.6368
	$b_1$	-1.0012	-1.0805
	<b>A</b>	0.0284	0.0283
	<b>B</b>	0.9988	0.9799
	<b>R<sup>2</sup></b>	0.9899	0.9645
	<b>(%)E</b>	9.299	19.059





## VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados.

El mecanismo y la velocidad de deshidratación está en función del contenido de agua en la muestra y más principalmente de la actividad de agua, sin embargo en un deshidratador de bandejas donde existe un flujo de aire se le puede atribuir una singular importancia a este flujo de aire ya que como se ve en el presente trabajo queda demostrado que a mayor velocidad del aire es menor el tiempo lo que coincide con lo reportado por Barrera et al (2009), que a mayor velocidad del flujo de aire más acelerado es la cinética de deshidratación.

Se puede deducir que, a mayor temperatura de deshidratación, sin influencia de la velocidad del aire, la humedad crítica aumenta, esto se debe que a mayor temperatura la humedad superficial es retirada más rápido en comparación a la humedad que migra del interior de las muestras de Arracacha, esto concuerda con lo encontrado por Vega, A. y Lemus, R. (2006)

El mecanismo del proceso de deshidratación experimentales a 60 y 70°C, para espesores de muestra de 4 mm y 9 mm y a velocidades de 2 m/s y 5 m/s, el tiempo en los cuales se llegaron al equilibrio para las muestras fueron distintos entre 2 a 4 horas, sin embargo, en presente investigación tener en cuenta que la arracacha se debe deshidratar a la temperatura de 60°C, con espesores de rodajas de 4 mm y con velocidad de aire 2 m/s. Rangos de operación recomendados por estudiosos para deshidratación de frutas y hortalizas si se trata de imitar el proceso industrial para facilitar el cambio de escala.

Las isotermas de adsorción de la arracacha se obtuvieron mediante el método gravimétrico estático para temperaturas de 20°C y 35°C a un rango de actividad de agua de 0 a 0.9 en donde a medida que aumenta la actividad de agua, aumenta el contenido de humedad de equilibrio, el cual se alcanzó en 15 días.

El análisis de la figura 20 surge claramente que aquellas isotermas de la arracacha a 20 °C con los modelos de BET, Henderson, Caurie, Oswin,



GAB y Halsey presentan un mayor grado de ajuste a los datos experimentales y las curvas correspondientes se sobreponen en casi todo el rango de la actividad de agua. En cambio, en la figura 27 experimentados a 35°C, las curvas de isoterma se observan dispersas. En las figuras 16 y en la figura 23 presentan las isotermas ajustadas con el modelo Caurie mostró mejor ajuste a las dos temperaturas (20°C y a 35°C) se comportan de manera semejante con la experimental en casi todo el rango de actividad de agua.

## **6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares.**

En la deshidratación de la muestra de Arracacha se observó que mientras más alta sean la temperatura y velocidad de deshidratación, pero si la temperatura y la velocidad del aire de deshidratación son bajas, tiempo de deshidratación se alarga por lo que coincide con lo obtenido por Barrera, V., Tapia, C., y Monteros, A. (2004). La mayor velocidad y la mayor temperatura de aire en la operación del deshidratador de bandejas, reduce el tiempo de deshidratación; y las temperaturas altas afectan la calidad de la pulpa de lúcumo seca.

Los parámetros y estadísticos obtenidos de cada modelo propuesto de isoterma de adsorción de la arracacha deshidratada a las temperaturas de 20°C y 35°C, con su correspondiente calidad de ajuste se presentan en la Tabla 24.

Lamentablemente no se encontró información experimental que mencionen estos parámetros, por lo que no hay forma de comparar los resultados obtenidos. Por lo tanto, este trabajo aporta información necesaria para lograr y predecir productos de mayor estabilidad en el almacenamiento de arracacha deshidratada y comercializar a nivel industrial y tradicional.



## CONCLUSIONES

Al comparar los mecanismos y la cinética de deshidratación de la arracacha en rodajas, podemos concluir que la cinética de deshidratación fue influenciada fuertemente por la temperatura del aire caliente, temperaturas menores, mayor espesor de rodaja y mayor velocidad de aire de deshidratación conllevaron a tiempos prolongados de deshidratación de 2 a 4 horas para alcanzar la humedad de equilibrio.

