



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN  
NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE QUÍMICO FARMACOBIOLOGÍA**

**“EFECTO DEL TRATAMIENTO DE EXTRUSIÓN EN LA  
CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE AGUA EN CÁSCARA DE  
TAMARINDO (*Tamarindus indica* L)”**

# **TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
QUÍMICA FARMACOBIOLOGA**

**Presenta:**

**YVETTE RESENDIZ VILLAGÓMEZ**

**Director de Tesis:**

**D. C. HÉCTOR EDUARDO MARTÍNEZ FLORES**

**MORELIA, MICHOACÁN; NOVIEMBRE DE 2012**

## DEDICATORIA

A Florencio Resendiz Rodriguez y

Luis Alberto Resendiz Hurtado, mi abuelito y papá.. por su ejemplo, por su cariño y por ser quién soy.

María del Carmen, Karla y Beto mi mama y hermanos... quienes creen en mí.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que he conocido a lo largo de mi vida, y que me hicieron sentir su cariño, su apoyo y que me motivaron a realizar este trabajo de tesis.

Hay personas que nos ayudan a crecer en la vida, ya sea por su exigencia, su ejemplo o su cariño. He tenido la oportunidad de contar con muchas de ellas: Dr. Héctor Martínez, Dr. Raúl Cortes, Dr. Rodiles, Vianney, Eunice, Silvia, Claudia, Anatolio y Ana Rosa.

---

# 1. CONTENIDO

|                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>DEDICATORIA .....</b>                                             | <b>i</b>  |
| <b>AGRADECIMIENTOS .....</b>                                         | <b>ii</b> |
| <b>1. CONTENIDO.....</b>                                             | <b>1</b>  |
| 1.1. Índice de figuras.....                                          | 2         |
| 1.2. Índice de tablas.....                                           | 3         |
| <b>2. LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>                                 | <b>6</b>  |
| <b>3. RESUMEN.....</b>                                               | <b>7</b>  |
| <b>4. ABSTRACT.....</b>                                              | <b>8</b>  |
| <b>5. ANTECEDENTES .....</b>                                         | <b>9</b>  |
| 5.1. Residuos Agroindustriales.....                                  | 9         |
| 5.2. El proceso de extrusión.....                                    | 10        |
| 5.3. Fibra dietética .....                                           | 11        |
| 5.3.1. Tamarindo ( <i>Tamarindus indica</i> ) .....                  | 13        |
| 5.3.2. Limón criollo ( <i>Citrus aurantifolia</i> Swingle) .....     | 14        |
| 5.3.3. Metamucil Natural ( <i>Plantago psyllium</i> ).....           | 16        |
| 5.4. Distribución del agua en los alimentos.....                     | 18        |
| 5.5. Adsorción .....                                                 | 20        |
| 5.5.1. Tipos de adsorción.....                                       | 22        |
| 5.5.2. Fisisorción.....                                              | 23        |
| 5.5.3. Quimisorción .....                                            | 23        |
| 5.5.4. Equilibrio en la adsorción .....                              | 26        |
| 5.6. Tipos de Isotermas .....                                        | 27        |
| 5.7. Modelos que describen la cinética del proceso de adsorción .... | 29        |
| 5.6.1. Modelo cinético de primer orden (Lagergren) .....             | 29        |
| 5.6.2. Modelo de Elovich.....                                        | 30        |
| 5.6.3. Modelo de pseudo-segundo orden .....                          | 30        |
| <b>6. JUSTIFICACIÓN .....</b>                                        | <b>32</b> |
| <b>7. HIPÓTESIS .....</b>                                            | <b>33</b> |
| <b>8. OBJETIVOS.....</b>                                             | <b>34</b> |

---

|                                                                                      |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>8.1. Objetivo general.....</b>                                                    | <b>34</b> |
| 8.1.1. Objetivos específicos .....                                                   | 34        |
| <b>9. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>                                                 | <b>34</b> |
| <b>9.1. Materiales y Equipos .....</b>                                               | <b>34</b> |
| <b>9.2. Materiales Biológicos.....</b>                                               | <b>35</b> |
| <b>9.3. Métodos .....</b>                                                            | <b>37</b> |
| 9.3.1. Determinación de humedad (Método 934.01, AACC 2000) .....                     | 37        |
| 9.3.2. Carbohidratos totales método del fenol-sulfúrico (Dubois <i>et al</i> , 1956) |           |
| 9.3.3. Tamaño y diámetro medio de partícula.....                                     | 38        |
| 9.3.4. Preparación de soluciones salinas saturadas .....                             | 38        |
| <b>9.4. Análisis de datos .....</b>                                                  | <b>39</b> |
| <b>10. RESULTADOS .....</b>                                                          | <b>41</b> |
| 10.1. Tamaño de partícula.....                                                       | 41        |
| 10.2. Fracciones de fibra en las muestras ensayadas .....                            | 42        |
| 10.3. Determinación humedad y actividad de agua iniciales .....                      | 42        |
| 10.4. Microatmósferas de humedad.....                                                | 43        |
| 10.5. Cinéticas de sorción de agua.....                                              | 44        |
| <b>11. CONCLUSIÓN .....</b>                                                          | <b>72</b> |
| <b>12. BIBLIOGRAFÍA.....</b>                                                         | <b>73</b> |

## 1.1. Índice de figuras.

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Esquema de un extrusor. Tomada de: (Apró <i>et al.</i> , 2000).....           | 11 |
| Figura 2. Fruto del tamarindo. ....                                                     | 13 |
| Figura 3. Variedad de limón. ....                                                       | 15 |
| Figura 4. Semilla de plantago y la fibra de metamucil. ....                             | 16 |
| Figura 5. Cambios que ocurren en los alimentos en función de la actividad de agua. .... | 18 |
| Figura 6. Isotermas de adsorción y desorción de agua de los alimentos. ....             | 19 |

---

|                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 7. Esquema que ilustra la diferencia entre el adsorbente, el adsorbato y el adsorbtivo.....                                         | 21 |
| Figura 8. Esquema del proceso de fisisorción.....                                                                                          | 23 |
| Figura 9. Esquema del proceso de quimisorción.....                                                                                         | 24 |
| Figura 10. Los seis tipos de isothermas de adsorción (fisisorción) según la clasificación de la IUPAC. ....                                | 27 |
| Figura 11. Cinéticas de sorción de agua de muestras control y muestras extruidas a 11%HR y a 25°C (A), 35°C (B) y 45°C (C). ....           | 45 |
| Figura 12. Cinéticas de sorción de agua de muestras control y muestras extruidas a 40%HR y a 25°C (A), 35°C (B) y 45°C (C). ....           | 46 |
| Figura 13. Cinéticas de adsorción de agua de muestras control y muestras extruidas a 77%HR/45°C. ....                                      | 49 |
| Figura 14. Cinéticas de adsorción de agua de muestras control y muestras extruidas a 90%HR/45°C. ....                                      | 50 |
| Figura 15. Gráficos del efecto individual y de la interacción de los factores (humedad y temperatura) sobre las variables respuesta.. .... | 53 |
| Figura 16. Gráficos del efecto individual y de la interacción de los factores (humedad y temperatura) sobre las variables respuesta.. .... | 53 |
| Figura 17. Gráficos del efecto individual y de la interacción de los factores (humedad y temperatura) sobre las variables respuesta. ....  | 54 |
| Figura 18. Isothermas de adsorción de las muestras extruidas (39%/90°C, 39%100°C, 39%110°C) a 25, 35 y 45°C .....                          | 67 |
| Figura 19. Isothermas de adsorción de las muestras extruidas (32%/90°C, 32%100°C, 32%110°C) a 25, 35 y 45°C .....                          | 68 |
| Figura 20. Isothermas de adsorción de las muestras control (CTN, CLN, y MN) a 25, 35 y 45°C .....                                          | 69 |

## 1.2. Índice de tablas

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Composición del Tamarindo ( <i>Tamarindus indica</i> ). .... | 14 |
| Tabla 2. Composición de limón criollo.....                            | 16 |

---

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 3. Composición del metamucil natural.....                                                                                                 | 17 |
| Tabla 4. Diferencias entre la quimisorción y fisisorción.....                                                                                   | 24 |
| Tabla 5. Condiciones de extrusión de la cáscara de tamarindo. ....                                                                              | 35 |
| Tabla 6. Distribución de partícula del polvo de MN, CLN, CTN.....                                                                               | 41 |
| Tabla 7. Composición de FD, FI, FS y Carbohidratos de las muestras.....                                                                         | 42 |
| Tabla 8. Características fisicoquímicas de las diferentes muestras utilizadas. ....                                                             | 43 |
| Tabla 9. Microatmósferas generadas por los diferentes tipos de sales.....                                                                       | 43 |
| Tabla 10. Valores promedios de sorción de humedad de equilibrio en las muestras vs tiempo en horas para las nueve muestras a las 48 h. ....     | 44 |
| Tabla 11. Valores promedios de sorción de humedad de equilibrio en las muestras vs tiempo en horas para las nueve muestras a las 168 horas..... | 44 |
| Tabla 12. Valores promedios de sorción de humedad en las muestras vs tiempo en horas para las nueve muestras a las 48 h.....                    | 48 |
| Tabla 13. Valores promedios de sorción de humedad en las muestras vs tiempo en horas para las nueve muestras a las 168 h.....                   | 48 |
| Tabla 14. Efecto individual y de la interacción de los factores (humedad y temperatura) sobre las variables respuesta. ....                     | 53 |
| Tabla 15. Efecto individual y de la interacción de los factores (humedad y temperatura) sobre las variables respuesta. ....                     | 54 |
| Tabla 16. Efecto individual y de la interacción de los factores (humedad y temperatura) sobre las variables respuesta. ....                     | 54 |
| Tabla 17. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R). ....      | 55 |
| Tabla 18. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R). ....      | 56 |
| Tabla 19. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R). ....      | 57 |
| Tabla 20. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R). ....      | 58 |
| Tabla 21. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R). ....      | 59 |

---

---

|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 22. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R). ..... | 60 |
| Tabla 23. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R). ..... | 61 |
| Tabla 24. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R). ..... | 62 |
| Tabla 25. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R). ..... | 63 |
| Tabla 26. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R). ..... | 64 |
| Tabla 27. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R). ..... | 65 |
| Tabla 28. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R). ..... | 66 |



---

## 2. LISTA DE ABREVIATURAS

|                                                 |   |                                                 |
|-------------------------------------------------|---|-------------------------------------------------|
| $a_w$                                           | - | Actividad de agua                               |
| CHO'S                                           | - | Carbohidratos totales                           |
| CLN                                             | - | Cáscara de limón natural                        |
| CTE1                                            | - | Cáscara de tamarindo extruida a 39%/90°C/15rpm  |
| CTE2                                            | - | Cáscara de tamarindo extruida a 39%/100°C/15rpm |
| CTE3                                            | - | Cáscara de tamarindo extruida a 39%/110°C/15rpm |
| CTE4                                            | - | Cáscara de tamarindo extruida a 32%/90°C/15rpm  |
| CTE5                                            | - | Cáscara de tamarindo extruida a 32%/100°C/15rpm |
| CTE6                                            | - | Cáscara de tamarindo extruida a 32%/110°C/15rpm |
| CTN                                             | - | Cáscara de tamarindo natural                    |
| FD                                              | - | Fibra Dietética total                           |
| FI                                              | - | Fibra insoluble                                 |
| FS                                              | - | Fibra soluble                                   |
| HR                                              | - | Humedad relativa                                |
| MN                                              | - | Metamucil Natural                               |
| Xeq                                             | - | Humedad de equilibrio                           |
| UV                                              | - | Ultravioleta                                    |
| LiCl                                            | - | Cloruro de litio                                |
| MgCl <sub>2</sub>                               | - | Cloruro de Magnesio                             |
| NaNO <sub>2</sub>                               | - | Nitrito de Sodio                                |
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | - | Sulfato de Amonio                               |

---

### 3. RESUMEN

En este trabajo se evaluó el efecto de la temperatura, humedad y contenido de fibra soluble (FS) sobre la capacidad de adsorción de agua.

Se determinaron las isothermas de adsorción de humedad en cáscara de limón natural (CLN), Metamucil natural (MN), Cáscara de tamarindo natural (CTN) y muestras extruidas de cáscara de tamarindo a 25, 35 y 45°C mediante el método gravimétrico en el intervalo de actividad de agua de 0.11 y 0.90. Las cáscaras expuestas alcanzan rápidamente el equilibrio de adsorción. A baja actividad de agua (HR) 0.11 y 0.40 las cáscaras ceden humedad al medio; a partir de rangos de actividad de agua superiores a 0.70 manifiestan su capacidad de adsorción. Los valores experimentales se ajustaron mediante los modelos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich. Las isothermas obtenidas presentaron una forma sigmoidea (tipo IV). El contenido de humedad de equilibrio ( $X_{eq}$ ) disminuyó con el incremento de la temperatura para un valor determinado de actividad de agua.

---

## 4. ABSTRACT

This study evaluated the effect of temperature, moisture and soluble fiber content (FS) on the water adsorption capacity.

Were determined adsorption isotherms moisture natural lemon peel (CLN), Metamucil natural (MN), tamarind peel natural (CTN) and extruded samples tamarind shell at 25, 35 and 45 ° C using the gravimetric method in the water activity range of 0.11 and 0.90. The shells exposed quickly reach adsorption equilibrium. A low water activity (HR) 0.11 and 0.40 yield humidity to the half shells; ranges from water activity above 0.70 manifest their adsorption capacity. The experimental values of the models fitted by Lagergren, pseudo second order and Elovich. The isotherms obtained showed a sigmoid shape (type IV). The equilibrium moisture content ( $X_{eq}$ ) decreased with increasing temperature for a given water activity.

---

## 5. ANTECEDENTES

### 5.1. Residuos Agroindustriales

En el proceso productivo de alimentos, además del producto deseado a partir de materias primas, se generan subproductos y residuos; cada uno de los cuales pueden servir tanto para consumo humano y/o animal, como para su empleo en procesos industriales. La reutilización de estos residuos industriales traería beneficios económicos y ambientales, sin embargo, la mayoría de las industrias no tiene algún plan para reutilizar estos residuos, debido a que su tratamiento representa un alto costo, y es por ello que prefieren ubicarlos junto con la basura en los vertederos o rellenos sanitarios (Méndez, 1995).

Entre los residuos de la agroindustria se encuentran los provenientes del procesamiento de frutas, verduras y cereales, entre los que podemos encontrar cáscaras, semillas, tallos, hojas y bagazos. Con un perfeccionamiento y creación de técnicas, y la implementación de una correcta metodología, los residuos agroindustriales pueden ser utilizados como alimentos y/o abonos, para la obtención de biogás y en la extracción de aceites esenciales, pectinas, flavonoides, entre otros. Una de estas herramientas es la biotecnología, que permite la bio-conversión de residuos agroindustriales en productos de interés comercial mediante procesos de extracción directos o de transformación por química microbológica (Moldes *et al.*, 2002)

La búsqueda de materias primas de bajo costo y fácil adquisición que puedan ser utilizados como sustratos fermentables (fuentes de C o N) constituye uno de los retos más interesantes de la biotecnología actual (Rivas *et al.*, 2004). Es así como los residuos de fibras y extractos de hojas se han usado para la fabricación de

---

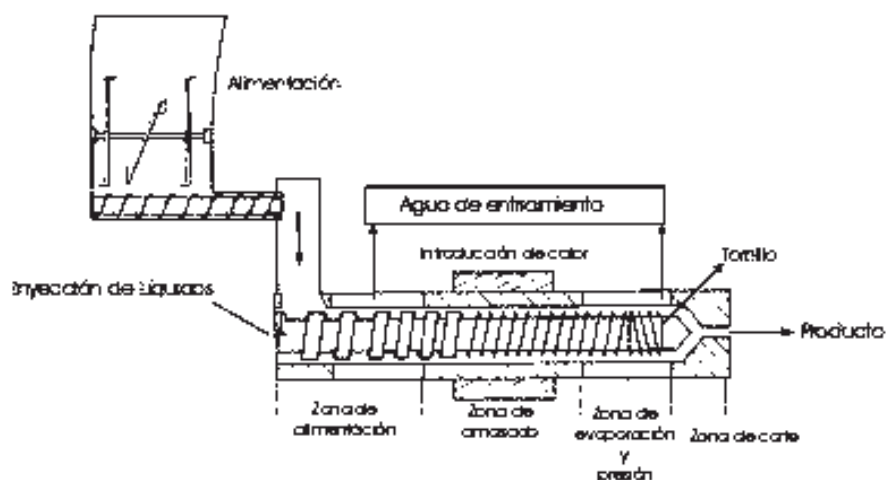
materiales compuestos y resinas termoplásticas (Tronc *et al.*, 2007); y para la extracción de ligninas, productos esteroideos (saponinas), etanol, celulosa glucósidos.

## **5.2. El proceso de extrusión**

La extrusión de alimentos es un proceso en el que el material (grano, harina o subproducto) es forzado a fluir, bajo una o más de una variedad de condiciones de mezclado, calentamiento y cizallamiento, a través de una placa/boquilla diseñada para dar forma o expandir los ingredientes. Con los objetivos de cocción, pasteurización, reducción de humedad, homogenización y reestructuración (Apró *et al.*, 2000).

La extrusión ha tenido una gran aplicación en el proceso de alimentación; productos como pastas, harinas, cereales, la comida para bebé, las papas fritas y la comida seca, entre otros, son principalmente manufacturados por métodos de extrusión. En el proceso, se muelen los materiales hasta darles el tamaño correcto a las partículas. La mezcla seca se pasa a través de un pre-acondicionador donde se pueden agregar otros ingredientes que dependen de las características que se desean obtener del producto. La mezcla pre-acondicionada se pasa entonces a través de un extrusor, forzándola a pasar por un troquel donde se corta a la longitud deseada. El proceso de cocción tiene lugar dentro del extrusor en el que el producto produce su propia fricción y calor debido a la presión generada.

El producto final extruido, tiene bajo contenido de humedad y se considera un producto estable en almacén.



**Figura 1. Esquema de un extrusor.** Tomada de: (Apró *et al.*, 2000).

Con el empleo del proceso de extrusión se han podido modificar algunas propiedades de los residuos agroindustriales, lo que ha permitido que estos tengan una nueva aplicación al proporcionarles características como: la inactivación de algunas enzimas que participan en procesos de su descomposición, la destrucción de toxinas y disminución de microorganismos, así como el aumento en la biodisponibilidad de algunos elementos esenciales y cantidad de fibra soluble en algunas fibras como las obtenidas de las cáscaras de limón y tamarindo (Aguilar, 2012).

### 5.3. Fibra dietética

La fibra dietética (FD), tradicionalmente considerada como un carbohidrato, puede dividirse en dos grupos principales según sus características químicas y sus efectos en el organismo. Estos dos tipos son: fibra insoluble (FI) y fibra soluble (FS), clasificación desde el punto de vista biológico que se basa en el grado de solubilidad en el agua de los componentes de la FD (Prosky *et al.*, 1988).

---

La FI no se disuelve en agua, tienen una parcial hidratación y almidón resistente, que retienen poca agua y se hinchan poco a poco. Los componentes de la FI son poco fermentables y resisten la acción de los microorganismos del intestino. Su principal efecto en el organismo es aumentar el volumen de las heces, disminuir su consistencia y su tiempo de tránsito a través del tubo digestivo. La FI se encuentra principalmente en los alimentos derivados de cereales integrales, especialmente del trigo. La FI la conforman la hemicelulosa, celulosa lignina, el almidón resistente (Martínez y Figueroa, 2008), compuestos fenólicos como los taninos y estructuras lipídicas como las ceras, suberinas y cutinas (Priego-Mendoza, 2007). Como consecuencia la FI, al ingerirse diariamente, facilita las deposiciones y previene el estreñimiento (Brown *et al.*, 1999).

La FS capta agua, forma geles viscosos y es altamente fermentable por los microorganismos intestinales. Al ser fermentables favorece la creación de flora bacteriana benéfica que compone una tercera parte del volumen fecal, aumentando el volumen de las heces y disminuyendo su consistencia.

La FS además de captar agua, disminuye y hace lenta la absorción de grasas y azúcares de los alimentos, lo que contribuye a regular los niveles de colesterol y de glucosa en sangre (Ramírez y Pacheco-de Delahaye, 2009). Algunos componentes de las FS son las pectinas, los  $\beta$ -glucanos, las gomas, la inulina, mucílagos (Martínez y Figueroa, 2008) y agentes quelantes como los fitatos (Priego, 2007). Para que la FD pueda cumplir satisfactoriamente sus propiedades funcionales al interior del tracto gastrointestinal, deben de presentar algunas propiedades físico-químicas; López *et al.* (1997) las describen como propiedades de hidratación, viscosidad, capacidad de absorción de aceite y capacidad de intercambio iónico.

El tallo, la piel, el salvado o afrecho y la cáscara de las plantas constituyen fuentes ricas en FD. Los cereales integrales y los productos derivados de los mismos

---

(integral), las hortalizas hojosas, los tubérculos, las frutas y las nueces son alimentos que contienen FD (Fox y Cameron, 2002).

La FD también se encuentra en los subproductos de la industria como los del tamarindo que presenta un alto contenido de FD que es el 58% (Tabla 1), el limón criollo con un 34.19% (Tabla 2) y metamucil natural con 49.09% (Tabla 3) (Aguilar, 2012; Marín, 2011; Maya, 2009).

### 5.3.1. Tamarindo (*Tamarindus indica*)

Es una leguminosa perteneciente a árboles de gran tamaño, es originario del continente Africano y producido en India, Tailandia, México, Brasil, Belice, Guatemala, Costa Rica y otros países de América Central, Sudamérica, Asia y África (Aceves *et al.*, 2008).



**Figura 2. Fruto del tamarindo.**

Tomada de: <http://princessnancyflor.blogspot.mx/2010/08/porque-lo-pidieronmas-sobre-el.html>

En México, el tamarindo es un cultivo de importancia económica principalmente en la región del trópico seco (Orozco, 2006). En el año 2004 se cultivaron más de 8,000 hectáreas en nuestro país, principalmente en los estados de Colima, Jalisco, Guerrero, Michoacán, Oaxaca, Veracruz y Chiapas obteniendo producciones



anuales del fruto de 38,000 ton con un valor de la producción de 134 millones de pesos (Orozco, 2006).

**Tabla 1. Composición del Tamarindo (*Tamarindus indica*)**

| Componentes                                                          | Cantidad      |
|----------------------------------------------------------------------|---------------|
| Fibra dietética total (FD), de las cuales corresponden a la FI y FS: | 58.00 ± 0.69  |
| Fibra insoluble (FI), que se distribuye de la siguiente manera:      | 56.8 ± 0.53   |
| Celulosa                                                             | 24.9          |
| Lignina                                                              | 18.17         |
| Hemicelulosa                                                         | 13.6          |
| ... Otros                                                            | 0.13          |
| Fibra soluble (FS), que se distribuye de la siguiente manera:        | 1.2 ± 0.35    |
| Pectina                                                              | 0.93 ± 0.1    |
| ....Otros                                                            | 0.27          |
| Extracto libre de nitrógeno                                          | 35.24         |
| Cenizas                                                              | 3.6 ± 0.02    |
| Proteínas                                                            | 2.43 ± 0.19   |
| Extracto Etéreo                                                      | 0.73 ± 0.12   |
| Polifenoles totales (mg EAG/g)                                       | 19.86 ± 2     |
| Taninos (mg Ecatequina/g)                                            | 90.16 ± 15.77 |
| Flavonoides (mg Erutina/g)                                           | 13.54 ± 0.09  |

(Aguilar, 2012)

El tamarindo (Figura 2) es considerado una planta multipropósito debido a los diversos usos que tienen sus raíces, madera, hojas, frutos, semillas y cáscara de la vaina en la elaboración de alimentos, fármacos y medicina herbolaria (Parrotta, 1990; El-Siddig *et al.*, 2006 y De Caluwé *et al.*, 2010).

### 5.3.2. Limón criollo (*Citrus aurantifolia* Swingle)

Pertenece a la familia de las *Rutaceae*; es un árbol vigoroso, de porte erguido, con brotes color púrpura que después cambian a verde. Su pulpa es verde-amarillenta, jugosa, con semillas y más ácida que las limas. La fruta tiene una corteza suave y

---

con una piel verde cuando está inmadura y más amarilla en su madurez, con una papila apical (Figura 2) (Marín, 2011).



**Figura 3. Variedad de limón.**

Tomada de: <http://elrincondeneta.blogspot.mx/2012/01/limon-para-adelgazar.html>

La producción de limón en México se lleva a cabo durante todo el año, Michoacán es el segundo estado productor de limón criollo en el país, contribuyendo entre 350 y 405 mil toneladas por año (Anónimo, 2009); los municipios involucrados en la producción de este fruto son principalmente Aguililla, Apatzingán, Tepalcatepec, Buena Vista y Parácuaro.

Es un fruto en el cual se utilizan tanto las hojas como la pulpa, con infinidad de usos, en diversos ámbitos tales como en gastronomía, como fuentes medicinales, cosméticos, en la producción de aceites esenciales y pectinas.

En estudios recientes a la cáscara de limón se le han atribuido propiedades biosorbentes en el tratamiento de aguas residuales (Marín, 2011). Se ha demostrado que la pectina presente en algunos biosorbentes, cómo las cáscaras de cítricos, juegan un papel importante en la biosorción de metales como el plomo, cadmio, cobre, níquel, zinc y estroncio, entre otros (Aguilar, 2009). Experimentos recientes han mostrado que la cáscara de limón remueve metales como plomo y cadmio (Millan ,2008).

---

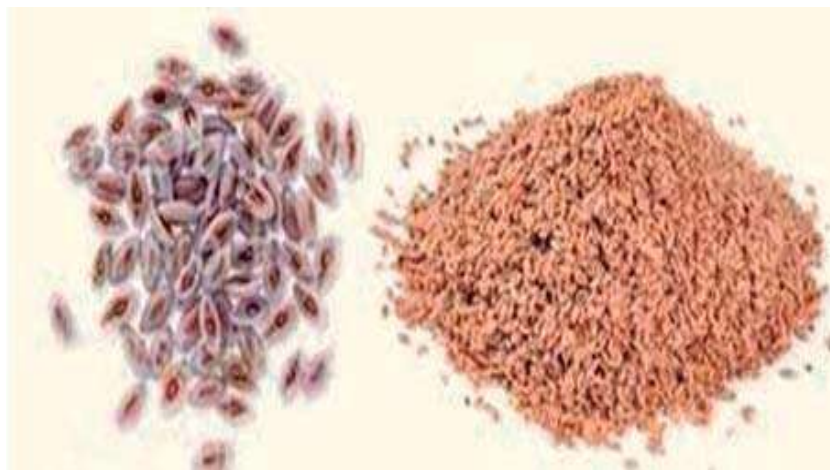
**Tabla 2. Composición de limón criollo**

| Componente            | %     |
|-----------------------|-------|
| Humedad               | 6.9   |
| Cenizas               | 3.61  |
| Fibra dietética total | 34.19 |
| Fibra soluble         | 38.37 |
| Fibra insoluble       | 61.63 |
| Celulosa              | 8.3   |
| Hemicelulosa          | 9.6   |
| Lignina               | 16.1  |
| Pectina               | 8.6   |
| Carbohidratos totales | 4.75  |
| Proteínas totales     | 9.2   |

(Marín, 2010)

### 5.3.3. Metamucil Natural (*Plantago psyllium*)

El metamucil es una FD comercial, la cual contiene un 50% de FD que es derivada de la semilla de *Plantago ovata*, es una planta nativa de Asia, de la región del Mediterráneo y del Norte de África, que se desarrolla en suelos arenosos y enlodados.



**Figura 4. Semilla de plantago y la fibra de metamucil.**

---

El psyllium es cultivado en India y Paquistán. La India suministra un 85% del psyllium disponible en el mercado mundial siendo los Estados Unidos el mayor importador en el mundo, es fuente de FI y FS ([metamucil.com.mx/porque.php](http://metamucil.com.mx/porque.php)).

Los efectos fisiológicos de la FD se relacionan con sus propiedades fisicoquímicas y tecnológicas, como son la capacidad de retención de agua, capacidad de hinchamiento, viscosidad, formación de gel, capacidad de ligar sales biliares y aceite. Estas propiedades dependen de su relación FI/FS, tamaño de partícula, condiciones de extracción y fuente vegetal (Figuerola *et al.*, 2008).

**Tabla 3. Composición del metamucil natural**

| Componente                 | Cantidad (%) |
|----------------------------|--------------|
| Humedad                    | 4.6          |
| Cenizas                    | 1.70         |
| Proteína                   | 0.89         |
| Extracto etéreo            | 2.87         |
| Fibra dietética total (FD) | 49.09        |
| Fibra Insoluble (FI)       | 19.42        |
| Fibra Soluble (FS)         | 33.3         |
| Carbohidratos totales      | 37.36        |

La FS en contacto con el agua forma un retículo o *gel* donde esta queda atrapada, originándose soluciones de gran viscosidad, mientras que la FI es capaz de retener el agua en su matriz estructural formando mezclas de baja viscosidad (Escudero y González, 2006).

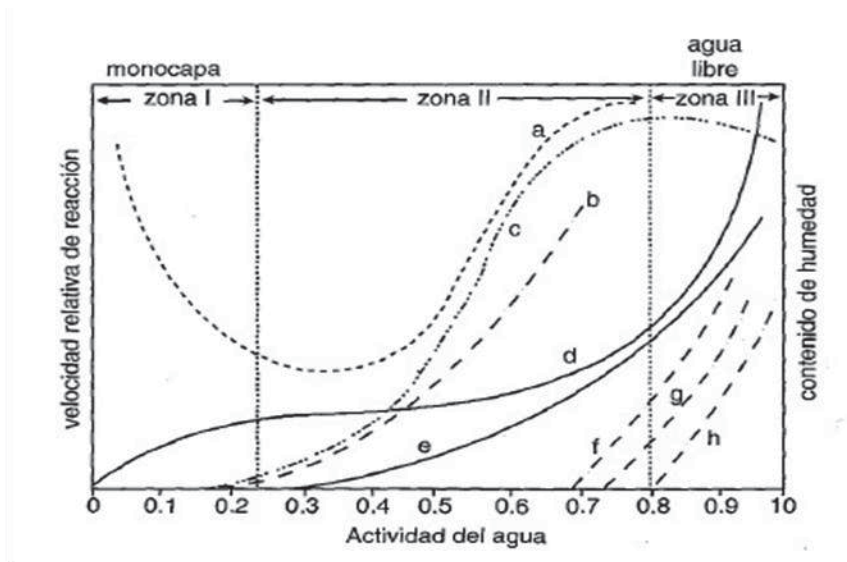
Estas propiedades de hidratación de la FD determinan el nivel óptimo de uso en los alimentos debido a la textura que se desea obtener (Raghavendra *et al.*, 2006). Las propiedades de hidratación de un ingrediente rico en FD son cruciales para su aplicación satisfactoria en alimentos que serán sometidos a stress físico, como sucede, por ejemplo, en la extrusión de cereales (Wong y Cheung, 2005).

## 5.4. Distribución del agua en los alimentos

El contenido de agua de un alimento se refiere en general, a toda el agua de manera global. Sin embargo, en los tejidos animal y vegetal el agua no está uniformemente distribuida por varias razones, por ejemplo, debido a los complejos hidratados que se producen con proteínas, a los hidratos de carbono y otros; son las diversas estructuras internas propias de cada tejido, como los microcapilares que se forman, a su incompatibilidad con los lípidos que no permiten su presencia.

Esta situación de heterogeneidad de la distribución del agua también se presenta en productos, debido a que sus componentes se encuentran en distintas formas de dispersión.

Por estas razones, en los alimentos existen diferentes estados energéticos en los que se encuentra el agua; no toda el agua de un producto tiene las mismas propiedades fisicoquímicas.



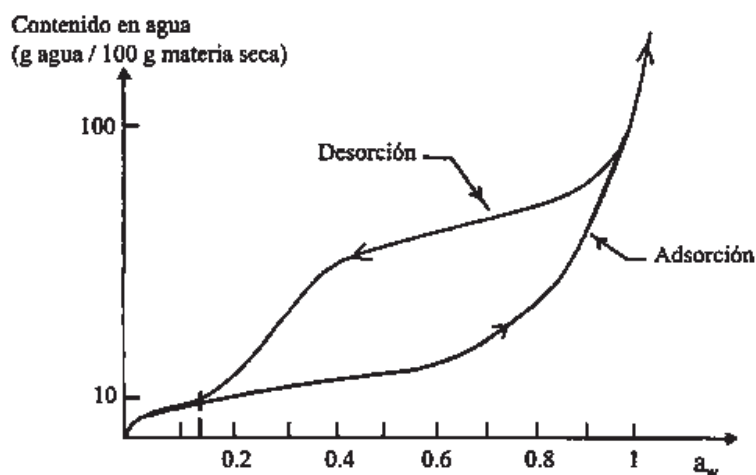
**Figura 5. Cambios que ocurren en los alimentos en función de la actividad de agua.** a) oxidación de lípidos; b) reacciones hidrolíticas; c) oscurecimiento enzimático; d) isoterma de adsorción; e) actividad enzimática; f) crecimiento de hongos; g) crecimiento de levaduras, h) crecimiento de bacterias. Las propiedades coligativas, reológicas y de textura de un alimento dependen de su contenido de agua, aun cuando éste también influye definitivamente en las reacciones físicas, químicas, enzimáticas y microbiológicas (Badui, 1998).

---

La actividad de agua ( $a_w$ ) es una medida de la cantidad de agua disponible (agua libre) de un alimento capaz de propiciar el crecimiento microbiano o las reacciones químicas y enzimáticas (Badui, 1999). De acuerdo con Sanni *et al.* (1997), el conocimiento de la relación de la  $a_w$  y el contenido de humedad de equilibrio ( $X_{eq}$ ) de los materiales alimenticios es importante para predecir los cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas que ocurren durante el almacenamiento y transformación.

La humedad de equilibrio se define como el contenido de humedad de un material higroscópico después de estar expuesto a un ambiente en condiciones controladas de temperatura y humedad relativa, durante un lapso prolongado.

Fuentes (1996), define la isoterma de sorción como la relación entre la actividad de agua (o la humedad relativa del aire circundante) y el contenido de humedad de un material en equilibrio a temperatura constante, la cual se obtiene cuando el proceso de equilibrio parte de una muestra húmeda/seca, y a esta se le permite equilibrarse con la humedad del aire circundante perdiendo o ganando humedad, reflejando así la forma como el agua se liga a sistema.



**Figura 6.** Isotermas de adsorción y desorción de agua de los alimentos (Martínez-Navarrete 1998).

---

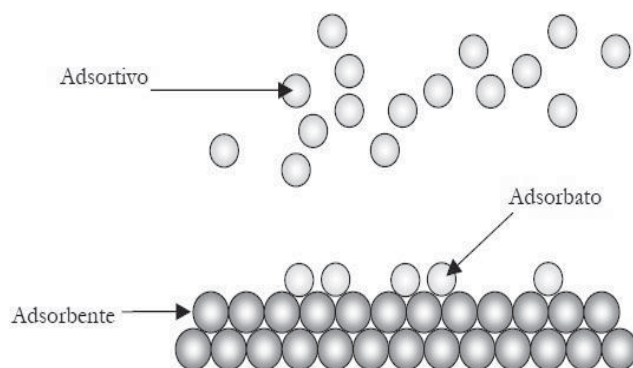
La isoterma de sorción de agua (o de otro determinado componente) relaciona, a una temperatura constante, el contenido de humedad (u otro componente) de equilibrio (Kg agua/kg materia seca) con la actividad termodinámica del agua (o del componente correspondiente) en el producto en un intervalo dado de humedad o actividad. Cabe recordar que en el equilibrio la actividad de agua es igual a la humedad relativa del aire que rodea al producto a una determinada temperatura. Por lo tanto, la  $a_w$  se puede expresar como humedad relativa de equilibrio.

La isoterma de sorción de agua es una forma adecuada de analizar el grado de interacción del agua con el sustrato. Normalmente se puede dividir en tres intervalos en función de la  $a_w$ : agua fuertemente ligada correspondiente a una  $a_w$  de 0.2-0.3 ó inferior, agua moderadamente ligada ( $a_w = 0.3-0.7$ ) y agua poco ligada correspondiente a una  $a_w$  de 0.7-0.8 y superior (Martínez, 1998).

El comportamiento a través de las isotermas de sorción, describe la cantidad de adsorbato adherido sobre la superficie del sólido, en función de la cantidad inicial o de la concentración en equilibrio del mismo, siempre a temperatura constante, representando uno o más de los siguientes fenómenos: captación en multicapas y condensación en poros (o capilares) (Salinas, 2011).

## 5.4. Adsorción

La adsorción es definida por la IUPAC como el enriquecimiento (adsorción positiva) o el vaciamiento (adsorción negativa) de uno o más componentes en una interfase. McBain, en 1909 propuso el término *sorción* para abarcar tres tipos de fenómenos: la adsorción sobre las superficies, la absorción dentro del sólido y la condensación capilar que ocurre en el interior de los poros.



**Figura 7. Esquema que ilustra la diferencia entre el adsorbente, el adsorbato y el adsorativo.**

Se llama adsorbente a la sustancia (normalmente sólido microporoso) sobre la que selectivamente se fija otra (gas/líquido) que recibe el nombre de adsorbato. Aunque uno de los casos de mayor interés es el correspondiente a adsorbentes sólidos y adsorbatos gaseosos. Numerosas experimentaciones han demostrado que para un mismo sistema, en iguales condiciones, la adsorción es proporcional a la superficie del adsorbente (Ahachad *et al.*, 2005).

Se trata, pues de un fenómeno superficial, que ocurre en la interface, en el cual las moléculas de adsorbato se fijan sobre la superficie del adsorbente en virtud de diversas fuerzas intermoleculares sin balancear que entran en juego y se deben, fundamentalmente, a la asimetría de fuerzas que existe en toda interface, por lo cual atraen a las moléculas de otras sustancias con las que se ponen en contacto, equilibrando de esta manera las fuerzas atractivas y disminuyen la energía superficial. La interface puede ser: sólido-gas, sólido-líquido, líquido-gas, líquido-líquido.

La cantidad de soluto adsorbido es una función de la naturaleza y área específica superficial del adsorbente y del soluto, así como la presión ó concentración de este último y de la temperatura del sistema.



---

Las superficies de los sólidos se encuentran a menudo en contacto con gases. Cuando eso ocurre, las moléculas del gas interactúan entre sí y con la superficie sólida o sustrato.

En determinadas circunstancias, esa doble interacción promueve la aparición de una capa líquida en la superficie del sustrato, en particular cuando el gas está casi saturado de alguna de las sustancias que lo componen (Razcón, 2012).

La superficie desempeña un papel importante en los procesos de sorción ya que esta puede ser externa o interna. La primera es la que constituye el límite físico del sólido. Cuando se desea que ésta juegue un papel importante en el fenómeno de sorción se recurre a la utilización del material en forma de polvo muy fino. Esta superficie externa nunca es del todo regular a escala molecular. Costa de numerosas rugosidades, prominencias, defectos, etc. Que la hacen mayor de lo que podría calcularse macroscópicamente. La superficie interna corresponde a los poros que tenga el material. El sistema de poros puede ser muy extenso, llegando a ser en ocasiones de varios órdenes de magnitud superior a la superficie externa. El tamaño de los poros, y en particular su diámetro, es muy variable. Convencionalmente se dividen en macroporos (diámetro  $>200 \text{ \AA}$ ), microporos ( $<15 \text{ \AA}$ ), y mesoporos (diámetro intermedio). El tamaño de los poros posee considerable importancia, ya que para que su superficie pueda adsorber, es preciso que las moléculas de adsorbato puedan pasar a través de estos.

#### **5.4.1. Tipos de adsorción**

Según la diferente naturaleza de las fuerzas de atracción adsorbato-adsorbente, pueden distinguirse dos tipos de adsorción: fisisorción (adsorción física) y quimisorción (adsorción química). Normalmente la fisisorción se caracteriza por una mayor velocidad del proceso de sorción que la quimisorción y por no presentar generalmente energía de activación. No obstante, esto no siempre es

---

cierto, ya que en algunas ocasiones la fisisorción aparece con una pequeña energía de activación como consecuencia de la competencia entre moléculas interactivas por los sitios activos del adsorbente.

### 5.4.2. Fisisorción

Es un proceso fácilmente reversible en el cual las moléculas adsorbidas se fijan en la superficie del adsorbente debido a fuerzas intermoleculares de atracción conocidas como fuerzas de Van der Waals. La sustancia adsorbida (fisisorbida) conserva su naturaleza química. Cuando las fuerzas de atracción intermoleculares entre un sólido y un gas son mayores que las existentes entre moléculas del gas mismo, el gas se condensa sobre la superficie del sólido desprendiendo calor, aunque su presión sea menor que la presión de vapor que corresponde a la temperatura predominante. La sustancia adsorbida no penetra dentro de la red cristalina ni se disuelve en ella sino que permanece totalmente sobre la superficie.