De acuerdo a los parámetros estadísticos determinados con los modelos utilizados, el modelo que mejor ajusto los datos experimentales de la isoterma de adsorción de la arracacha deshidratada fue el modelo de Caurie, para las dos temperaturas experimentales, con valores de  $R^2 = 0.9947$  y error relativo promedio porcentual  $\%E = 7.871$  para  $20^{\circ}\text{C}$  y, con  $R^2 = 0.9941$  y error relativo promedio porcentual  $\%E = 5,902$  para  $35^{\circ}\text{C}$ .

Es muy importante tomar en cuenta considerar la reducción de la actividad de agua en la arracacha deshidratada,  $a_w < 0.6$  para así evitar el deterioro posterior del producto causado por el crecimiento de microorganismos deteriorativos.

Las principales limitaciones de la producción de la arracacha son su largo periodo vegetativo (un año), y alta perecebilidad (en 6 o 7 días) que impide su almacenamiento por un tiempo prolongado.



## RECOMENDACIONES

Para la obtención de arracacha deshidratada es necesario que la materia prima sea seleccionada en su periodo de madurez fisiológica total, para tener un producto con todas sus características.

Realizar estudio de vida útil en las condiciones de comercialización para este tipo de productos de la región andina y por representar un alimento tradicional.

Las hortalizas o raíces son alimentos de consumo a nivel mundial y su conservación es necesaria, utilizando diversas técnicas para su conservación, siéndola deshidratación por aire caliente es uno de los procesos comerciales más usados, reduciendo su actividad de agua a un nivel en el cual los microorganismos no se pueden desarrollar.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade (2011). *Models of Sorption Isotherms for Food: Uses and Limitations*.  
Revista de la Facultad de Química y Farmacéutica. Universidad de  
Antioquia.
- AOAC International, (2000): "*Official Methods of Analysis*". 17°ed. Gaithersburg.  
USA.
- Araya-Farias, M., RATTI, C., (2009). *Dehydration of Foods: General Concepts,  
Advances in Food Dehydration*, Ed. Taylor and Francis Group, New  
York.
- Badui Dergal, S., (2006). *Química de Alimentos*. México. PEARSON  
Educación. Cuarta Edición.
- Barbosa-Canavas et al, (2000). *Manual de laboratorio de Ingeniería de  
Alimentos*. Zaragoza (España). Ed. Acribia, S. A.
- Barrera et al. (2009). *Cinética de Secado de Hojuelas de Plátano (Musa  
acuminata) Variedad Inguri*. Universidad Privada Antenor Orrego de  
Trujillo.
- Barrera, V., Tapia, C., & Monteros, A. (2004). Raíces y Tubérculos Andinos:  
Alternativas para la conservación y uso sostenible en el Ecuador.
- Basso et al, (2016). *Valoremos los Alimentos, Evitemos Perdidas y  
desperdicios*. Dirección de Agro alimentos. Agroindustria de la Nación  
Argentina:
- Bell, L. y Labuza, (2000). *Moisture Sorption: Practical Aspects of Isotherm  
Measurement and Use*. 2 ed. Saint Paul, MN: Eagan Press, 122 p.
- Benalcázar, B. (2008). *Determinación de las Características Físicas y Químicas  
de la Zanahoria Blanca (Arracacia xanthorrhiza Bancroft) Proveniente  
de la Zona de San José de Minas Provincia de Pichincha*. Universidad  
Técnica de Ambato, Ambato-Ecuador.
- Díaz R. (2008). *Guías para Prácticas de laboratorio de Pos cosecha en  
Vegetales*. Editorial Universidad Pedagógica y Tecnológica de  
Colombia.