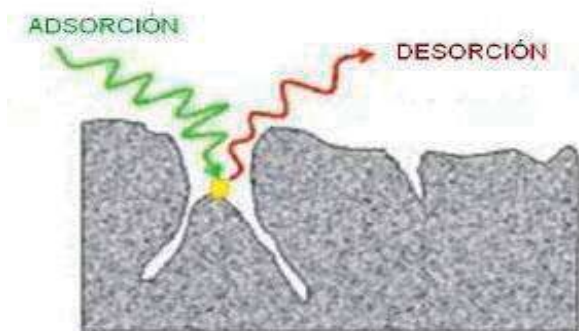
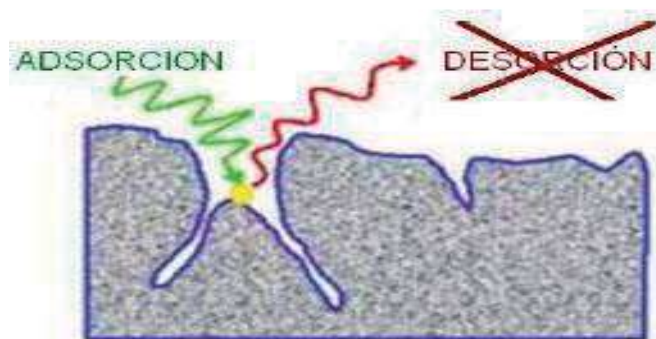


Figura 8. Esquema del proceso de fisisorción.

### 5.4.3. Quimisorción

Es el resultado de la interacción química entre el sólido y una sustancia adsorbida.



**Figura 9. Esquema del proceso de quimisorción.**

Las fuerzas intermoleculares que intervienen son de unión química, estas pueden variar considerablemente y puede suceder que no se formen compuestos químicos en el sentido usual; pero las fuerzas de adhesión son generalmente mayores que las observadas en la fisisorción. La sustancia adsorbida (quimisorbida) sufre una transformación para dar lugar a una especie distinta. El calor liberado durante la quimisorción es comúnmente grande. Es un proceso frecuentemente irreversible (Ahachad *et al.* 2005).

**Tabla 4. Diferencias entre la quimisorción y fisisorción.**

| ADSORCIÓN FÍSICA                                                                     | ADSORCIÓN QUÍMICA                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bajo calor de adsorción (dos a tres veces el calor latente de vaporización)          | Alto calor de adsorción (del orden del calor de una reacción química)                        |
| Significativamente a temperaturas relativamente bajas                                | Posible en un amplio intervalo de temperaturas                                               |
| No activa                                                                            | Activa                                                                                       |
| Reversible                                                                           | Irreversible                                                                                 |
| No hay transferencia de electrones pero puede producir la polarización del adsorbato | Hay transferencia de electrones en la formación de enlace entre el adsorbente y el adsorbato |

El calor de adsorción es la magnitud termodinámica que describe desde un punto de vista cuantitativo las interacciones entre un adsorbente y el adsorbato correspondiente. Su valor se puede deducir de las isotermas de adsorción, adsorbato-adsorbente, teniendo en cuenta los siguientes conceptos:

- 
- Una molécula de adsorbato en la fase vapor, posee un valor de su energía potencial distinto al que tendría sobre la superficie del adsorbente; la diferencia, depende de las interacciones que tienen lugar entre las moléculas del adsorbato y la superficie del adsorbente, es decir, de la naturaleza química de ambas. Además, las moléculas de adsorbato poseen cierta energía cinética debida a su movimiento de traslación, rotación y vibración, que es independiente de la energía potencial tanto en la fase vapor como en la fase adsorbida. La energía total puesta en juego en el proceso de adsorción, es la suma de la energía cinética y de la variación de la energía potencial.
  - Otro factor que puede contribuir al cambio energético, es la fuerza de atracción ejercida por las moléculas que se encuentran ya adsorbidas por el sólido. Su presencia aumenta el potencial de adsorción de la molécula en fase vapor; cuanto mayor sea el número de moléculas adsorbidas, mayor será el efecto, por tanto este factor es función de la superficie cubierta.

Si se considera que el proceso de adsorción se realiza en condiciones isotérmicas y de forma aislada, el cambio de energía, que tiene lugar, viene dado por el calor diferencial de adsorción (Ross, 1964).

Las fuerzas intermoleculares no actúan independientemente por lo que la influencia combinada de todas ellas conduce, frecuentemente, a procesos de sorción que no se pueden asignar a una de las categorías anteriormente mencionadas, y, además, en muchas ocasiones, es difícil diferenciar un tipo de proceso de otro; por lo que, generalmente, se habla de:

- Sorción inducida por el sorbente: derivada de la suma de fuerzas de afinidad entre el sorbente y el sorbato.

- 
- Sorción inducida por el sorbato: derivada de la suma de fuerzas ligadas con las interacciones adversas (repulsión) del sorbente con la fase en solución.

#### **5.4.4. Equilibrio en la adsorción**

Es un fenómeno superficial donde el equilibrio está condicionado por la reducción de la energía en la superficie de las fases. El área superficial de un sólido se define como la superficie disponible dentro de un sólido, en la cual cierta cantidad de moléculas de un gas puede ser retenida bajo ciertas condiciones experimentales.

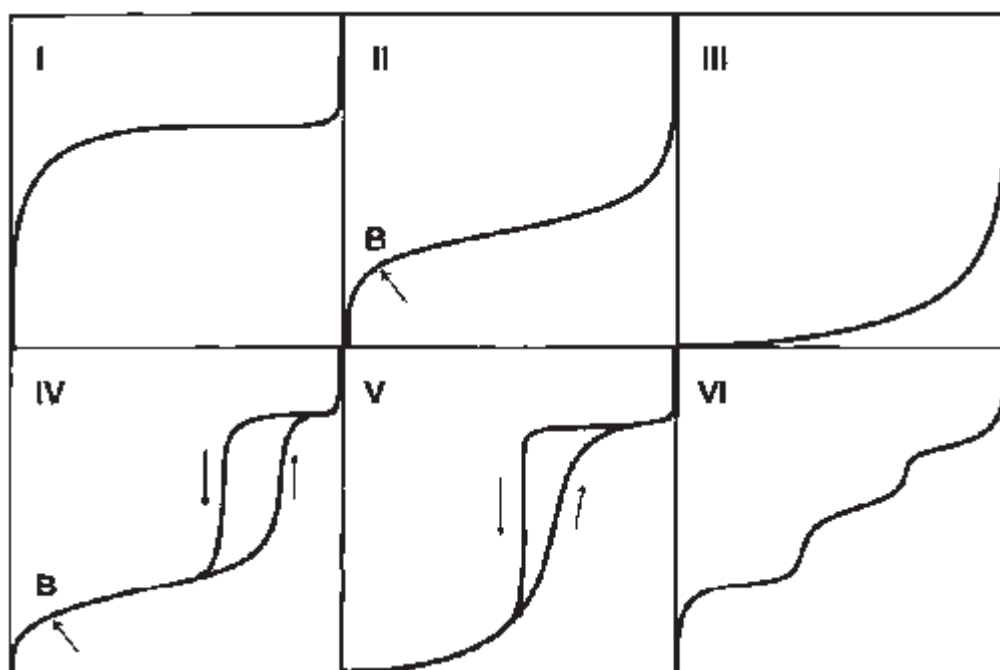
La adsorción física de una molécula, inerte a su temperatura de licuefacción (adsorbato), produce un volumen creciente acumulativo a medida que la presión parcial de dicho gas progresa, lo que conlleva a una isoterma de adsorción, cuya forma está vinculada específicamente a la textura de un sólido (adsorbente). Un ejemplo de esto es cuando una gota de agua se deposita sobre una superficie sólida lisa. La gota se resiste a extenderse y tiende a retener su forma esférica, lo que significa que la gota intenta minimizar la superficie. Este fenómeno es resultante de las fuerzas de atracción que existen entre las moléculas de sólido o entre las moléculas del agua dentro de la gota. Por lo tanto, la tensión superficial representa el intento de un líquido para reducir su energía de superficie libre. Desde el punto de vista molecular, el incremento de la superficie requiere a ruptura de los enlaces entre las moléculas de la superficie de la fase líquida y la formación de enlaces entre estas moléculas y la de la fase adyacente sólido.

---

## 5.5. Tipos de Isotermas

La forma de la isoterma permite predecir los mecanismos de adsorción, conocer la naturaleza física del compuesto a adsorber y la superficie del adsorbente, así como el área superficial específica del adsorbente (Giles *et al.*, 1960).

La IUPAC reconoce 6 tipos de isotermas de adsorción (Figura 10) (Sing *et al.*, 1985).



**Figura 10.** Los seis tipos de isotermas de adsorción (fisisorción) según la clasificación de la IUPAC.

Tipo I: La isoterma es cóncava respecto al eje de la presión relativa ( $p/p_0$ ), aumenta rápidamente a baja presión ( $p/p_0 < 1 \times 10^{-3}$ ) y posteriormente alcanza un plateau de saturación horizontal. Esta clase de isotermas es característica de materiales microporosos. La alta energía de adsorción de los microporos produce que el gas se adsorba a bajas presiones. Una vez que se ha completado todo el

---

volumen de los microporos la isoterma permanece en un valor casi constante sobre un amplio rango de presiones, lo que produce el citado plateau.

Tipo II: A bajas presiones es cóncava respecto al eje de la presión relativa ( $p/p_0$ ), luego aumenta linealmente y finalmente se vuelve convexa. Puede ser interpretada como la formación de una capa adsorbida cuyo espesor es incrementado progresivamente a medida que aumenta la presión. Si la rodilla de la isoterma es pronunciada, se asume que en el punto B (el punto donde comienza la sección cuasilineal de la isoterma) se ha completado la formación de la capa monomolecular (monocapa) y empieza la formación de las capas multimoleculares (multicapas). La ordenada del punto B nos da una estimación de la cantidad de adsorbato requerido para cubrir por unidad de masa, la superficie del sólido con una capa monomolecular (Capacidad de monocapa). Esta clase de isoterma es característica de sólidos no-porosos o de adsorbentes macroporosos. La total reversibilidad de la isoterma de adsorción-desorción, es decir, la ausencia del lazo de histéresis, es una condición que se cumple en este tipo de sistemas.

Tipo III: es convexa respecto al eje de la presión relativa ( $p/p_0$ ) en todo el rango de presión. Esta característica es indicativa de interacciones débiles entre el adsorbato y el adsorbente. En la práctica no es común encontrarse con este tipo de isotermas.

Tipo IV: a bajas presiones se comporta como la del Tipo II, siendo el rasgo distintivo de esta isoterma su lazo de histéresis. Es característica de los sólidos mesoporosos. Como veremos más adelante la aparición del ciclo de histéresis se debe a que el proceso de llenado de los mesoporos está gobernado por el fenómeno de condensación capilar y por las propiedades percolativas del sólido.

Tipo V: del mismo modo que las de Tipo III, esta clase de isotermas se obtiene cuando las interacciones entre el adsorbato y el adsorbente son débiles. La

---

presencia del lazo de histéresis está asociada con el mecanismo de llenado y vaciado de los poros. En la práctica es poco usual encontrarse con este tipo de isothermas.

Tipo VI: o isoterma escalonada es la menos común de todas las isothermas. Se la asocia con la adsorción capa por capa sobre superficies que son altamente homogéneas respecto del adsorbato. La forma del escalón depende de la temperatura y de los detalles del sistema (Gregg, 1982).

La forma de la isoterma nos puede dar alguna indicación sobre el tipo de porosidad del sólido (Salinas, 2011).

## **5.6. Modelos que describen la cinética del proceso de adsorción**

### **5.6.1. Modelo cinético de primer orden (Lagergren)**

Hoy en día se utilizan varios modelos matemáticos empíricos, para determinar los parámetros cinéticos, en varios casos las cinéticas han sido descritas por medio de la ecuación de primer orden de Lagergren (Qiu *et al.*, 2009), la cual se basa principalmente en la capacidad de adsorción del sólido (adsorbente):

$$q_t = q_e (1 - e^{(-K_L t)})$$

$q_e$  = concentración de soluto removido en el equilibrio por cantidad de adsorbente (mg/g)

$q_t$  = concentración de soluto removido en tiempo  $t$  por cantidad de adsorbente (mg/g)

$K_L$  = constante de velocidad en el equilibrio de pseudo primer orden (min<sup>-1</sup>)

$t$  = tiempo (min)



---

### 5.6.2. Modelo de Elovich

El modelo de Elovich o ecuación de Roginsky-Zeldovich, es utilizada comúnmente para determinar la cinética de quimisorción de gases sobre sólidos. Sin embargo, se ha utilizado para describir la sorción de contaminantes en soluciones acuosas y se expresa de la siguiente manera (Qiu ,2009):

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln (\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t$$

Donde:

$q_t$  = concentración de soluto adsorbido al tiempo  $t$  (mg/g)

$\alpha$  = velocidad de sorción inicial (mg/g min)

$\beta$  = constante de desorción (g/mg)

$t$  = tiempo (min)

### 5.6.3. Modelo de pseudo-segundo orden

La ecuación de pseudo-segundo orden ha sido considerada como uno de los modelos más apropiados para explicar diferentes sistemas de adsorción. Ho y McKay (2000) derivaron la ecuación de este modelo tomando en cuenta que la velocidad de reacción de pseudo-segundo orden depende de la cantidad de ion metálico divalente en la superficie del sorbente y de la cantidad del ion metálico divalente sorbido en el equilibrio. La sorción en el equilibrio,  $q_e$  es una función de la temperatura, de la concentración inicial del ion metálico, la cantidad de sorbente y la naturaleza de la interacción entre soluto y sorbente. La expresión de velocidad para la sorción está descrita por la siguiente ecuación de forma lineal:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

---

Donde:

$k_2$  = constante de velocidad de adsorción de segundo orden (g/mg.h).

$q_e$  = concentración del ion adsorbido en el equilibrio (mg/g).

$q_t$  = concentración del ion adsorbido a un tiempo dado, t (mg/g).

---

## 6. JUSTIFICACIÓN

En Michoacán uno de los frutos cultivados a gran escala es el tamarindo, este tiene diversos procesos agroindustriales para la producción de pulpa, ates, entre otros; lo que conlleva a la generación de residuos de partes no aprovechables del fruto como la cáscara y su semilla. Para que dichos residuos tengan algún uso se requiere la aplicación de técnicas y métodos para su aprovechamiento. Una de las técnicas más utilizadas es la extrusión, que puede emplearse en el tratamiento de la cáscara de tamarindo, y sus efectos benéficos incluyen la destrucción de factores antinutricionales, y el incremento en la FS por lo cual puede ser ampliamente utilizado como un medio para la modificación de algunas propiedades fisicoquímicas basados en su empleo como fibra dietética y así obtener materiales con nuevas características funcionales de utilidad en la industria alimentaria.

Las propiedades adquiridas durante el proceso de extrusión dotarán de utilidad a la cáscara de tamarindo; por ello es de vital importancia identificar las condiciones óptimas de extrusión para preservar por un mayor tiempo la funcionalidad del producto.

---

## 7. HIPÓTESIS

El tratamiento de extrusión mejora la capacidad de absorción de agua de la cáscara de tamarindo al haber un incremento en fibra soluble.

---

## 8. OBJETIVOS

### 8.1. Objetivo general

Evaluar el efecto que tiene del tratamiento de extrusión de la cáscara de tamarindo sobre su capacidad de adsorción de agua.

#### 8.1.1. Objetivos específicos

- Estudiar la cinética de adsorción de agua en la cáscara de tamarindo con y sin tratamiento termo-mecánico.
- Medir las capacidades de adsorción y desorción de diferentes materiales basados en fibra generando bajas y altas microatmósferas de humedad.
- Establecer las mejores condiciones de tiempo y humedad para alcanzar la humedad de equilibrio en los diferentes materiales basados en fibra, mediante isothermas de sorción.

## 9. MATERIALES Y MÉTODOS

### 9.1. Materiales y Equipos

- Balanza analítica marca STARTORIUS modelo BL 120-S, Alemania.
- Incubadora 30MR, marca Thermo Electron Corporation.
- Estufa de secado digital FELISA, modelo FE-291D,Guadalajara, Jal.
- Espectrofotómetro
- Placa de Calentamiento marca LINDBERG,modelo 53066,México, D.F.
- Licuadora Osterizer.

- Campana de extracción con luz ultravioleta, modelo MimiHelic II zero.
- Tamices DAIGGER, U.S. estándar del no. 20, 40, 60, 80, 100 y 120. U.S.A.
- Mortero de cerámica
- Matraces aforados
- Agitadores magnéticos
- Desecadores de cristal
- Higrómetros digitales
- Papel aluminio
- Sales de cloruro de litio (LiCl), cloruro de magnesio (MgCl<sub>2</sub>), nitrito de sodio (NaNO<sub>2</sub>), sulfato de amonio, cloruro de potasio, cloruro de calcio, carbonato de potasio y nitrato de magnesio ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> SO<sub>4</sub>).

## 9.2. Materiales Biológicos

Tamarindo (*Tamarindus indica* L). Se utilizó cáscara proveniente de la industria de aates “La Estrella”<sup>®</sup> ubicada en la ciudad de Morelia, Michoacán. Se limpió retirando las semillas, hojas y pequeños trozos de madera. Se trituró en un molino Pulvex 200 del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del I.P.N. (CICATA-IPN) Unidad Querétaro, con una malla de 800 µm. La muestra molida se hidrató a 32 % y 39 % de humedad y se dejó reposar en refrigeración en bolsas selladas herméticamente por 12 h para ser procesadas por extrusión.

**Tabla 5. Condiciones de extrusión de la cáscara de tamarindo.**

| FACTORES |             |                  |                              |
|----------|-------------|------------------|------------------------------|
| NIVELES  | Humedad (%) | Temperatura (°C) | Velocidad del tornillo (rpm) |
|          | 32 %        | 90               | 15                           |
|          |             | 100              |                              |
|          |             | 110              |                              |
|          | 39%         | 90               |                              |
|          |             | 100              |                              |
|          |             | 110              |                              |

---

Metamucil Natural comercial (Procter & Gamble Manufacturing Co., Phoenix, AZ, USA).

Limón criollo (*Citrus aurantifolia* Swingle). Los residuos de limón fueron recolectados de la industria: DANISCO MEXICANA S.A. de C.V. ubicada en la localidad Apatzingán de la Constitución, se encuentran en el municipio de Apatzingán del estado de Michoacán, este residuo consiste de la cáscara del limón.

---

## 9.3. Métodos

### 9.3.1. Determinación de humedad (Método 934.01, AACC 2000)

La humedad de la muestra se determinó mediante el porcentaje de agua eliminada por evaporación durante un calentamiento en una estufa a 105 °C por 4 h.

Determinación de la actividad de agua inicial.

### 9.3.2. Carbohidratos totales método del fenol-sulfúrico (Dubois *et al*, 1956)

Preparar una solución o suspensión de la muestra en agua, procurando que los carbohidratos se encuentren en el intervalo de sensibilidad del método (10-100µg/mL). En tubos de ensaye perfectamente etiquetados, colocar 1 mL de la solución o suspensión acuosa de la muestra. Para cada tubo adicionar 0.6 mL de una solución acuosa de fenol al 5%. Mezclando perfectamente, adicionar cuidadosamente 3.6 mL de ácido sulfúrico concentrado, homogeneizar.

NOTA. Realizar todo el procedimiento para un tubo antes de seguir con el siguiente.

Dejar enfriar la mezcla a temperatura ambiente (aproximadamente 30 min.) y determinar la intensidad del color naranja con un espectrofotómetro a 480 nm, frente a un blanco preparado de la misma manera utilizando agua. Calcular la cantidad de carbohidratos presentes en la muestra a partir de una curva patrón preparada con el carbohidrato de interés en el intervalo del método (10-100µg de glucosa/mL), tratada de la misma manera que el problema.



---

### 9.3.3. Tamaño y diámetro medio de partícula

Se utilizó el método descrito Rosell *et al.* (2009), se emplearon 50 g de muestra, la cual se colocó en tamices con número de malla de 20, 40, 60, 80, 100, 120 y 140: acoplados entre sí y montados en un rotor en movimiento por 30 min. Las partículas retenidas en cada malla fueron pesadas y se determinó el diámetro medio de partícula (DMP) utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{DMP} = (P_1D_1 + P_2D_2 + P_3D_3 + P_4D_4 + P_5D_5 + P_6D_6 + P_7D_7)/MT$$

Donde:

$P_{1-6}$  = peso de las partículas retenidas en cada tamiz

$D_{1-6}$  = diámetro de malla de cada tamiz

MT = peso total de la muestra

### 9.3.4. Preparación de soluciones salinas saturadas

Método Estático Gravimétrico de soluciones de sales saturadas para determinación de las isothermas de sorción.

Se emplearon 700 g de cáscara de tamarindo previamente extruida los cuales fueron molidas en mortero; 100g de cáscara de limón criollo (*Citrus aurantifolia Swingle*) la cual fue molida en la licuadora y 100g de metamucil natural. El 98% de las muestras de las diversas cáscaras fueron obtenidas tamizando con la malla N° 60 de un juego de tamices, a estas se les realizó un tratamiento de sanitización con luz UV por un periodo de 48 h y se llevó a su consiguiente empaquetado al vacío para evitar contaminación y absorción de humedad.

Se utilizaron muestras en polvo, en las cuales se analizaron 2 tipos de tratamiento, 1: método de extrusión y 2: sin tratamiento. Estas se determinaron evaluando el

---

comportamiento de equilibrio de humedad a tres temperaturas diferentes (25, 35 y 45°C) abarcando un rango de actividad de agua de 0.113 a 0.830 (Landaeta, 2005).

Este método consiste en el uso de recipientes de cristal (desecadores), se lograron ambientes de humedad controlada, en los que se obtienen, a partir de diversas soluciones salinas saturadas, microatmósferas de humedad relativa fija a las temperaturas de estudio. Las sales que se usaron para preparar las soluciones fueron las siguientes: Cloruro de litio ( $\text{LiCl}$ ;  $a_w=0.113$ ), Cloruro de Magnesio  $\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ;  $a_w=0.333$ ), Nitrito de Sodio ( $\text{NaNO}_2$ ,  $a_w=0.654$ ) y Sulfato de Amonio  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $a_w=0.803$ ).

Se pesaron 2 g de muestra en pequeños recipientes de aluminio y luego se introdujeron en las microatmósferas. Se taparon herméticamente con clinc pack, para así garantizar el intercambio osmótico entre las muestras y la solución saturada.

Las mediciones se realizaron por triplicado, que se lograron al colocar los envases sellados en una incubadora a 25, 35 y 45 °C durante 8 días; suficientes para alcanzar las condiciones de equilibrio. Se desmontaba el microambiente y se pesaban las muestras cada 48 h; los resultados se expresaban como gramos de agua por gramo de materia seca o (%). Se empacaban y se les determinaban la actividad de agua y se construyeron las isotermas con los datos de actividad de agua.

## 9.4. Análisis de datos

Los datos obtenidos son la media de tres repeticiones  $\pm$  desviación estándar; estos datos posteriormente fueron procesados con el software JMP<sup>®</sup> 6.0, mediante

---

un análisis de la varianza (ANOVA) y una prueba de Tukey con  $\alpha = 0.05$  con la finalidad de comparar las medias de los tratamientos, y establecer si son estadísticamente significativos. A su vez, se analizó el efecto individual y de interacción que tienen los factores sobre las diferentes variables respuesta mediante el análisis factorial completo a x b.

Las cinéticas de sorción fueron ajustadas mediante un análisis de regresión no lineal utilizando el programa STATISTICA 7 ajustándose a los siguientes modelos: Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich.

---

## 10. RESULTADOS

### 10.1. Tamaño de partícula

La forma y el tamaño de las fibras dependen del tipo e intensidad de reducción de tamaño de partícula al que fueron sometidas por procesos de molienda lo que es importante para su funcionalidad. En la Tabla 6 se presenta la distribución de partícula del polvo de las muestras de MN, CLN, CTN.

**Tabla 6. Distribución de partícula del polvo de MN, CLN, CTN.**

| No. Malla | Abertura (µm) | Fracción (CLM)<br>(g/100g) | Fracción (CMN)<br>(g/100g) | Fracción (MN)<br>(g/100g) |
|-----------|---------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 20        | 850           | 0                          | 0.0454                     | 0.7743                    |
| 40        | 425           | 0.0034                     | 7.6246                     | 6.3733                    |
| 60        | 250           | 2.1381                     | 20.1127                    | 29.1753                   |
| 80        | 180           | 21.7904                    | 6.7769                     | 7.9385                    |
| 100       | 150           | 9.2321                     | 1.5191                     | 1.2917                    |
| 120       | 125           | 10.6367                    | 3.5463                     | 2.2123                    |
| 140       | 106           | 5.3389                     | 0.6567                     | 1.0363                    |
| Fondo     | <106          | 0.8204                     | 8.4161                     | 1.7124                    |

Cada valor representa la media de 3 repeticiones. Número de orificios por pulgada lineal.

Se trabajo con polvo retenido en la malla número 60. El diámetro medio de partícula conseguido para estas muestras fue de 250 µm, para el MN, CLN y CTN, respectivamente; este tamaño permite una mayor capacidad de hidratación al haber una mayor área de superficie que las partículas de mayor tamaño, lo que permite reconocer que estas partículas son las más aptas para la incorporación a alimentos funcionales (Jongaroontaprangsee *et al.*, 2007).

---

## 10.2. Fracciones de fibra en las muestras ensayadas

En la tabla 7 se observa el contenido de FD, FI, FS, y CHOs en las muestras empleadas en el ensayo. El componente en mayor cantidad es la FD (suma de la FS y FI); el contenido de FD presente en la cáscara de tamarindo es comparable con productos comerciales considerados aportadores de FD como el metamucil; para la mayoría de las fibras la fracción en mayor proporción corresponde a la FI, no siendo así para el MN que presento la porción más baja de FI con respecto a las otras muestras, y una mayor cantidad de FS lo que le dota de propiedades para la formación de geles. En general, el tratamiento por extrusión logró hacer modificaciones en la porción de FD, FI y FS del material incrementando en promedio después del proceso en un 138.33 % en la porción soluble.

**Tabla 7. Composición de FD, FI, FS y Carbohidratos de las muestras.**

| TRATAMIENTO | FD (%) | FI (%) | FS (%) | CHO's (%) |
|-------------|--------|--------|--------|-----------|
| C.LIM.NAT.  | 34.19  | 21.07  | 13.11  | 4.75      |
| MET.NAT.    | 52.72  | 19.42  | 33.30  | 37.36     |
| C.TAM.NAT.  | 58.00  | 56.80  | 1.20   | 46.99     |
| 39%/90°C    | 58.41  | 56.99  | 1.42   | 52.70     |
| 39%/100°C   | 60.32  | 58.90  | 2.12   | 38.80     |
| 39%/110°C   | 63.76  | 62.00  | 2.16   | 31.53     |
| 32%/90°C    | 64.02  | 60.10  | 3.93   | 42.58     |
| 32%/100°C   | 74.30  | 70.40  | 3.91   | 38.34     |
| 32%/110°C   | 59.59  | 55.94  | 3.65   | 37.97     |

## 10.3. Determinación humedad y actividad de agua iniciales

Como se aprecia en la Tabla 8 se determino el porcentaje de humedad y la actividad de agua iniciales para observar posibles cambios en alguna de estas fracciones: en la CTE6 se observo el valor más alto tanto en humedad como en la actividad de agua. Todas las muestras presentan bajo contenido de humedad y de  $a_w$ . Esto indica que tiene poco agua libre y que la mayor parte del agua presente

está ligada particularmente a los diversos componentes de la fibra así como de carbohidratos y proteína.

**Tabla 8. Características fisicoquímicas de las diferentes muestras utilizadas.**

| MUESTRA                     | HUMEDAD (%) | $a_w$ |
|-----------------------------|-------------|-------|
| 39%/90°C <sup>(CTE1)</sup>  | 4.6         | 0.298 |
| 39%/100°C <sup>(CTE2)</sup> | 3.8         | 0.271 |
| 39%/110°C <sup>(CTE3)</sup> | 5.3         | 0.304 |
| 32%/90°C <sup>(CTE4)</sup>  | 4.7         | 0.301 |
| 32%/100°C <sup>(CTE5)</sup> | 3.2         | 0.272 |
| 32%/110°C <sup>(CTE6)</sup> | 7.5         | 0.391 |
| C.TAM.NAT. <sup>(CTN)</sup> | 5.4         | 0.329 |
| C.LIM.NAT. <sup>(CLN)</sup> | 7.2         | 0.347 |
| MET.NAT. <sup>(MN)</sup>    | 4.4         | 0.33  |

Valores de humedad (%)y ( $a_w$ ) de las muestras de cáscara de tamarindo (control) y después del proceso de extrusión (32 % y 39 % de humedad, 90 °C, 100 °C y 110 °C de temperatura y una velocidad de extrusión de 15 rpm), cáscara de limón y metamicil natural.

## 10.4. Microatmósferas de humedad

El mantener una solución salina saturada a 25 °C genera una microatmósfera de HR% característica de cada sal; si se eleva la temperatura del ambiente esta HR disminuye, tal y como se puede apreciar en la Tabla 9. Los datos de la tabla 9 representan valores que fueron obtenidos experimentalmente en este estudio.

**Tabla 9. Microatmósferas generadas por los diferentes tipos de sales.**

| SAL                                             | TEMPERATURA (°C) | HR (%) | $A_w^*$ |
|-------------------------------------------------|------------------|--------|---------|
| LiCl                                            | 25               | 11     | 0.113   |
|                                                 | 35               | 11     | 0.113   |
|                                                 | 45               | 11     | 0.113   |
| MgCl <sub>2</sub>                               | 25               | 40     | 0.328   |
|                                                 | 35               | 40     | 0.321   |
|                                                 | 45               | 40     | 0.314   |
| NaNO <sub>2</sub>                               | 25               | 67     | 0.654   |
|                                                 | 35               | 68     | 0.628   |
|                                                 | 45               | 77     | 0.602   |
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 25               | 77     | 0.803   |
|                                                 | 35               | 77     | 0.803   |
|                                                 | 45               | 90     | 0.803   |

\*Datos tomados de la literatura (Ross,1995)

## 10.5. Cinéticas de sorción de agua

Para evaluar las propiedades de hidratación, las muestras se introdujeron en desecadores en condiciones de microatmósferas de HR controlada usando las sales mostradas en la tabla 9, con la finalidad de homogenizar su humedad de equilibrio durante un lapso de 8 días.

Las Tablas 9 y 10 muestran el efecto de los factores de la temperatura y de la HR (11 y 40%) sobre el contenido de humedad de equilibrio.

**Tabla 10. Valores promedios de sorción de humedad de equilibrio en las muestras vs tiempo en horas para las nueve muestras a las 48 h.**

| Muestra    | HR 11%              |                     |                    | HR 40%              |                     |                     |
|------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|            | 25°C                | 35°C                | 45°C               | 25°C                | 35°C                | 45°C                |
| 39%/90°C   | -1.31 <sup>c</sup>  | -2.38 <sup>e</sup>  | -2.95 <sup>d</sup> | -2.50 <sup>a</sup>  | -1.50 <sup>ef</sup> | -2.02 <sup>cd</sup> |
| 39%/100°C  | -2.03 <sup>d</sup>  | -2.35 <sup>de</sup> | -3.02 <sup>d</sup> | -1.04 <sup>d</sup>  | -1.55 <sup>ef</sup> | -2.13 <sup>cd</sup> |
| 39%/110°C  | -1.89 <sup>d</sup>  | -2.34 <sup>de</sup> | -2.83 <sup>d</sup> | -0.98 <sup>d</sup>  | -1.57 <sup>f</sup>  | -2.15 <sup>d</sup>  |
| 32%/90°C   | -1.75 <sup>cd</sup> | -2.12 <sup>d</sup>  | -2.51 <sup>c</sup> | -2.65 <sup>e</sup>  | -1.35 <sup>e</sup>  | -1.59 <sup>cd</sup> |
| 32%/100°C  | -2.07 <sup>d</sup>  | -2.33 <sup>de</sup> | -2.79 <sup>d</sup> | -1.09 <sup>d</sup>  | 2.05 <sup>a</sup>   | 2.62 <sup>a</sup>   |
| 32%/110°C  | -1.83 <sup>cd</sup> | -2.18 <sup>de</sup> | -2.95 <sup>d</sup> | -0.98 <sup>d</sup>  | 2.05 <sup>a</sup>   | 2.72 <sup>a</sup>   |
| C.TAM.NAT. | 0.63 <sup>ab</sup>  | -1.40 <sup>b</sup>  | -1.96 <sup>b</sup> | -0.08 <sup>b</sup>  | -0.62 <sup>d</sup>  | -0.77 <sup>c</sup>  |
| C.LIM.NAT. | 1.15 <sup>a</sup>   | -1.82 <sup>c</sup>  | -2.37 <sup>c</sup> | -0.31 <sup>c</sup>  | 1.75 <sup>b</sup>   | 2.30 <sup>a</sup>   |
| MET.NAT.   | 0.20 <sup>b</sup>   | -0.75 <sup>a</sup>  | -1.48 <sup>a</sup> | -0.26 <sup>bc</sup> | 1.40 <sup>c</sup>   | 0.82 <sup>b</sup>   |

Promedios (n=3) con letras iguales por columna (a, b, c, d, e, f,) no presentan diferencias significativas (P< 0.05).

**Tabla 11. Valores promedios de sorción de humedad de equilibrio en las muestras vs tiempo en horas para las nueve muestras a las 168 horas.**

| MUESTRA    | HR 11%              |                    |                     | HR 40%             |                    |                     |
|------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
|            | 25°C                | 35°C               | 45°C                | 25°C               | 35°C               | 45°C                |
| 39%/90°C   | -3.14 <sup>c</sup>  | -2.53 <sup>d</sup> | -3.02 <sup>ab</sup> | 2.72 <sup>a</sup>  | -1.8 <sup>e</sup>  | -1.81 <sup>cd</sup> |
| 39%/100°C  | -2.26 <sup>bc</sup> | -2.51 <sup>d</sup> | -2.15 <sup>ab</sup> | -1.02 <sup>b</sup> | -1.74 <sup>e</sup> | -2.37 <sup>d</sup>  |
| 39%/110°C  | -2.02 <sup>bc</sup> | -2.49 <sup>d</sup> | -2.92 <sup>b</sup>  | -1.00 <sup>b</sup> | -1.75 <sup>e</sup> | -2.30 <sup>d</sup>  |
| 32%/90°C   | -2.06 <sup>bc</sup> | -2.12 <sup>c</sup> | -2.57 <sup>b</sup>  | -3.63 <sup>c</sup> | -1.55 <sup>e</sup> | -1.78 <sup>cd</sup> |
| 32%/100°C  | -2.08 <sup>bc</sup> | -2.50 <sup>d</sup> | -2.79 <sup>b</sup>  | -0.06 <sup>b</sup> | 1.79 <sup>ab</sup> | 2.03 <sup>a</sup>   |
| 32%/110°C  | -0.09 <sup>ab</sup> | -2.36 <sup>d</sup> | -2.69 <sup>b</sup>  | -1.04 <sup>b</sup> | 2.00 <sup>a</sup>  | 1.90 <sup>ab</sup>  |
| C.TAM.NAT. | 1.19 <sup>a</sup>   | -1.54 <sup>b</sup> | -2.00 <sup>ab</sup> | -0.27 <sup>b</sup> | -0.74 <sup>d</sup> | -1.24 <sup>c</sup>  |
| C.LIM.NAT. | 0.89 <sup>a</sup>   | -2.06 <sup>c</sup> | -2.63 <sup>b</sup>  | -0.32 <sup>b</sup> | 1.61 <sup>b</sup>  | 2.00 <sup>a</sup>   |
| MET.NAT.   | 0.33 <sup>ab</sup>  | -1.23 <sup>a</sup> | -1.23 <sup>a</sup>  | -0.23 <sup>b</sup> | 1.11 <sup>c</sup>  | 0.94 <sup>b</sup>   |

Promedios (n=3) con letras iguales por columna (a, b, c, d, e, f,) no presentan diferencias significativas (P< 0.05).

En el análisis estadístico no se observa una diferencia significativa en la humedad de equilibrio alcanzada en las muestras extruidas.

En la Figuras 11 y 12 se presentan las cinéticas de sorción de agua a 11 y 40 % HR y a tres temperaturas (25, 35 y 45°C) donde se establece la humedad de equilibrio y el comportamiento de cada material a esas condiciones presentando el fenómeno de desorción.

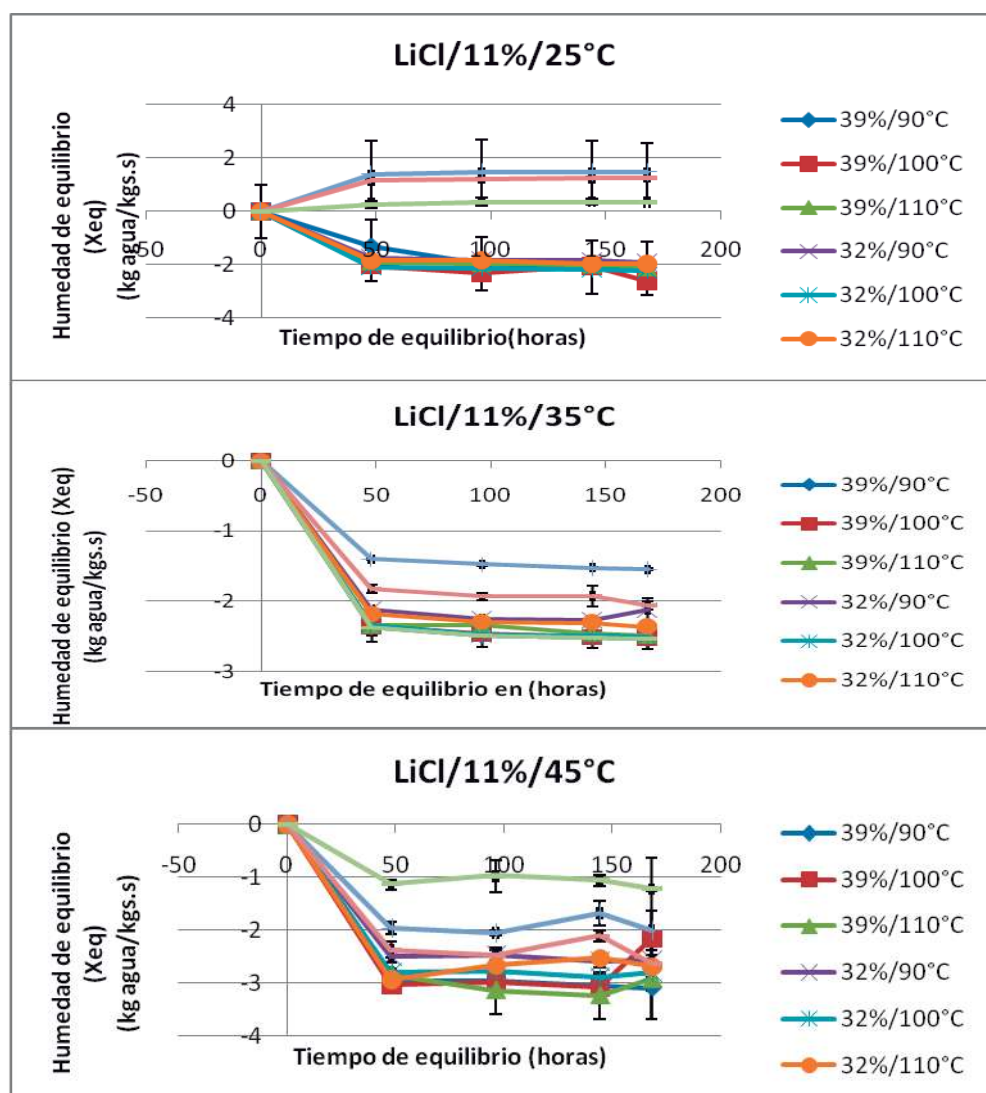


Figura 11. Cinéticas de sorción de agua de muestras control y muestras extruidas a 11%HR y a 25°C (A), 35°C (B) y 45°C (C).