- Ferreira y Costa; (2010). *Parámetros de Transferencia de Masa en el Secado de Frutas*. Universidad Federal de Rio Grande del Norte. Información Tecnológica V. 21(2), 87-98, RN-Brasil.
- Fito Pedro (2001). *Introducción al secado de Alimentos por aire caliente*. Valencia. Ed. U P V.
- Hurtado, J. (1997), *Procesamiento de la Arracacha (Arracacia xanthorrhiza): Estudio de la Factibilidad Técnica y Económica para la Producción de Almidón y Harina y sus Propiedades Fisicoquímicas*. Seminario Técnico sobre Raíces y Tubérculos Autóctonos, Ibagué, Colombia.
- Ikhu-Omoegbe, D.I.O (2006). *Comparison of the Sorption Isotherm Characteristics of two Cassava Products*. International Journal of Food Properties 9, 167-177.
- Jiménez, F. (2005). *Características Nutricionales de la Arracacha (Arracacia xanthorrhiza) y sus Perspectivas en la Alimentación*. Red Peruana de Alimentación y Nutrición, Lima Perú, 22p.
- Mariuxi, C.T. y Guambaña, S. (2019). *Obtención de Harina de Zanahoria Blanca (Arracacia xanthorrhiza) en Condiciones Óptimas de Temperatura, Tiempo y espesor de la Rodaja y su aplicación en Dietas Alimenticias*. Tesis, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca. Cuenca-Ecuador.
- Martínez, E. Lira, L. (2010). *Análisis y Aplicación de las Expresiones del Contenido de Humedad en Sólidos*. Simposio de Metrología. Centro Nacional de Metrología, Querétaro.
- Martínez, N.N. (1998) *Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno*. IPN. Mex. 183-187.
- Ortega-Cartaya, (2000). *El Apio Criollo (Arracacia xanthorrhiza); Oportunidades para la Producción*. Rev. FONAIAP. Caribe, Venezuela.
- Rahman, S.M. *Food properties handbooks*. Usa. Taylor and Francis group. Page 599. 2009
- Rodríguez, G. *et al.* (2004) *La harina de arracacha. Manual técnico para su elaboración*. Informe de investigación del programa nacional de procesos agroindustriales. CORPOISA, 24p.



- Quincho, T. y Ore, V. F. (2015) Efectos de la arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* B.) en modelo experimental de Poliquistosis Ovárica. Rev. Perú Med. Exp. Salud publica 32(2):395-406.
- Salas, Sonia. (2001). *Desarrollo de Agroindustrias y Mercado para la Arracacha. Proyecto CIP/CONDESAN*. Lima Peru.
- Save Food, (2012). *Iniciativa Mundial sobre las Perdidas y el Desperdicio de Alimentos*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Seminario, J. (1999). *Aspectos Socioeconomicos y Arte de la Arracacha en Sucre (Socalla, Cutervo)*. CONDESAN - Universidad Nacional de Cajamarca - Peru.
- Soto, K. (2004). *Características del Almidón de las Variedades Amarilla, Blanca y Morada de Arracacha (Arracacia xanthorrhiza)*. Tesis de Ingeniero en Industrias Alimentarias, Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo - Perú.
- Sharma S. (2003). *Ingeniería de Alimentos: Operaciones Unitarias y Prácticas de Laboratorio*. Mexico. Ed. Limusa Wiley.
- Vega A.; Lemus, R. (2005). Importancia de las isotermas en los alimentos. REV. Industrializados.