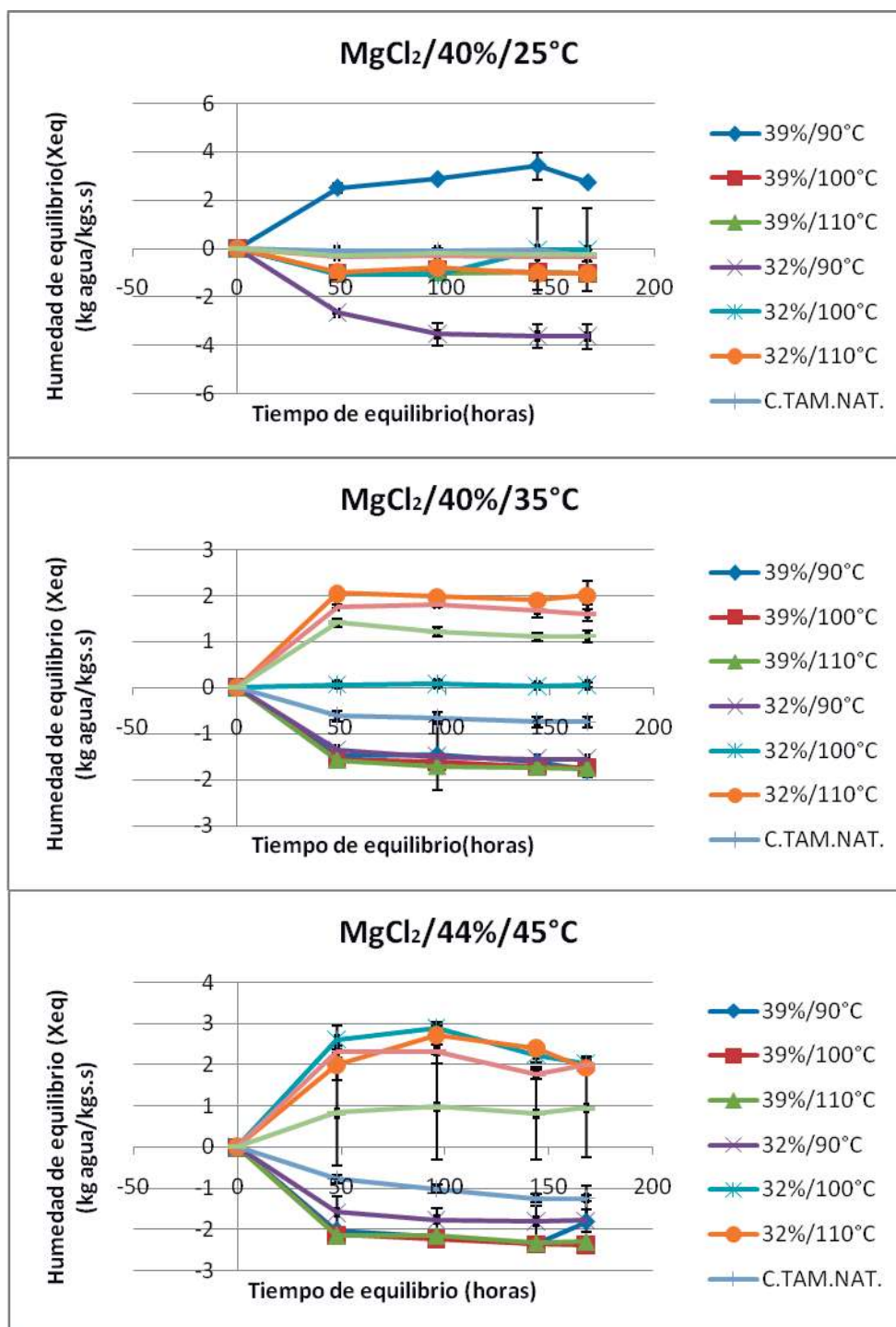


Figura 12. Cinéticas de sorción de agua de muestras control y muestras extruidas a 40%HR y a 25°C (A), 35°C (B) y 45°C (C).

---

Una vez realizadas las cinéticas de sorción sobre las condiciones antes mencionadas se obtuvieron las curvas de humedad de equilibrio, las que presentaron el fenómeno de desorción principalmente en las muestras extruidas a la HR de 11% las cuales están determinadas por el contenido de  $a_w$ , el cual se ve afectado al incrementar la temperatura generándose una microatmósfera de menor humedad. El efecto de la temperatura sobre la  $a_w$  y la energía de enlace de sus moléculas, afecta directamente el valor de la monocapa, donde a bajas temperaturas hay mayor disponibilidad de agua que puede interactuar con todos los sitios de adsorción.

En la microatmósfera de 11 y 40% de HR que se obtuvieron respectivamente con las soluciones salinas saturadas de cloruro de litio y cloruro de magnesio evaluadas a tres temperaturas constantes (25, 35 y 45°C), indican que las muestras de cáscara de tamarindo con tratamiento de extrusión ceden humedad al medio para alcanzar el equilibrio (desorción), siendo la muestra extruida con valores de humedad más altos la que más desorben; lo cual podría mostrar correspondencia con los valores de humedad inicial de las cáscaras (Labuza, 1985).

Al considerarse las microatmósferas de 11 y 40% de HR como condiciones de humedad como bajas, las muestras extruidas son menos estables, lo que podría relacionarse con sus contenidos de FD, principalmente con la FS de la que tienen menor cantidad (Tabla 7).

El incremento de FS se le puede atribuir al rompimiento de enlaces glucosídicos que disminuyen el tamaño molecular de los componentes de la FI, como celulosa y algunas hemicelulosas, exponiendo sus grupos funcionales polares como el carboxilo (COOH) e hidroxilo (-OH), lo que generará un incremento en la solubilidad de la porción insoluble. Gutierrez (1998) describe que a actividades de  $a_w$ , esta puede adsorberse sólo en la superficie en los sitios que exponen grupos

hidroxilo de los azúcares y por ello el contenido de humedad es bajo. Por consiguiente podría decirse que las condiciones de los factores humedad y temperatura de tratamiento (39%/90°C, 39%/100°C, 39%/110°C) en las muestras extruidas no provocan cambios estructurales que modifiquen su capacidad de hidratación.

**Tabla 12. Valores promedios de sorción de humedad en las muestras vs tiempo en horas para las nueve muestras a las 48 h.**

| MUESTRAS   | HR 60 %            |                    |                    | HR 90%             |                    |                     |
|------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
|            | 25°C               | 35°C               | 45°C               | 25°C               | 35°C               | 45°C                |
| 39%/90°C   | 3.13 <sup>cd</sup> | 1.69 <sup>de</sup> | 0.92 <sup>b</sup>  | 12.23 <sup>a</sup> | 8.43 <sup>c</sup>  | 11.23 <sup>bc</sup> |
| 39%/100°C  | 2.85 <sup>de</sup> | 1.54 <sup>e</sup>  | 1.42 <sup>b</sup>  | 11.80 <sup>a</sup> | 7.92 <sup>c</sup>  | 11.46 <sup>bc</sup> |
| 39%/110°C  | 2.916 <sup>d</sup> | 1.63 <sup>de</sup> | 1.43 <sup>b</sup>  | 11.72 <sup>a</sup> | 7.49 <sup>c</sup>  | 10.24 <sup>bc</sup> |
| 32%/90°C   | 2.96 <sup>cd</sup> | 2.60 <sup>b</sup>  | 2.11 <sup>ab</sup> | 11.90 <sup>a</sup> | 8.01 <sup>c</sup>  | 10.74 <sup>bc</sup> |
| 32%/100°C  | 2.77 <sup>de</sup> | 2.26 <sup>c</sup>  | 2.17 <sup>ab</sup> | 12.31 <sup>a</sup> | 7.42 <sup>c</sup>  | 9.347 <sup>c</sup>  |
| 32%/110°C  | 3.47 <sup>bc</sup> | 1.88 <sup>d</sup>  | 2.13 <sup>ab</sup> | 12.44 <sup>a</sup> | 7.48 <sup>c</sup>  | 10.68 <sup>bc</sup> |
| C.TAM.NAT. | 3.81 <sup>b</sup>  | 3.17 <sup>a</sup>  | 3.24 <sup>a</sup>  | 9.18 <sup>b</sup>  | 12.33 <sup>a</sup> | 14.90 <sup>b</sup>  |
| C.LIM.NAT. | 4.41 <sup>a</sup>  | 1.59 <sup>e</sup>  | 1.52 <sup>b</sup>  | 8.00 <sup>c</sup>  | 8.33 <sup>c</sup>  | 10.77 <sup>bc</sup> |
| MET.NAT.   | 2.37 <sup>e</sup>  | 1.26 <sup>f</sup>  | 0.90 <sup>b</sup>  | 5.53 <sup>d</sup>  | 11.14 <sup>b</sup> | 39.12 <sup>a</sup>  |

Promedios (n=3) con letras iguales por columna (a, b, c, d, e, f,) no presentan diferencias significativas (P< 0.05).

**Tabla 13. Valores promedios de sorción de humedad en las muestras vs tiempo en horas para las nueve muestras a las 168 h.**

| MUESTRAS   | HR 60 %             |                    |                     | HR 90 %             |                     |                    |
|------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
|            | 25°C                | 35°C               | 45°C                | 25°C                | 35°C                | 45°C               |
| 39%/90°C   | 3.01 <sup>cd</sup>  | 1.66 <sup>c</sup>  | 0.68 <sup>c</sup>   | 11.62 <sup>ab</sup> | 8.18 <sup>def</sup> | 11.42 <sup>c</sup> |
| 39%/100°C  | 2.95 <sup>cde</sup> | 1.53 <sup>cd</sup> | 0.82 <sup>c</sup>   | 11.31 <sup>ab</sup> | 8.24 <sup>def</sup> | 10.42 <sup>c</sup> |
| 39%/110°C  | 3.02 <sup>cd</sup>  | 1.65 <sup>c</sup>  | 1.01 <sup>c</sup>   | 11.50 <sup>ab</sup> | 8.37 <sup>de</sup>  | 9.53 <sup>c</sup>  |
| 32%/90°C   | 3.00 <sup>cd</sup>  | 2.20 <sup>b</sup>  | 1.97 <sup>abc</sup> | 10.97 <sup>ab</sup> | 8.45 <sup>d</sup>   | 11.64 <sup>c</sup> |
| 32%/100°C  | 2.69 <sup>de</sup>  | 1.77 <sup>c</sup>  | 1.17 <sup>bc</sup>  | 12.15 <sup>a</sup>  | 7.60 <sup>f</sup>   | 10.78 <sup>c</sup> |
| 32%/110°C  | 3.32 <sup>c</sup>   | 1.72 <sup>c</sup>  | 2.23 <sup>a</sup>   | 12.27 <sup>a</sup>  | 7.78 <sup>ef</sup>  | 9.12 <sup>c</sup>  |
| C.TAM.NAT. | 3.92 <sup>b</sup>   | 3.06 <sup>a</sup>  | 2.54 <sup>ab</sup>  | 9.92 <sup>bc</sup>  | 10.06 <sup>c</sup>  | 15.78 <sup>b</sup> |
| C.LIM.NAT. | 4.78 <sup>a</sup>   | 1.81 <sup>c</sup>  | 1.39 <sup>bc</sup>  | 8.52 <sup>c</sup>   | 8.7 <sup>d</sup>    | 11.13 <sup>c</sup> |
| MET.NAT.   | 2.45 <sup>e</sup>   | 1.24 <sup>d</sup>  | 0.97 <sup>c</sup>   | 6.34 <sup>d</sup>   | 16.66 <sup>a</sup>  | 31.58 <sup>a</sup> |

Promedios (n=3) con letras iguales por columna (a, b, c, d, e, f,) no presentan diferencias significativas (P< 0.05)

Los datos presentes de humedad de equilibrio se obtuvieron de un esquema de tratamientos de tres repeticiones y dos factores (humedad y temperatura), las respuestas generadas bajo estas condiciones son presentadas en las Tablas 11 y 12 que muestran el efecto de los factores de la temperatura y del 11 y 40% HR sobre el contenido de humedad de equilibrio.

En la Figuras 13 y 14 se presentan las cinéticas de sorción de agua a 60 y 80 % HR y a tres temperaturas (25, 35 y 45 °C) donde se establece la humedad de equilibrio y el comportamiento de cada material a esas condiciones presentando el fenómeno de desorción.

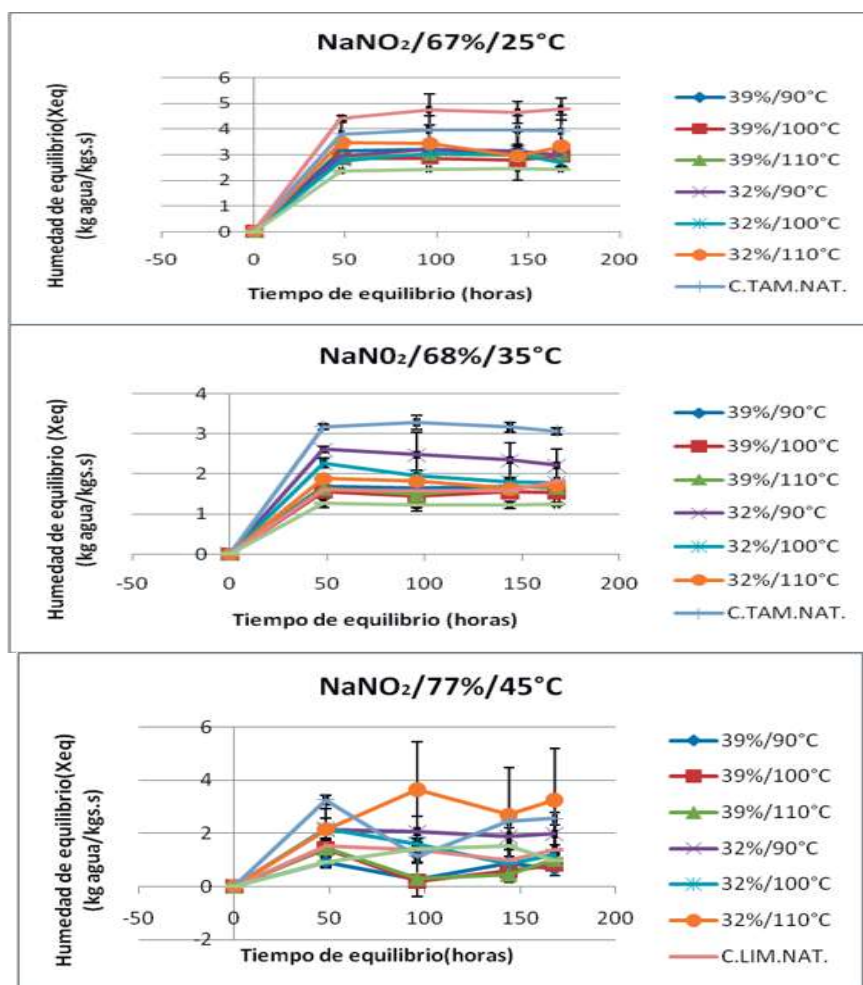


Figura 13. Cinéticas de adsorción de agua de muestras control y muestras extruidas a 77%HR/45°C.

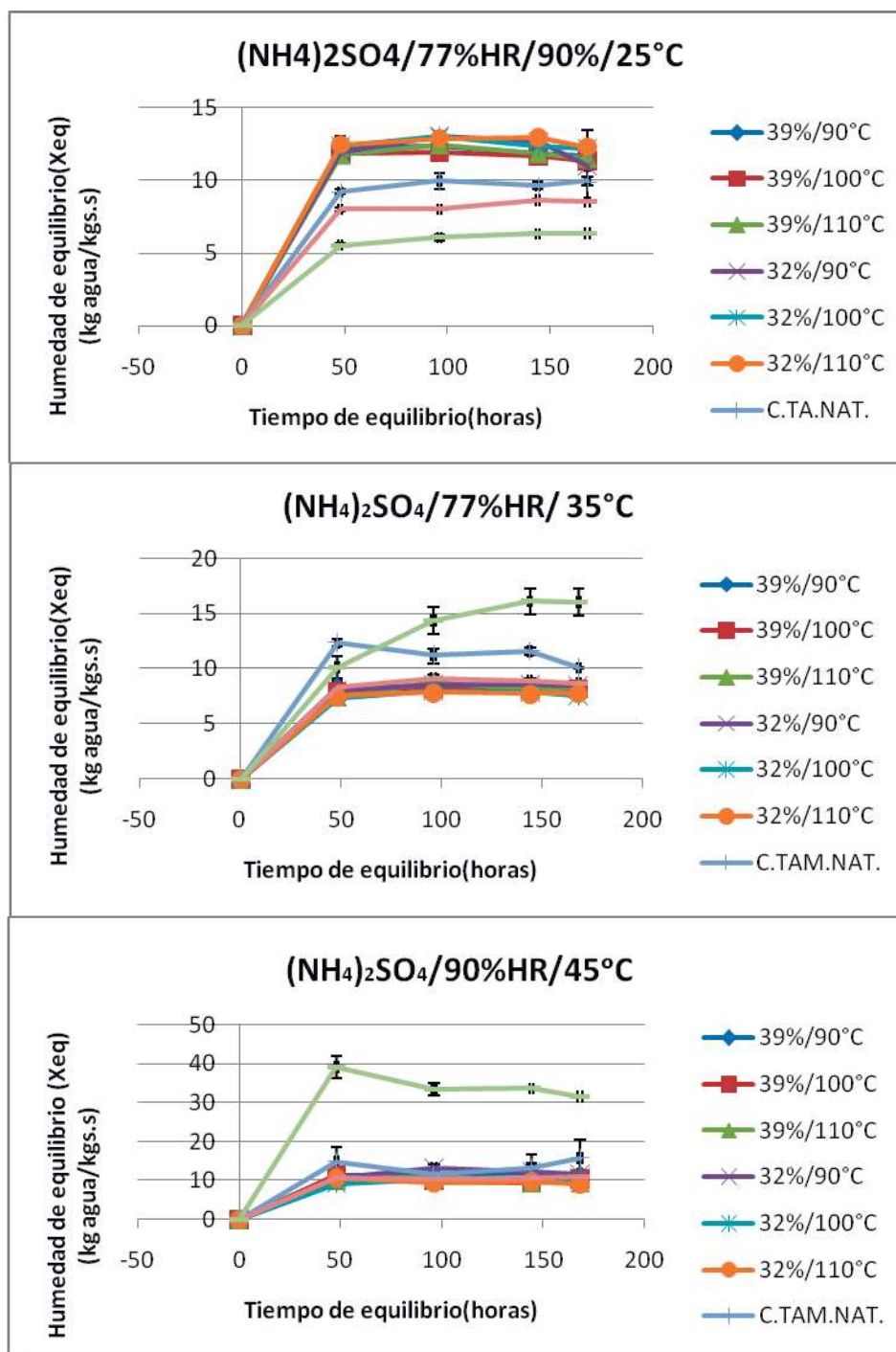


Figura 14. Cinéticas de adsorción de agua de muestras control y muestras extruidas a 90%HR/45°C.

A humedades relativas altas (70 y 90%), todas las cáscaras presentan el fenómeno de adsorción para alcanzar la humedad de equilibrio, siendo las

---

cáscaras naturales o controles (CTN, CLN y MN) las que alcanzan las mayores humedades de equilibrio viéndose favorecido al incrementar la temperatura; las muestras extruidas que son mas favorecidas son las que tienen las condiciones de CTE4-CTE6, siendo más estables a HR de 70% a las tres temperaturas ensayadas.

A valores de  $a_w$  superiores a 0.53, estos materiales manifiestan su máxima capacidad de adsorción, que podría atribuirse a que presentan alto contenido de azúcares. Saravacos *et al.* (1986), mencionan la disolución de azúcares cuando la  $a_w$  supera 0.50.

Una vez que se colocaron las muestras secas en las microatmósferas, las paredes celulares absorbieron la humedad, suavizándose para regresar a su forma original, debido a la elasticidad natural de la estructura celular (McMinn y Magee, 2003). Se podría decir que eso se observó en las primeras 48 h el cual representa una tendencia en mayor aumento; puesto que la muestra contiene moléculas que se encuentran formando puentes de hidrógeno en las regiones hidrófilas, que al estar en contacto con moléculas de agua quedan retenidas por interacciones de Van der Waals hasta saturar los poros superficiales de la muestra, formando la fase sólida, seguido por un incremento gradual que tiende a un máximo en la razón de rehidratación donde las moléculas de agua comienzan a penetrar al interior de la fase sólida y cuando existe agua suficiente se podría decir que alcanzo el equilibrio. El pretratamiento afecta la permeabilidad de las membranas celulares, por lo que la rapidez con la que se lleva a cabo la transferencia de agua durante el secado, se incrementa conforme aumenta la temperatura, disminuyendo el tiempo y reduciendo el daño estructural con un aumento de la porosidad, facilitando la rehidratación de las muestras en un menor tiempo (Gowen *et al.*, 2007).

Lo que nos lleva a decir que el estado físico en el que se encuentran los componentes del alimento influye sobre la retención de agua y este depende en

---

gran parte de los tratamientos previos a la hidratación y en gran medida al efecto de la temperatura.