.....  
**Bernardino Ramírez Durand**  
Responsable del Proyecto



## ANEXOS

### Anexo A

### MATRIZ DE CONSISTENCIA

#### MODELO CINETICO E ISOTERMA DE SORCION EN LA DESHIDRATACION DE ARRACACHA (*Arracacia xanthorrhiza B.*)

**TIPO DE INVESTIGACIÓN: Aplicada**

**NIVEL DE INVESTIGACIÓN: Experimental**

**DISEÑO: Experimental**

FORMULACION DEL PROBLEMA	MARCO TEORICO	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOS O TECNICAS			
<p><b>P. GENERAL</b></p> <p>¿Cómo determinar el modelo cinético e isoterma de adsorción en la deshidratación de Arracacha (<i>Arracacia xanthorrhiza B.</i>)?</p>	<p><b>Definiciones:</b> <b>La Arracacha</b></p> <p><b>Mecanismo y Cinética de la deshidratación.</b></p> <p><b>Parámetros de la deshidratación</b></p> <p><b>Humedad en Alimentos</b></p>	<p><b>O. GENERAL</b></p> <p>Determinar el modelo cinética e isoterma de adsorción en la deshidratación de arracacha (<i>Arracacia xanthorrhiza B.</i>).</p>	<p><b>H. GENERAL</b></p> <p>Es posible determinar el modelo cinética e isoterma de adsorción en la deshidratación de la Arracacha (<i>Arracacia xanthorrhiza B.</i>).</p>	<p><b>V. DEPENDIENTE</b></p> <p><b>Y: Determinar el modelo cinético e isoterma de adsorción de la Arracacha deshidratada (<i>Arracacia xanthorrhiza B.</i>).</b></p>	<p>g de agua/ mss.</p> <p>g de agua/ <math>a_w</math></p>	<p>Modelo correccional experimental</p> <p><math>Y = f(X_1, X_2, X_3)</math>.</p> <p>Con mejor ajuste de datos.</p>			
<p><b>P. ESPECIFICOS</b></p> <p>¿Cómo evaluar el mecanismo y la cinética de la deshidratación de Arracacha?</p>		<p><b>O.ESPECIFICOS</b></p> <p>Evaluar el mecanismo y la cinética de deshidratación de la arracacha</p>	<p><b>H.ESPECIFICA</b></p> <p>Es factible evaluar el mecanismo y la cinética de deshidratación de la Arracacha</p>	<p><b>V.INDEPENDIENTE</b></p> <p><math>X_1</math>; Evaluar el mecanismo y la cinética de deshidratación de la Arracacha</p>			<p><b>INDICADORES</b></p> <p>V de aire/m<sup>3</sup> s °C</p> <p><math>T_w</math> (mh/ms)</p>	<p><b>METODOS O TECNICAS</b></p> <p>Método experimental correlacional</p> <p><math>V = f(\text{masa}, T, t, \text{HR})</math></p>	
<p>¿Cómo determinar la isoterma de adsorción de la Arracacha deshidratada?</p>		<p><b>Actividad de agua</b></p> <p><b>Isoterma de Sorcion</b></p> <p><b>Efecto de la temperatura, Humedad Relativa</b></p> <p><b>Análisis de datos experimentales.</b></p> <p><b>Tratamiento de datos experimentales</b></p>	<p>Determinar la isoterma de adsorción de arracacha deshidratada.</p> <p><b>Isoterma..</b></p>	<p>Es posible determinar la isoterma de adsorción de la Arracacha deshidratada.</p>			<p><b>X2: Determinar la isoterma de adsorción de la Arracacha deshidratada</b></p>	<p>g de agua/mss.</p> <p>T (=cte.).</p>	<p>Graficas de datos con Excel Isoterma</p>
<p>¿Cómo construir el modelo cinético e isoterma de adsorción en la deshidratación de la Arracacha?</p>		<p><b>Graficas de correlación</b></p> <p><b>Modelos matemáticos y/o software adecuados</b></p>	<p>Construir el modelo cinético e isoterma de adsorción en la deshidratación de arracacha</p>	<p>Es viable construir el modelo cinético e isoterma de adsorción en la deshidratación de la Arracacha.</p>			<p><b>X3: Construir el modelo cinético e isoterma de adsorción en la deshidratación de la Arracacha</b></p>	<p>Validación con modelos teóricos</p>	<p>Correlación y ajuste de parámetros cinéticos.</p>

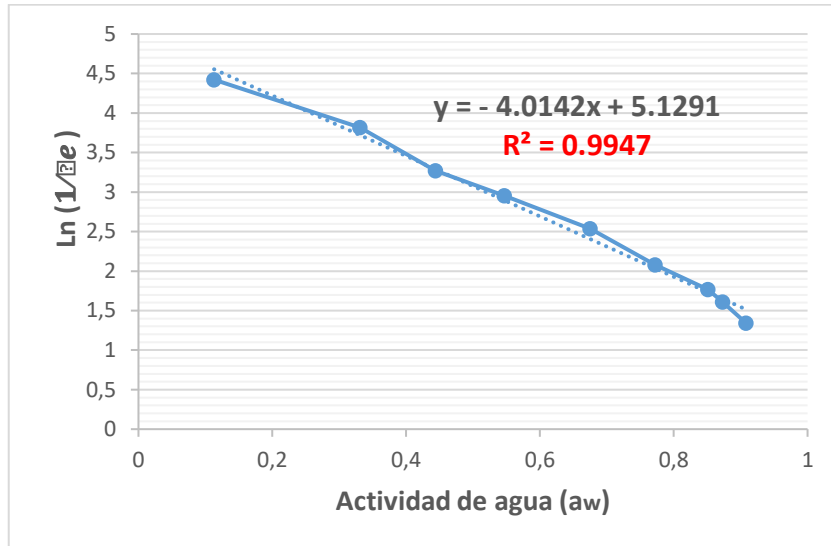




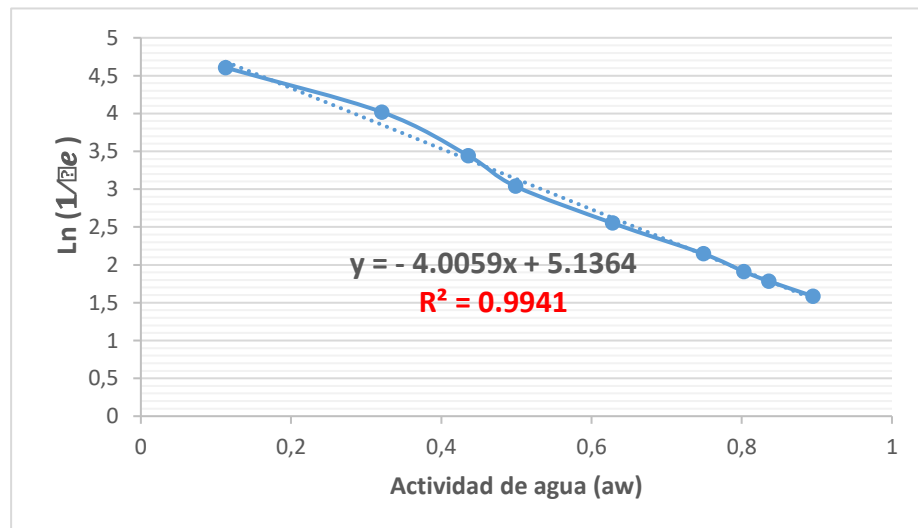
## Anexo B

Ajuste lineal de datos del modelo **Caurie** a 20°C y a 35°C

a). Regresión lineal del modelo matemático de **Caurie** a 20°C



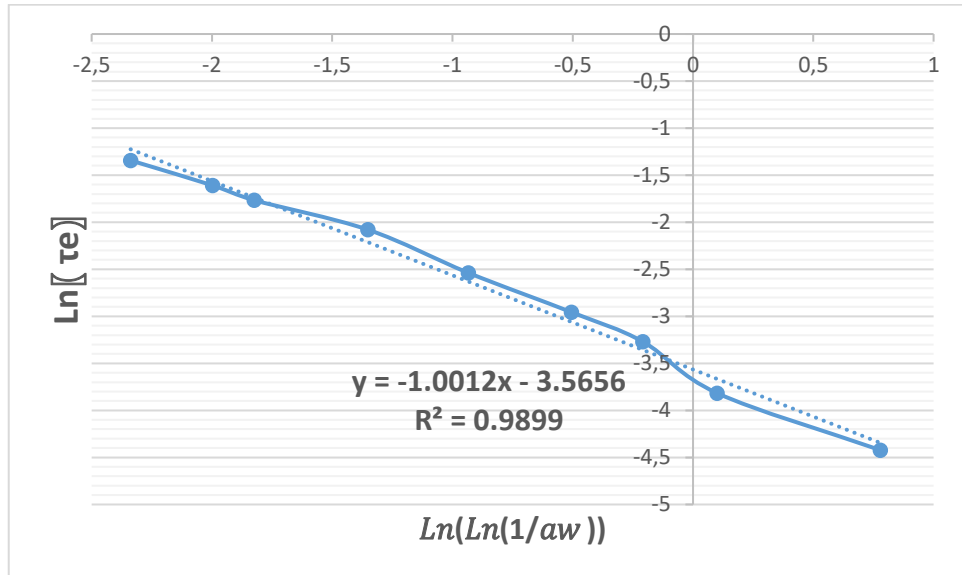
b). Regresión lineal del modelo matemático de **Caurie** a 35°C



## Anexo C

Ajuste lineal de datos del modelo **Halsey** a 20°C y a 35°C

a). Regresión lineal del modelo matemático de **Halsey** a 20°C



b). Regresión lineal del modelo matemático de **Halsey** a 35°C