Mazza (1980) y algunos investigadores, han explicado este comportamiento, argumentando que un incremento en la temperatura ocasiona cambios químicos y físicos en el producto, que pueden reducir el número de sitios activos donde se unen las moléculas de agua con la superficie del sólido en el alimento. Otros Mohamed y col. (2004) han manifestado que al aumentar la temperatura de sorción se incrementa el estado de excitación de las moléculas de agua, ocasionando que se aumenten las distancias entre las moléculas de agua y por consiguiente exista un decrecimiento en las fuerzas entre ellas.

A una HR constante, el incremento de la temperatura provocó una disminución de la humedad de equilibrio, cuando la HR supero 85% este efecto fue inverso quizás por posibles alteraciones en la estructura o solubilización de algunos compuestos que puede ser la causa de este comportamiento (Saravacos et al. 1986). El incremento de la temperatura para un mismo valor de humedad de equilibrio en el alimento implica un aumento en la  $a_w$  y en consecuencia un aumento en la velocidad de deterioro.

En las Figura 15, 16 y 17 se muestran los gráficos que representan el efecto de los factores sobre las variable respuesta capacidad de adsorción en las muestras extruidas y muestras control, mientras que en la Tablas 14 y 15 se observan las significancias de dichos efectos; la humedad a tres temperaturas que provocan cambios altamente significativos ( $P < 0.001$ ) en la capacidad de adsorción (humedad de equilibrio).



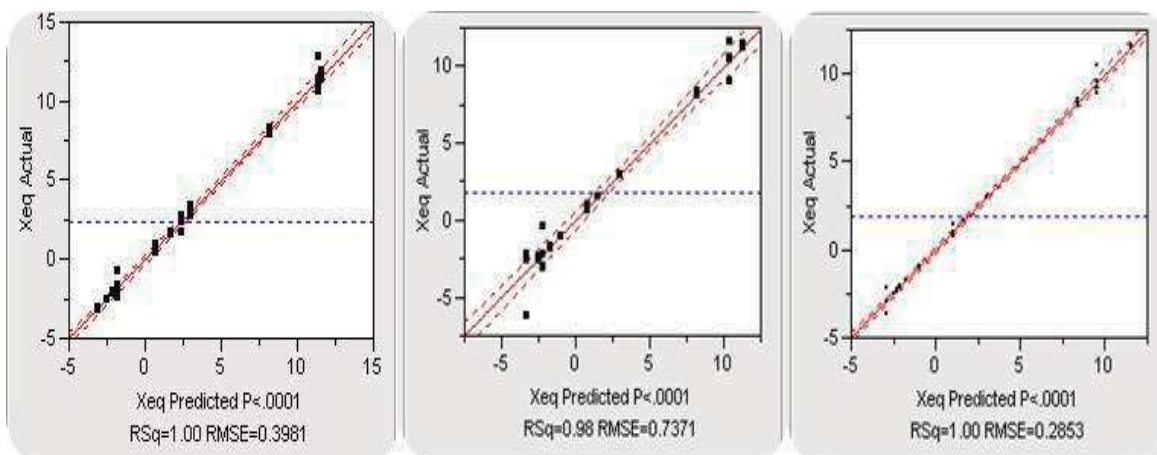


Figura 15. Gráficos del efecto individual y de la interacción de los factores (humedad y temperatura) sobre las variables respuesta. a) 39%/90°C; b) 39%/100°C; c) 39%/110°C.

Tabla 14. Efecto individual y de la interacción de los factores (humedad y temperatura) sobre las variables respuesta.

| EFFECTO             | 39%/90°C    | 39%/100°C   | 39%/110°C   |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|
| Humedad             | < 0.0001*** | < 0.0001*** | < 0.0001*** |
| Temperatura         | < 0.0001*** | 0.0004*     | < 0.0001*** |
| Humedad-Temperatura | < 0.0001*** | < 0.0001*** | < 0.0001*** |

Significancia al 5 % \*( $P < 0.05$ ), \*\* Significancia al 1% ( $P < 0.01$ ), \*\*\*Significancia menor al 0.1 % ( $P < 0.001$ ).

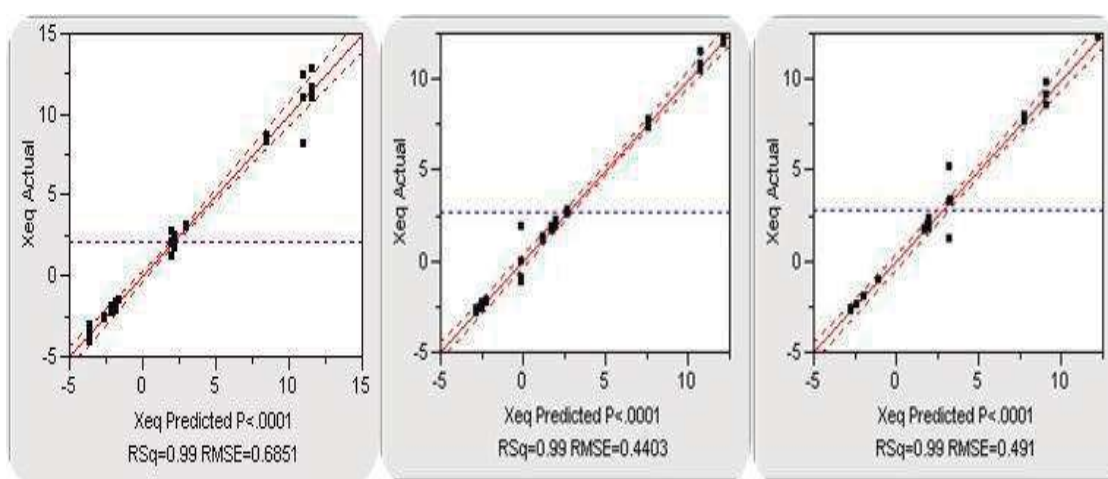


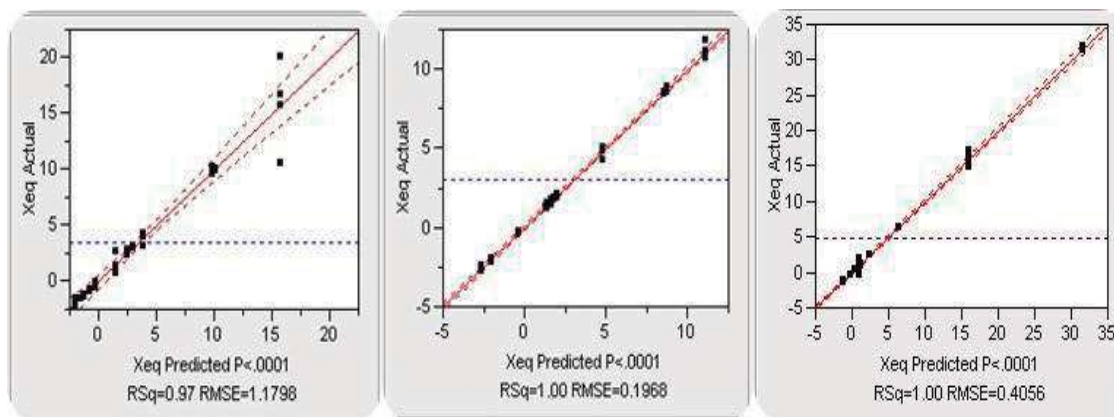
Figura 16. Gráficos del efecto individual y de la interacción de los factores (humedad y temperatura) sobre las variables respuesta. a) 32%/90°C; b) 32%/100°C; c) 32%/110°C.



**Tabla 15. Efecto individual y de la interacción de los factores (humedad y temperatura) sobre las variables respuesta.**

| EFFECTO             | 32%/90°C    | 32%/100°C   | 32%/110°C   |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|
| Humedad             | < 0.0001*** | < 0.0001*** | < 0.0001*** |
| Temperatura         | 0.0726      | 0.0004*     | < 0.0001*** |
| Humedad-Temperatura | < 0.0001*** | < 0.0001*** | < 0.0001*** |

Significancia al 5 % \*( $P < 0.05$ ), \*\* Significancia al 1% ( $P < 0.01$ ), \*\*\*Significancia menor al 0.1 % ( $P < 0.001$ ).



**Figura 17. Gráficos del efecto individual y de la interacción de los factores (humedad y temperatura) sobre las variables respuesta: a) CTN, b) CLN, y c) MN.**

**Tabla 16. Efecto individual y de la interacción de los factores (humedad y temperatura) sobre las variables respuesta: a) C.TAM.NAT; b) C.LIM.NAT; c) MET.NAT.**

| EFFECTO             | CTN         | CLN         | MN          |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|
| Humedad             | < 0.0001*** | < 0.0001*** | < 0.0001*** |
| Temperatura         | 0.0219*     | 0.0004*     | < 0.0001*** |
| Humedad-Temperatura | < 0.0001*** | < 0.0001*** | < 0.0001*** |

Significancia al 5 % \*( $P < 0.05$ ), \*\* Significancia al 1% ( $P < 0.01$ ), \*\*\*Significancia menor al 1 % ( $P < 0.001$ ).

En las Tablas 17-28 se aprecian los valores de las constantes cinéticas para los modelos matemáticos, donde se obtienen los coeficientes de correlación y la velocidad de adsorción para cada muestra utilizando los porcentajes de humedad de equilibrio en función al tiempo.

**Tabla 17. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R).**

| TRATAMIENTO | MODELOS CINÉTICOS (LiCl/11%/25°C)                                      |                                                                       |                                                                    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
|             | Lagergren                                                              | P.S.O.                                                                | Elovich                                                            |
| 39%/90°C    | $K_L=18.5982 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e=-1.8674 \text{ } \mu\text{g/g}$ | $K_2 = 6463.03\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-3.735 \text{ } \mu\text{g/g}$ | $\alpha=-0.089196\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-1.41671 \text{ g/mg}$ |
|             | R 0.9311                                                               | R= 0.9311                                                             | R= 0.9957                                                          |
| 39%/100°C   | $K_L=7.0704 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e=-2.2564 \text{ } \mu\text{g/g}$  | $K_2=-0.007 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e-5.1277 \text{ } \mu\text{g/g}$  | $\alpha=-5.61239\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-3.35399 \text{ g/mg}$  |
|             | R= 0.9733                                                              | R= 0.9826                                                             | R= 0.9833                                                          |
| 39%/110°C   | $K_L=3.1530 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e=-1.9977 \text{ } \mu\text{g/g}$  | $K_2 =16927.9\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-4.00 \text{ } \mu\text{g/g}$   | $\alpha=-501.62\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-6.35691 \text{ g/mg}$   |
|             | R= 0.9955                                                              | R= 0.9955                                                             | R= 0.9991                                                          |
| 32%/90°C    | $K_L=3.1609 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e=-1.8351 \text{ } \mu\text{g/g}$  | $K_2 =0.0076\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-5.1277 \text{ } \mu\text{g/g}$  | $\alpha=-1522.73\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-7.62457 \text{ g/mg}$  |
|             | R= 0.9967                                                              | R= 0.9826                                                             | R= 0.9997                                                          |
| 32%/100°C   | $K_L=1.9839 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e=-2.1437 \text{ } \mu\text{g/g}$  | $K_2 =21165.6\text{g/mg.min}$<br>$q_e= -4.29 \text{ } \mu\text{g/g}$  | $\alpha=-5505559\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-10.4979 \text{ g/mg}$  |
|             | R= 0.9987                                                              | R= 0.9987                                                             | R= 0.9998                                                          |
| 32%/110°C   | $K_L=1.5938\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-1.8894 \text{ } \mu\text{g/g}$    | $K_2 =29775.5\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-3.67 \text{ } \mu\text{g/g}$   | $\alpha=-181157\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-10.0826 \text{ g/mg}$   |
|             | R= 0.9977                                                              | R= 0.9967                                                             | R= 0.9993                                                          |
| C.TAM.NAT.  | $K_L=2.8794 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e=111.4282 \text{ } \mu\text{g/g}$ | $K_2=0.5283\text{g/mg.min}$<br>$q_e=0.3306\mu\text{g/g}$              | $\alpha=278230.4\text{mg/g.min}$<br>$\beta=13.9 \text{ g/mg}$      |
|             | R= 0.9980                                                              | R= 0.9967                                                             | R= 0.9995                                                          |
| C.LIM.NAT.  | $K_L=2.4393 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e=1.2240\mu\text{g/g}$             | $K_2 =0.0423\text{g/mg.min}$<br>$q_e= 0.7692\mu\text{g/g}$            | $\alpha=3374.903\text{mg/g.min}$<br>$\beta=12.484 \text{ g/mg}$    |
|             | R= 0.9973                                                              | R= 0.9973                                                             | R= 0.9998                                                          |
| MET.NAT.    | $K_L=0.5283\text{min}^{-1}$<br>$q_e=0.3306\mu\text{g/g}$               | $K_2 =0.0423\text{g/mg.min}$<br>$q_e= 0.7692\mu\text{g/g}$            | $\alpha=0.4891 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta= 21.0660\text{g/mg}$    |
|             | R= 0.9824                                                              | R= 0.9957                                                             | R= 0.9341                                                          |

**Tabla 18. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R).**

| TRATAMIENTO | MODELOS CINÉTICOS (LiCl/11%/35°C)                            |                                                             |                                                                     |
|-------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
|             | Lagergren                                                    | P.S.O.                                                      | Elovich                                                             |
| 39%/90°C    | $K_L=3.0663 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e=-2.4837 \mu\text{g/g}$ | $K_2=23548.86\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-4.97 \mu\text{g/g}$  | $\alpha=-481737\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-7.96901 \text{ g/mg}$    |
|             | R= 0.9984                                                    | R= 0.9984                                                   | R= 0.9999                                                           |
| 39%/100°C   | $K_L=3.2294\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-2.4584\mu\text{g/g}$    | $K_2=21081.31\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-4.929 \mu\text{g/g}$ | $\alpha=-143123\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-7.53463 \text{ g/mg}$    |
|             | R= 0.9982                                                    | R= 0.9982                                                   | R= 0.9999                                                           |
| 39%/110°C   | $K_L=1.8453 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e=-2.4092\mu\text{g/g}$  | $K_2=12025.12\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-4.82 \mu\text{g/g}$  | $\alpha=-928849\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-8.51553 \text{ g/mg}$    |
|             | R= 0.9981                                                    | R= 0.9981                                                   | R= 0.9995                                                           |
| 32%/90°C    | $K_L=1.9931\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-2.1912\mu\text{g/g}$    | $K_2=5052.068\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-4.382 \mu\text{g/g}$ | $\alpha=-768205514\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-12.6095 \text{ g/mg}$ |
|             | R= 0.9974                                                    | R= 0.9974                                                   | R= 0.9975                                                           |
| 32%/100°C   | $K_L=3.4621 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e=-2.4504 \mu\text{g/g}$ | $K_2=3730.48 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e=-4.90\mu\text{g/g}$  | $\alpha=-141020\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-7.55403 \text{ g/mg}$    |
|             | R= 0.9981                                                    | R= 0.9981                                                   | R= 0.9998                                                           |
| 32%/110°C   | $K_L=3.1934\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-2.2864 \mu\text{g/g}$   | $K_2=13176.61\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-4.57 \mu\text{g/g}$  | $\alpha=-37798.2\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-7.51823 \text{ g/mg}$   |
|             | R= 0.9978                                                    | R= 0.9978                                                   | R= 0.9998                                                           |
| C.TAM.NAT.  | $K_L=2.6597\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-1.4891\mu\text{g/g}$    | $K_2=25241.23\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-2.98 \mu\text{g/g}$  | $\alpha=-662.301\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-8.94411 \text{ g/mg}$   |
|             | R= 0.9967                                                    | R= 0.9967                                                   | R= 0.9999                                                           |
| C.LIM.NAT.  | $K_L=3.5233 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e=-1.9388 \mu\text{g/g}$ | $K_2=16421.96\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-3.88 \mu\text{g/g}$  | $\alpha=-439.534\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-6.49306 \text{ g/mg}$   |
|             | R= 0.9952                                                    | R= 0.9952                                                   | R= 0.9989                                                           |
| MET.NAT.    | $K_L=8.1117 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e=-0.9930 \mu\text{g/g}$ | $K_2=8318.103\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-1.986\mu\text{g/g}$  | $\alpha=-0.057581\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-2.93906 \text{ g/mg}$  |
|             | R= 0.9341                                                    | R= 0.9341                                                   | R=0.9885                                                            |

**Tabla 19. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R).**

| TRATAMIENTO | MODELOS CINÉTICOS (LiCl/11%/45°C)                               |                                                             |                                                                              |
|-------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|             | Lagergren                                                       | P.S.O.                                                      | Elovich                                                                      |
| 39%/90°C    | $K_L=1.5624 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e=-3.0146 \mu\text{g/g}$    | $K_2=15478.58\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-6.03\mu\text{g/g}$   | $\alpha=-203010973\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-8.59680 \text{ g/mg}$          |
|             | R= 0.9988                                                       | R= 0.9988                                                   | R= 0.9996                                                                    |
| 39%/100°C   | $K_L=2.564750\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-2.81450 \mu\text{g/g}$   | $K_2=-1552.94\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-5.63 \mu\text{g/g}$  | $\alpha=7.085912\text{E}+09\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-10.5641 \text{ g/mg}$ |
|             | R= 0.9570                                                       | R= 0.9570                                                   | R= 0.9505                                                                    |
| 39%/110°C   | $K_L=6.0868 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e=-3.0351 \mu\text{g/g}$    | $K_2=6127.209\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-6.070 \mu\text{g/g}$ | $\alpha=-122017\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-5.97382 \text{ g/mg}$             |
|             | R= 0.9931                                                       | R= 0.9931                                                   | R= 0.9949                                                                    |
| 32%/90°C    | $K_L=0.52425 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e=-2.5428 \mu\text{g/g}$   | $K_2=13513.38\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-5.09\mu\text{g/g}$   | $\alpha=-504153782\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-10.6337 \text{ g/mg}$          |
|             | R= 0.9991                                                       | R= 0.9991                                                   | R= 0.9994                                                                    |
| 32%/100°C   | $K_L=3.46217\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-2.45049\mu\text{g/g}$     | $K_2=37308.48\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-4.90\mu\text{g/g}$   | $\alpha=-522510567\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-9.58405 \text{ g/mg}$          |
|             | R= 0.9981                                                       | R= 0.9981                                                   | R= 0.9991                                                                    |
| 32%/110°C   | $K_L=3.19346 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e=-2.28640 \mu\text{g/g}$  | $K_2=13176.61\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-4.57 \mu\text{g/g}$  | $\alpha=1.969390\text{E}+09\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-10.4714 \text{ g/mg}$ |
|             | R= 0.9978                                                       | R= 0.9978                                                   | R= 0.9876                                                                    |
| C.TAM.NAT.  | $K_L=2.65974\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-1.48914 \mu\text{g/g}$    | $K_2=25241.23\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-2.98\mu\text{g/g}$   | $\alpha=-613721126\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-14.2885 \text{ g/mg}$          |
|             | R= 0.9967                                                       | R= 0.9967                                                   | R= 0.9836                                                                    |
| C.LIM.NAT.  | $K_L=3.52339\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-1.93881\mu\text{g/g}$     | $K_2=16421.96\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-3.88 \mu\text{g/g}$  | $\alpha=-259139389\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-10.9976 \text{ g/mg}$          |
|             | R= 0.9952                                                       | R= 0.9952                                                   | R= 0.9846                                                                    |
| MET.NAT.    | $K_L=8.111755 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e=-0.993045\mu\text{g/g}$ | $K_2=8318.103\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-1.986 \mu\text{g/g}$ | $\alpha=-101501958\text{mg/g.min}$<br>$\beta=-23.7013 \text{ g/mg}$          |
|             | R= 0.9341                                                       | R= 0.9341                                                   | R= 0.9833                                                                    |

**Tabla 20. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R).**

| TRATAMIENTO | MODELOS CINÉTICOS (MgCl <sub>2</sub> /40%/25°C)                        |                                                                        |                                                                             |
|-------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
|             | Lagergren                                                              | P.S.O.                                                                 | Elovich                                                                     |
| 39%/90°C    | $K_L=1.187937\text{min}^{-1}$<br>$q_e=2.877562\text{ }\mu\text{g/g}$   | $K_2=-69569.1\text{g/mg.min}$<br>$q_e=5.755125\mu\text{g/g}$           | $\alpha=4.072738\text{mg/g.min}$<br>$\beta=2.402\text{ g/mg}$               |
|             | R= 0.9676                                                              | R= .9676                                                               | R= .9794                                                                    |
| 39%/100°C   | $K_L=0.665301\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-0.978849\mu\text{g/g}$          | $K_2=0.074000\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-1.87925\mu\text{g/g}$           | $\alpha=-582205518\text{g/mg.min}$<br>$\beta=-28.8159\text{ g/mg}$          |
|             | R= .9884                                                               | R= .9896                                                               | R= 0.9867                                                                   |
| 39%/110°C   | $K_L=0.674542\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-0.981171\text{ }\mu\text{g/g}$  | $K_2=0.311000\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-1.94450\mu\text{g/g}$           | $\alpha=-632386807\text{g/mg.min}$<br>$\beta=-28.8637\text{ g/mg}$          |
|             | R= .9988                                                               | R= .9989                                                               | R= 0.9976                                                                   |
| 32%/90°C    | $K_L=3.139276\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-3.36263\text{ }\mu\text{g/g}$   | $K_2=2.660110\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-6.72327\mu\text{g/g}$           | $\alpha=-0.497149\text{g/mg.min}$<br>$\beta=-1.23858\text{ g/mg}$           |
|             | R= .9646                                                               | R= .9645                                                               | R= 0.9958                                                                   |
| 32%/100°C   | $K_L=0.557475\text{ min}^{-1}$<br>$q_e=-0.570503\text{ }\mu\text{g/g}$ | $K_2=-90443.0\text{ g/mg.min}$<br>$q_e=-1.14101\text{ }\mu\text{g/g}$  | $\alpha=-789280220\text{g/mg.min}$<br>$\beta=-51.8259\text{ g/mg}$          |
|             | R= 0.4390                                                              | R= 0.4390                                                              | R= 0.4093                                                                   |
| 32%/110°C   | $K_L=12.70738\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-0.962961\text{ }\mu\text{g/g}$  | $K_2=0.089328\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-1.98531\text{ }\mu\text{g/g}$   | $\alpha=-15534.7\text{g/mg.min}$<br>$\beta=-17.8239\text{ g/mg}$            |
|             | R= 0.9761                                                              | R= 0.9767                                                              | R= 0.9781                                                                   |
| C.TAM.NAT.  | $K_L=0.000274\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-3.97846\text{ }\mu\text{g/g}$   | $K_2=-0.000342\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-1.91749\text{ }\mu\text{g/g}$  | $\alpha=-0.001063\text{g/mg.min}$<br>$\beta=0.089702\text{ g/mg}$           |
|             | R= 0.6687                                                              | R= 0.6593                                                              | R= 0.6705                                                                   |
| C.LIM.NAT.  | $K_L=0.671036\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-0.308885\text{ }\mu\text{g/g}$  | $K_2=-26255.5\text{ g/mg.min}$<br>$q_e=-0.617772\text{ }\mu\text{g/g}$ | $\alpha=-255665809\text{g/mg.min}$<br>$\beta=-92.3196\text{ g/mg}$          |
|             | R= 0.9927                                                              | R= 0.9927                                                              | R= 0.9924                                                                   |
| MET.NAT.    | $K_L=0.676622\text{ min}^{-1}$<br>$q_e=-0.229648\text{ }\mu\text{g/g}$ | $K_2=-491782\text{ g/mg.min}$<br>$q_e=-0.459296\text{ }\mu\text{g/g}$  | $\alpha=1.354274\text{E}+09\text{g/mg.min}$<br>$\beta=-133.196\text{ g/mg}$ |
|             | R= 0.9646                                                              | R= 0.9646                                                              | R= 0.9592                                                                   |

**Tabla 21. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R).**

| TRATAMIENTO | MODELOS CINÉTICOS (MgCl <sub>2</sub> /40%/35°C)                   |                                                                   |                                                                              |
|-------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|             | Lagergren                                                         | P.S.O.                                                            | Elovich                                                                      |
| 39%/90°C    | $K_L=0.926156\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-1.59919\ \mu\text{g/g}$    | $K_2=-0.012442\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-3.58205\ \mu\text{g/g}$   | $\alpha=-5.70494\text{g/mg.min}$<br>$\beta=-4.99135\ \text{g/mg}$            |
|             | R= 0.9837                                                         | R= 0.9908                                                         | R= 0.9927                                                                    |
| 39%/100°C   | $K_L=0.980500\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-1.66100\ \mu\text{g/g}$    | $K_2= 2.699516\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-3.31969\ \mu\text{g/g}$   | $\alpha=-71.6307\text{g/mg.min}$<br>$\beta=-6.48676\ \text{g/mg}$            |
|             | R= 0.9947                                                         | R= 0.9946                                                         | R= 0.9997                                                                    |
| 39%/110°C   | $K_L=0.994500\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-1.68900\ \mu\text{g/g}$    | $K_2= 2.944137\ \text{g/mg.min}$<br>$q_e=-3.37626\ \mu\text{g/g}$ | $\alpha=-269.383\text{g/mg.min}$<br>$\beta=-7.22700\ \text{g/mg}$            |
|             | R= 0.9958                                                         | R= 0.9957                                                         | R= 0.9997                                                                    |
| 32%/90°C    | $K_L=0.043538\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-1.54291\ \mu\text{g/g}$    | $K_2=-0.014431\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-3.31088\ \mu\text{g/g}$   | $\alpha=-17.1770\text{g/mg.min}$<br>$\beta=-6.25472\ \text{g/mg}$            |
|             | R= 0.9998                                                         | R= 0.9999                                                         | R= 0.9997                                                                    |
| 32%/100°C   | $K_L=1.939500\text{min}^{-1}$<br>$q_e=1.921000\ \mu\text{g/g}$    | $K_2= 104579.3\ \text{g/mg.min}$<br>$q_e=3.841700\ \mu\text{g/g}$ | $\alpha=1.478617\text{E}+10\text{g/mg.min}$<br>$\beta=16.06509\ \text{g/mg}$ |
|             | R= 0.9936                                                         | R= 0.9936                                                         | R= 0.9892                                                                    |
| 32%/110°C   | $K_L=0.850261\text{min}^{-1}$<br>$q_e=1.984084\ \mu\text{g/g}$    | $K_2=-0.043202\ \text{g/mg.min}$<br>$q_e=3.834660\ \mu\text{g/g}$ | $\alpha=1.272640\text{E}+09\text{g/mg.min}$<br>$\beta=14.27482\ \text{g/mg}$ |
|             | R= 0.9981                                                         | R= 0.9990                                                         | R= 0.9959                                                                    |
| C.TAM.NAT.  | $K_L=0.036556\ \text{min}^{-1}$<br>$q_e=-0.735746\ \mu\text{g/g}$ | $K_2= 301667.4\ \text{g/mg.min}$<br>$q_e=-1.39470\ \mu\text{g/g}$ | $\alpha=-0.623118\text{g/mg.min}$<br>$\beta=-9.14029\ \text{g/mg}$           |
|             | R= 0.9967                                                         | R= 0.9851                                                         | R= 0.9991                                                                    |
| C.LIM.NAT.  | $K_L=0.686395\text{min}^{-1}$<br>$q_e=1.721990\ \mu\text{g/g}$    | $K_2=39171.48\text{g/mg.min}$<br>$q_e=3.443980\ \mu\text{g/g}$    | $\alpha=2.473786\text{E}+09\text{g/mg.min}$<br>$\beta=16.90591\ \text{g/mg}$ |
|             | R= 0.9954                                                         | R= 0.9954                                                         | R= 0.9923                                                                    |
| MET.NAT.    | $K_L=1.546000\ \text{min}^{-1}$<br>$q_e=1.208000\ \mu\text{g/g}$  | $K_2=118413.9\ \text{g/mg.min}$<br>$q_e=2.416489\ \mu\text{g/g}$  | $\alpha=3.099788\text{E}+09\text{g/mg.min}$<br>$\beta=24.62788\ \text{g/mg}$ |
|             | R= 0.9748                                                         | R= 0.9748                                                         | R= 0.9661                                                                    |

**Tabla 22. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R).**

| TRATAMIENTO | MODELOS CINÉTICOS (MgCl <sub>2</sub> /44%/45°C)                       |                                                                        |                                                                             |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
|             | Lagergren                                                             | P.S.O.                                                                 | Elovich                                                                     |
| 39%/90°C    | $K_L=2.224000\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-2.08850\text{ }\mu\text{g/g}$  | $K_2=2.952750\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-4.17550\text{ }\mu\text{g/g}$   | $\alpha=1.975272\text{E}+09\text{g/mg.min}$<br>$\beta=-13.7238\text{ g/mg}$ |
|             | R= 0.9792                                                             | R= 0.9792                                                              | R= 0.9784                                                                   |
| 39%/100°C   | $K_L=2.120955\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-2.27562\text{ }\mu\text{g/g}$  | $K_2=-0.012506\text{g/mg.min}$<br>$q_e=-4.94793\text{ }\mu\text{g/g}$  | $\alpha=154.570\text{g/mg.min}$<br>$\beta=-4.95388\text{ g/mg}$             |
|             | R= 0.9952                                                             | R= 0.9995                                                              | R= 0.9998                                                                   |
| 39%/110°C   | $K_L=1.768250\text{min}^{-1}$<br>$q_e=-2.23650\text{ }\mu\text{g/g}$  | $K_2=-0.020225\text{ g/mg.min}$<br>$q_e=-4.72819\text{ }\mu\text{g/g}$ | $\alpha=11741.5\text{g/mg.min}$<br>$\beta=-7.13851\text{ g/mg}$             |
|             | R= 0.9966                                                             | R= 0.9985                                                              | R= 0.9989                                                                   |
| 32%/90°C    | $K_L=1.405030\text{ min}^{-1}$<br>$q_e=-1.74002\mu\text{g/g}$         | $K_2=44330.94\text{ g/mg.min}$<br>$q_e=-3.48005\text{ }\mu\text{g/g}$  | $\alpha=55.3029\text{g/mg.min}$<br>$\beta=-5.99797\text{ g/mg}$             |
|             | R= 0.9939                                                             | R= 0.9939                                                              | R= 0.9992                                                                   |
| 32%/100°C   | $K_L=1.454984\text{ min}^{-1}$<br>$q_e=2.450578\mu\text{g/g}$         | $K_2=104909.0\text{ g/mg.min}$<br>$q_e=4.901820\text{ }\mu\text{g/g}$  | $\alpha=5.484972\text{E}+09\text{g/mg.min}$<br>$\beta=12.09680\text{ g/mg}$ |
|             | R= 0.9565                                                             | R= 0.9565                                                              | R= 0.9487                                                                   |
| 32%/110°C   | $K_L=0.046724\text{min}^{-1}$<br>$q_e=2.333169\text{ }\mu\text{g/g}$  | $K_2=0.020348\text{ g/mg.min}$<br>$q_e=4.778527\text{ }\mu\text{g/g}$  | $\alpha=91349582\text{g/mg.min}$<br>$\beta=11.21882\text{ g/mg}$            |
|             | R= 0.9600                                                             | R= 0.9548                                                              | R= 0.9529                                                                   |
| C.TAM.NAT.  | $K_L=0.017430\text{ min}^{-1}$<br>$q_e=-1.31868\text{ }\mu\text{g/g}$ | $K_2=-0.002492\text{ g/mg.min}$<br>$q_e=-3.40143\text{ }\mu\text{g/g}$ | $\alpha=-0.043365\text{g/mg.min}$<br>$\beta=-2.25225\text{ g/mg}$           |
|             | R= 0.9981                                                             | R= 0.9989                                                              | R= 0.9991                                                                   |
| C.LIM.NAT.  | $K_L=0.644647\text{min}^{-1}$<br>$q_e=2.100865\text{ }\mu\text{g/g}$  | $K_2=-0.013270\text{ g/mg.min}$<br>$q_e=3.713659\text{ }\mu\text{g/g}$ | $\alpha=1.187073\text{E}+09\text{g/mg.min}$<br>$\beta=13.39099\text{ g/mg}$ |
|             | R= 0.9713                                                             | R= 0.9844                                                              | R= 0.9637                                                                   |
| MET.NAT.    | $K_L=1.711424\text{min}^{-1}$<br>$q_e=0.886777\text{ }\mu\text{g/g}$  | $K_2=-7042.03\text{g/mg.min}$<br>$q_e=1.77\mu\text{g/g}$               | $\alpha=27659.93\text{g/mg.min}$<br>$\beta=20.14369\text{ g/mg}$            |
|             | R= 0.9834                                                             | R= 0.9834                                                              | R= 0.9852                                                                   |

**Tabla 23. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R).**

| TRATAMIENTO | MODELOS CINÉTICOS (NaNO <sub>2</sub> /67%/25°C)                              |                                                                           |                                                                                                |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
|             | Lagergren                                                                    | P.S.O.                                                                    | Elovich                                                                                        |
| 39%/90°C    | $K_L = 2.3530 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 3.0918 \text{ } \mu\text{g/g}$     | $K_2 = 7230.256 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 6.184 \text{ } \mu\text{g/g}$ | $\alpha = 3.484444\text{E}+120 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 9.274799\text{E}+01 \text{ g/mg}$ |
|             | R= 0.9982                                                                    | R= 0.9982                                                                 | R=0.9980                                                                                       |
| 39%/100°C   | $K_L = 1.294199 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 2.861504 \text{ } \mu\text{g/g}$ | $K_2 = -5079.75 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 5.72 \text{ } \mu\text{g/g}$  | $\alpha = 288.3091 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 4.098508 \text{ g/mg}$                        |
|             | R= 0.9988                                                                    | R= 0.9988                                                                 | R= 0.9954                                                                                      |
| 39%/110°C   | $K_L = 6.249639 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 2.992152 \text{ } \mu\text{g/g}$ | $K_2 = -41408.2 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 6.0 \text{ } \mu\text{g/g}$   | $\alpha = 5.428041\text{E}+13 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 1.297410\text{E}+01 \text{ g/mg}$  |
|             | R= 0.9993                                                                    | R= 0.9993                                                                 | R= 0.9997                                                                                      |
| 32%/90°C    | $K_L = 6.392654 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 3.087437 \text{ } \mu\text{g/g}$ | $K_2 = -11018.1 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 6.2 \text{ } \mu\text{g/g}$   | $\alpha = 5.877973\text{E}+14 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 1.335490\text{E}+01 \text{ g/mg}$  |
|             | R= 0.9971                                                                    | R= 0.9971                                                                 | R= 0.9974                                                                                      |
| 32%/100°C   | $K_L = 5.979577 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 2.891928 \text{ } \mu\text{g/g}$ | $K_2 = -2577.5 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 5.78 \text{ } \mu\text{g/g}$   | $\alpha = 9.519209\text{E}+33 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 2.983046\text{E}+01 \text{ g/mg}$  |
|             | R= 0.9923                                                                    | R= 0.9923                                                                 | R= 0.9924                                                                                      |
| 32%/110°C   | $K_L = 6.903700 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 3.295908 \text{ } \mu\text{g/g}$ | $K_2 = 3841.759 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 6.592 \text{ } \mu\text{g/g}$ | $\alpha = 1.304932\text{E}+09 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 8.438269 \text{ g/mg}$             |
|             | R= 0.9899                                                                    | R= 0.9899                                                                 | R=0.9858                                                                                       |
| C.TAM.NAT.  | $K_L = 8.212496 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 3.915816 \text{ } \mu\text{g/g}$ | $K_2 = -49514.8 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 7.8 \text{ } \mu\text{g/g}$   | $\alpha = 2.855583\text{E}+14 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 1.027827\text{E}+01 \text{ g/mg}$  |
|             | R= 0.9994                                                                    | R= 0.9994                                                                 | R= 0.9997                                                                                      |
| C.LIM.NAT.  | $K_L = 0.631599 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 4.649844 \text{ } \mu\text{g/g}$ | $K_2 = -9174.52 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 9.30 \text{ } \mu\text{g/g}$  | $\alpha = 241167.8 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 4.0 \text{ g/mg}$                             |
|             | R= 0.9976                                                                    | R= 0.9976                                                                 | R= 0.9993                                                                                      |
| MET.NAT.    | $K_L = 5.067587 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 2.435183 \text{ } \mu\text{g/g}$ | $K_2 = -61937.2 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 4.9 \text{ } \mu\text{g/g}$   | $\alpha = 5.544123\text{E}+11 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 1.409306\text{E}+01 \text{ g/mg}$  |
|             | R= 0.9994                                                                    | R= 0.9994                                                                 | R= 0.9999                                                                                      |



**Tabla 24. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R).**

| TRATAMIENTO | MODELOS CINÉTICOS (NaNO <sub>2</sub> /68%/35°C)                     |                                                                  |                                                                                                   |
|-------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
|             | Lagergren                                                           | P.S.O.                                                           | Elovich                                                                                           |
| 39%/90°C    | $K_L = 1.198932 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 1.676744 \mu\text{g/g}$ | $K_2 = 29189.44 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 3.35 \mu\text{g/g}$  | $\alpha = 962735424 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 16.79049 \text{ g/mg}$                          |
|             | R= 0.9995                                                           | R= 0.9995                                                        | R= 0.9983                                                                                         |
| 39%/100°C   | $K_L = 1.477957 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 1.514572 \mu\text{g/g}$ | $K_2 = 3644.322 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 3.029 \mu\text{g/g}$ | $\alpha = 641498610 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 18.37621 \text{ g/mg}$                          |
|             | R= 0.9977                                                           | R= 0.9977                                                        | R= 0.9969                                                                                         |
| 39%/110°C   | $K_L = 1.481523 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 1.60620 \mu\text{g/g}$  | $K_2 = 673.890 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 3.212 \mu\text{g/g}$  | $\alpha = 2.020406 \text{ E}+21 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 3.565191 \text{ E}+01 \text{ g/mg}$ |
|             | R= 0.9942                                                           | R= 0.9942                                                        | R= 0.9944                                                                                         |
| 32%/90°C    | $K_L = 7.570409 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 2.406341 \mu\text{g/g}$ | $K_2 = 10078.48 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 4.81 \mu\text{g/g}$  | $\alpha = 4.823039 \text{ E}+09 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 12.20490 \text{ g/mg}$              |
|             | R= 0.9904                                                           | R= 0.9904                                                        | R= 0.9848                                                                                         |
| 32%/100°C   | $K_L = 11.43596 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 1.94834 \mu\text{g/g}$  | $K_2 = 8234.621 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 3.897 \mu\text{g/g}$ | $\alpha = 2.234661 \text{ E}+09 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 14.90604 \text{ g/mg}$              |
|             | R= 0.9753                                                           | R= 0.9753                                                        | R= 0.9662                                                                                         |
| 32%/110°C   | $K_L = 4.518104 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 1.763140 \mu\text{g/g}$ | $K_2 = 14009.15 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 3.5 \mu\text{g/g}$   | $\alpha = 2.777372 \text{ E}+09 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 16.56949 \text{ g/mg}$              |
|             | R= 0.9928                                                           | R= 0.9928                                                        | R= 0.9882                                                                                         |
| C.TAM.NAT.  | $K_L = 1.134926 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 3.170311 \mu\text{g/g}$ | $K_2 = 10522.81 \text{ min}$<br>$q_e = 6.34 \mu\text{g/g}$       | $\alpha = 2.080011 \text{ E}+09 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 8.918012 \text{ g/mg}$              |
|             | R= 0.9985                                                           | R= 0.9985                                                        | R= 0.9967                                                                                         |
| C.LIM.NAT.  | $K_L = 3.365883 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 1.639859 \mu\text{g/g}$ | $K_2 = 6115.70 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 3.28 \mu\text{g/g}$   | $\alpha = 3718.328 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 9.191 \text{ g/mg}$                              |
|             | R= 0.9901                                                           | R= 0.9901                                                        | R= 0.9926                                                                                         |
| MET.NAT.    | $K_L = 1.257779 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 1.24196 \mu\text{g/g}$  | $K_2 = 43443.02 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 2.48 \mu\text{g/g}$  | $\alpha = 4.040690 \text{ E}+09 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 24.11433 \text{ g/mg}$              |
|             | R= 0.9994                                                           | R= 0.9994                                                        | R= 0.9980                                                                                         |

**Tabla 25. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R).**

| TRATAMIENTO | MODELOS CINÉTICOS (NaNO <sub>2</sub> /77%/45°C)                     |                                                                       |                                                                                                   |
|-------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
|             | Lagergren                                                           | P.S.O.                                                                | Elovich                                                                                           |
| 39%/90°C    | $K_L = 8.1907 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 0.6870 \mu\text{g/g}$     | $K_2 = 1538.753 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 1.374 \mu\text{g/g}$      | $\alpha = 0.892062 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 9.9184 \text{ g/mg}$                             |
|             | R = 0.7460                                                          | R = 0.7460                                                            | R = 0.7193                                                                                        |
| 39%/100°C   | $K_L = 23.0026 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 0.7514 \mu\text{g/g}$    | $K_2 = 3168.750 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 1.503 \mu\text{g/g}$      | $\alpha = 5.565286 \text{ E}+14 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 4.642983 \text{ E}+02 \text{ g/mg}$ |
|             | R = 0.5963                                                          | R = 0.5963                                                            | R = 0.5949                                                                                        |
| 39%/110°C   | $K_L = 21.67076 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 0.79931 \mu\text{g/g}$  | $K_2 = 3470.201 \text{ g/min}^{-1}$<br>$q_e = 1.599 \mu\text{g/g}$    | $\alpha = 5.403880 \text{ E}+14 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 4.363652 \text{ E}+02 \text{ g/mg}$ |
|             | R = 0.6178                                                          | R = 0.6178                                                            | R = 0.6165                                                                                        |
| 32%/90°C    | $K_L = 0.924188 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 2.008940 \mu\text{g/g}$ | $K_2 = 0.023538 \text{ g/min}^{-1}$<br>$q_e = 3.762713 \mu\text{g/g}$ | $\alpha = 2.094330 \text{ E}+09 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 14.32812 \text{ g/mg}$              |
|             | R = 0.9948                                                          | R = 0.9982                                                            | R = 0.9909                                                                                        |
| 32%/100°C   | $K_L = 0.889422 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 1.444909 \mu\text{g/g}$ | $K_2 = 0.009689 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 1.877060 \mu\text{g/g}$   | $\alpha = 1.904732 \text{ E}+09 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 20.19581 \text{ g/mg}$              |
|             | R = 0.7894                                                          | R = 0.9619                                                            | R = 0.7674                                                                                        |
| 32%/110°C   | $K_L = 0.889243 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 2.923809 \mu\text{g/g}$ | $K_2 = 117487 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 5.847668 \mu\text{g/g}$     | $\alpha = 0.526370 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 1.510369 \text{ g/mg}$                           |
|             | R = 0.9176                                                          | R = 0.9176                                                            | R = 0.9447                                                                                        |
| C.TAM.NAT.  | $K_L = 0.826066 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 2.340735 \mu\text{g/g}$ | $K_2 = 26402.05 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 4.681519 \mu\text{g/g}$   | $\alpha = 369778002 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 11.52647 \text{ g/mg}$                          |
|             | R = 0.8069                                                          | R = 0.8069                                                            | R = 0.7987                                                                                        |
| C.LIM.NAT.  | $K_L = 0.677625 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 1.320250 \mu\text{g/g}$ | $K_2 = 118619.0 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 2.640560 \mu\text{g/g}$   | $\alpha = 3.872579 \text{ E}+09 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 22.63553 \text{ g/mg}$              |
|             | R = 0.9419                                                          | R = 0.9419                                                            | R = 0.9340                                                                                        |
| MET.NAT.    | $K_L = 0.029693 \text{ min}^{-1}$<br>$q_e = 1.304535 \mu\text{g/g}$ | $K_2 = 0.007647 \text{ g/mg.min}$<br>$q_e = 2.953520 \mu\text{g/g}$   | $\alpha = 0.470201 \text{ mg/g.min}$<br>$\beta = 4.496395 \text{ g/mg}$                           |
|             | R = 0.9292                                                          | R = 0.9202                                                            | R = 0.9139                                                                                        |

**Tabla 26. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R).**

| TRATAMIENTO | MODELOS CINÉTICOS ((NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /90%/25°C) |                                                                       |                                                                            |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
|             | Lagergren                                                                     | P.S.O.                                                                | Elovich                                                                    |
| 39%/90°C    | $K_L=0.694235\text{min}^{-1}$<br>$q_e=11.98879\text{ }\mu\text{g/g}$          | $K_2=15206.58\text{g/mg.min}$<br>$q_e=23.97758\text{ }\mu\text{g/g}$  | $\alpha=730329234\text{mg/g.min}$<br>$\beta=2.154373\text{ g/mg}$          |
|             | R= 0.9984                                                                     | R= 0.9984                                                             | R= 0.9957                                                                  |
| 39%/100°C   | $K_L=0.659906\text{min}^{-1}$<br>$q_e=11.67376\text{ }\mu\text{g/g}$          | $K_2=0.012435\text{g/mg.min}$<br>$q_e=22.89237\text{ }\mu\text{g/g}$  | $\alpha=8384497\text{mg/g.min}$<br>$\beta=2.226878\text{ g/mg}$            |
|             | R= 0.9990                                                                     | R= 0.9993                                                             | R= 0.9969                                                                  |
| 39%/110°C   | $K_L=0.087349\text{min}^{-1}$<br>$q_e=11.91838\text{ }\mu\text{g/g}$          | $K_2=7566.511\text{g/mg.min}$<br>$q_e=23.74532\text{ }\mu\text{g/g}$  | $\alpha=1.2065\text{E}+09\text{ mg/g.min}$<br>$\beta=2.218906\text{ g/mg}$ |
|             | R= 0.9980                                                                     | R= 0.9979                                                             | R= 0.9965                                                                  |
| 32%/90°C    | $K_L=0.080529\text{min}^{-1}$<br>$q_e=12.19758\text{ }\mu\text{g/g}$          | $K_2=27026.41\text{g/mg.min}$<br>$q_e=24.26447\text{ }\mu\text{g/g}$  | $\alpha=1.0187\text{E}+09\text{ mg/g.min}$<br>$\beta=2.157321\text{ g/mg}$ |
|             | R= 0.9902                                                                     | R= 0.9900                                                             | R= 0.9881                                                                  |
| 32%/100°C   | $K_L=0.089520\text{min}^{-1}$<br>$q_e=12.49609\text{ }\mu\text{g/g}$          | $K_2=3921.453\text{g/mg.min}$<br>$q_e=24.90593\text{ }\mu\text{g/g}$  | $\alpha=4.5689\text{E}+09\text{ mg/g.min}$<br>$\beta=2.223714\text{ g/mg}$ |
|             | R= 0.9982                                                                     | R= 0.9981                                                             | R= 0.9969                                                                  |
| 32%/110°C   | $K_L=0.083219\text{min}^{-1}$<br>$q_e=12.68549\text{ }\mu\text{g/g}$          | $K_2=0.026148\text{g/mg.min}$<br>$q_e=25.46077\text{ }\mu\text{g/g}$  | $\alpha=1.4512\text{E}+09\text{ mg/g.min}$<br>$\beta=2.097015\text{ g/mg}$ |
|             | R= 0.9989                                                                     | R= 0.9988                                                             | R= 0.9981                                                                  |
| C.TAM.NAT.  | $K_L=0.729392\text{min}^{-1}$<br>$q_e=9.672913\text{ }\mu\text{g/g}$          | $K_2=0.005196\text{g/mg.min}$<br>$q_e=20.34198\text{ }\mu\text{g/g}$  | $\alpha=2193626\text{mg/g.min}$<br>$\beta=2.063255\text{ g/mg}$            |
|             | R= 0.9974                                                                     | R= 0.9991                                                             | R= 0.9989                                                                  |
| C.LIM.NAT.  | $K_L=0.061355\text{min}^{-1}$<br>$q_e=8.406231\text{ }\mu\text{g/g}$          | $K_2=-24619.8\text{ g/mg.min}$<br>$q_e=16.57947\text{ }\mu\text{g/g}$ | $\alpha=91250.\text{mg/g.min}$<br>$\beta=2.021478\text{ g/mg}$             |
|             | R= 0.9982                                                                     | R= 0.9970                                                             | R= 0.9991                                                                  |
| MET.NAT.    | $K_L=56.63675\text{min}^{-1}$<br>$q_e=1.495707\text{ }\mu\text{g/g}$          | $K_2=0.003461\text{g/mg.min}$<br>$q_e=13.51968\text{ }\mu\text{g/g}$  | $\alpha=56.63675\text{mg/g.min}$<br>$\beta=1.495707\text{ g/mg}$           |
|             | R= 0.9999                                                                     | R= 0.9999                                                             | R= 0.9999                                                                  |

**Tabla 27. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R).**

| TRATAMIENTO | MODELOS CINÉTICOS ((NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /77%/35°C) |                                                              |                                                                              |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|             | Lagergren                                                                     | P.S.O.                                                       | Elovich                                                                      |
| 39%/90°C    | $K_L=0.726879\text{min}^{-1}$<br>$q_e=8.302978\mu\text{g/g}$                  | $K_2=0.01387\text{g/mg.min}$<br>$q_e=16.19511\mu\text{g/g}$  | $\alpha=7.616976\text{E}+09\text{ mg/g.min}$<br>$\beta=3.454298\text{ g/mg}$ |
|             | R = 0.9989                                                                    | R= 0.9993                                                    | R= 0.9969                                                                    |
| 39%/100°C   | $K_L=0.065690\text{min}^{-1}$<br>$q_e=8.284027\mu\text{g/g}$                  | $K_2=-52680.3\text{g/mg.min}$<br>$q_e=16.38312\mu\text{g/g}$ | $\alpha=381332465\text{mg/g.min}$<br>$\beta=3.116610\text{ g/mg}$            |
|             | R= 0.9999                                                                     | R= 0.9991                                                    | R= 0.9997                                                                    |
| 39%/110°C   | $K_L=0.047381\text{min}^{-1}$<br>$q_e=8.450668\mu\text{g/g}$                  | $K_2=-26532.9\text{g/mg.min}$<br>$q_e=16.41373\mu\text{g/g}$ | $\alpha=6735.882\text{mg/g.min}$<br>$\beta=1.703477\text{ g/mg}$             |
|             | R= 0.9968                                                                     | R= 0.9913                                                    | R= 0.9942                                                                    |
| 32%/90°C    | $K_L=0.058583\text{min}^{-1}$<br>$q_e=8.540214\mu\text{g/g}$                  | $K_2=-39420.7\text{g/mg.min}$<br>$q_e=16.80715\mu\text{g/g}$ | $\alpha=15695911\text{mg/g.min}$<br>$\beta=2.638329\text{ g/mg}$             |
|             | R= 0.9998                                                                     | R= 0.9981                                                    | R= 0.9993                                                                    |
| 32%/100°C   | $K_L=2.456526\text{min}^{-1}$<br>$q_e=7.742563\mu\text{g/g}$                  | $K_2=0.010045\text{g/mg.min}$<br>$q_e=16.01156\mu\text{g/g}$ | $\alpha=374069528\text{mg/g.min}$<br>$\beta=3.303502\text{ g/mg}$            |
|             | R= 0.9975                                                                     | R= 0.9983                                                    | R= 0.9980                                                                    |
| 32%/110°C   | $K_L=2.403838\text{min}^{-1}$<br>$q_e=7.711685\mu\text{g/g}$                  | $K_2=0.011849\text{g/mg.min}$<br>$q_e=15.87234\mu\text{g/g}$ | $\alpha=716984724\text{mg/g.min}$<br>$\beta=3.404410\text{ g/mg}$            |
|             | R= 0.9991                                                                     | R= 0.9997                                                    | R= 0.9995                                                                    |
| C.TAM.NAT.  | $K_L=2.150333\text{min}^{-1}$<br>$q_e=11.29448\mu\text{g/g}$                  | $K_2=0.002935\text{g/mg.min}$<br>$q_e=20.44979\mu\text{g/g}$ | $\alpha=2.262321\text{E}+09\text{ mg/g.min}$<br>$\beta=2.399302\text{ g/mg}$ |
|             | R= 0.9870                                                                     | R= 0.9951                                                    | R= 0.9810                                                                    |
| C.LIM.NAT.  | $K_L=0.058262\text{min}^{-1}$<br>$q_e=8.913463\mu\text{g/g}$                  | $K_2=0.006981\text{g/mg.min}$<br>$q_e=18.28602\mu\text{g/g}$ | $\alpha=62171254\text{mg/g.min}$<br>$\beta=2.687811\text{ g/mg}$             |
|             | R= 0.9990                                                                     | R= 0.9984                                                    | R= 0.9980                                                                    |
| MET.NAT.    | $K_L=0.019312\text{min}^{-1}$<br>$q_e=16.94494\mu\text{g/g}$                  | $K_2=0.000283\text{g/mg.min}$<br>$q_e=40.77047\mu\text{g/g}$ | $\alpha=0.683908\text{mg/g.min}$<br>$\beta=0.187733\text{ g/mg}$             |
|             | R= 0.9996                                                                     | R= 0.9981                                                    | R= 0.9976                                                                    |

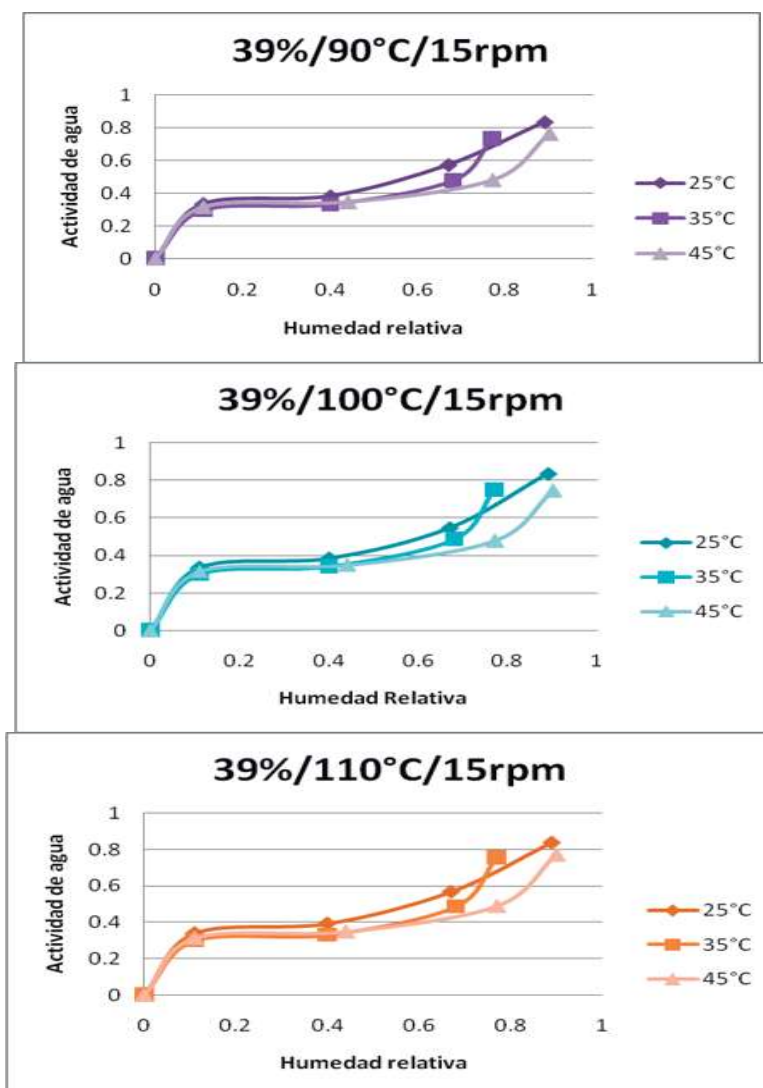
**Tabla 28. Coeficientes de los modelos cinéticos de Lagergren, Pseudo segundo orden y Elovich con sus coeficientes de correlación (R).**

| TRATAMIENTO | MODELOS CINÉTICOS ((NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /90%/45°C) |                                                              |                                                                             |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
|             | Lagergren                                                                     | P.S.O.                                                       | Elovich                                                                     |
| 39%/90°C    | $K_L=0.071853\text{min}^{-1}$<br>$q_e=11.59526\mu\text{g/g}$                  | $K_2=-44172.7\text{g/mg.min}$<br>$q_e=23.00027\mu\text{g/g}$ | $\alpha=495665963\text{mg/g.min}$<br>$\beta=2.213450\text{ g/mg}$           |
|             | R= 0.9991                                                                     | R= 0.9987                                                    | R= 0.9991                                                                   |
| 39%/100°C   | $K_L=1.144925\text{min}^{-1}$<br>$q_e=10.37277\mu\text{g/g}$                  | $K_2=429903.6\text{g/mg.min}$<br>$q_e=20.74556\mu\text{g/g}$ | $\alpha=2.149541\text{E}+09\text{mg/g.min}$<br>$\beta=2.622836\text{ g/mg}$ |
|             | R= 0.9890                                                                     | R= 0.9890                                                    | R= 0.9836                                                                   |
| 39%/110°C   | $K_L=1.012350\text{min}^{-1}$<br>$q_e=10.06877\mu\text{g/g}$                  | $K_2=17536.13\text{g/mg.min}$<br>$q_e=20.13754\mu\text{g/g}$ | $\alpha=3.810993\text{E}+09\text{mg/g.min}$<br>$\beta=2.754210\text{ g/mg}$ |
|             | R= 0.9919                                                                     | R= 0.9919                                                    | R= 0.9884                                                                   |
| 32%/90°C    | $K_L=2.287984\text{min}^{-1}$<br>$q_e=12.00333\mu\text{g/g}$                  | $K_2=0.002359\text{g/mg.min}$<br>$q_e=26.11073\mu\text{g/g}$ | $\alpha=7345.945\text{mg/g.min}$<br>$\beta=1.138324\text{ g/mg}$            |
|             | R= 0.9854                                                                     | R= 0.9901                                                    | R= 0.9885                                                                   |
| 32%/100°C   | $K_L=2.361625\text{min}^{-1}$<br>$q_e=10.09237\mu\text{g/g}$                  | $K_2=0.002897\text{g/mg.min}$<br>$q_e=21.90204\mu\text{g/g}$ | $\alpha=1313.743\text{mg/g.min}$<br>$\beta=1.187494\text{ g/mg}$            |
|             | R= 0.9926                                                                     | R= 0.9968                                                    | R= 0.9966                                                                   |
| 32%/110°C   | $K_L=0.715736\text{min}^{-1}$<br>$q_e=9.722314\mu\text{g/g}$                  | $K_2=41333.78\text{g/mg.min}$<br>$q_e=19.44459\mu\text{g/g}$ | $\alpha=2.113663\text{E}+09\text{mg/g.min}$<br>$\beta=2.803465\text{ g/mg}$ |
|             | R= 0.9905                                                                     | R= 0.9905                                                    | R= 0.9851                                                                   |
| C.TAM.NAT.  | $K_L=0.760222\text{min}^{-1}$<br>$q_e=13.92947\mu\text{g/g}$                  | $K_2=10727.69\text{g/mg.min}$<br>$q_e=27.85895\mu\text{g/g}$ | $\alpha=500833999\text{mg/g.min}$<br>$\beta=1.813518\text{ g/mg}$           |
|             | R= 0.9696                                                                     | R= 0.9696                                                    | R= 0.9692                                                                   |
| C.LIM.NAT.  | $K_L=2.991753\text{min}^{-1}$<br>$q_e=10.85124\mu\text{g/g}$                  | $K_2=0.014700\text{g/mg.min}$<br>$q_e=22.06981\mu\text{g/g}$ | $\alpha=1.185614\text{E}+09\text{mg/g.min}$<br>$\beta=2.434307\text{ g/mg}$ |
|             | R= 0.9991                                                                     | R= 0.9993                                                    | R= 0.9993                                                                   |
| MET.NAT.    | $K_L=0.737680\text{min}^{-1}$<br>$q_e=34.47439\mu\text{g/g}$                  | $K_2=14306.93\text{g/mg.min}$<br>$q_e=68.94879\mu\text{g/g}$ | $\alpha=1.243435\text{E}+09\text{mg/g.min}$<br>$\beta=0.737567\text{ g/mg}$ |
|             | R= 0.9838                                                                     | R= 0.9838                                                    | R= 0.9755                                                                   |

En las Tablas de la 17 a la 28 se describe la capacidad de desorción y adsorción de los materiales sólidos; se observa que el modelo matemático que mejor describe la capacidad de sorción es el de Primer Orden o de Lagergren que se calcularon a partir de los valores de porcentaje de agua adsorbida en función del tiempo y sus coeficientes de correlación (R), donde se aprecian los valores de las constantes para medir la velocidad de sorción. Se observa que para los tres modelos se obtienen coeficientes de correlación excelentes mayores a 0.9. Observando que en las microatmósferas que abarcan los rangos de HR de 11-40% las muestras extruidas (CTE1, CTE2, CTE3) son las que presentan una velocidad de desorción mas elevada, mientras que a las condiciones de microatmósferas de 70-90% HR las muestras extruidas (CTE4, CTE5, CTE6)

tienen velocidades de sorción más altas o podría decirse que alcanzan más rápido su  $X_{eq}$ .

Las figuras 18-20 representan la comparación de las isotermas experimentales de adsorción de la cáscara de tamarindo extruida (39%/90°C, 39%/100, 39%/110°C) a tres temperaturas (25, 35 y 45°C) realizadas con los valores finales de actividad de agua.



**Figura 18.** Isotermas de adsorción de la s muestras extruidas (39%/90°C, 39%100°C, 39%110°C) a 25, 35 y 45°C

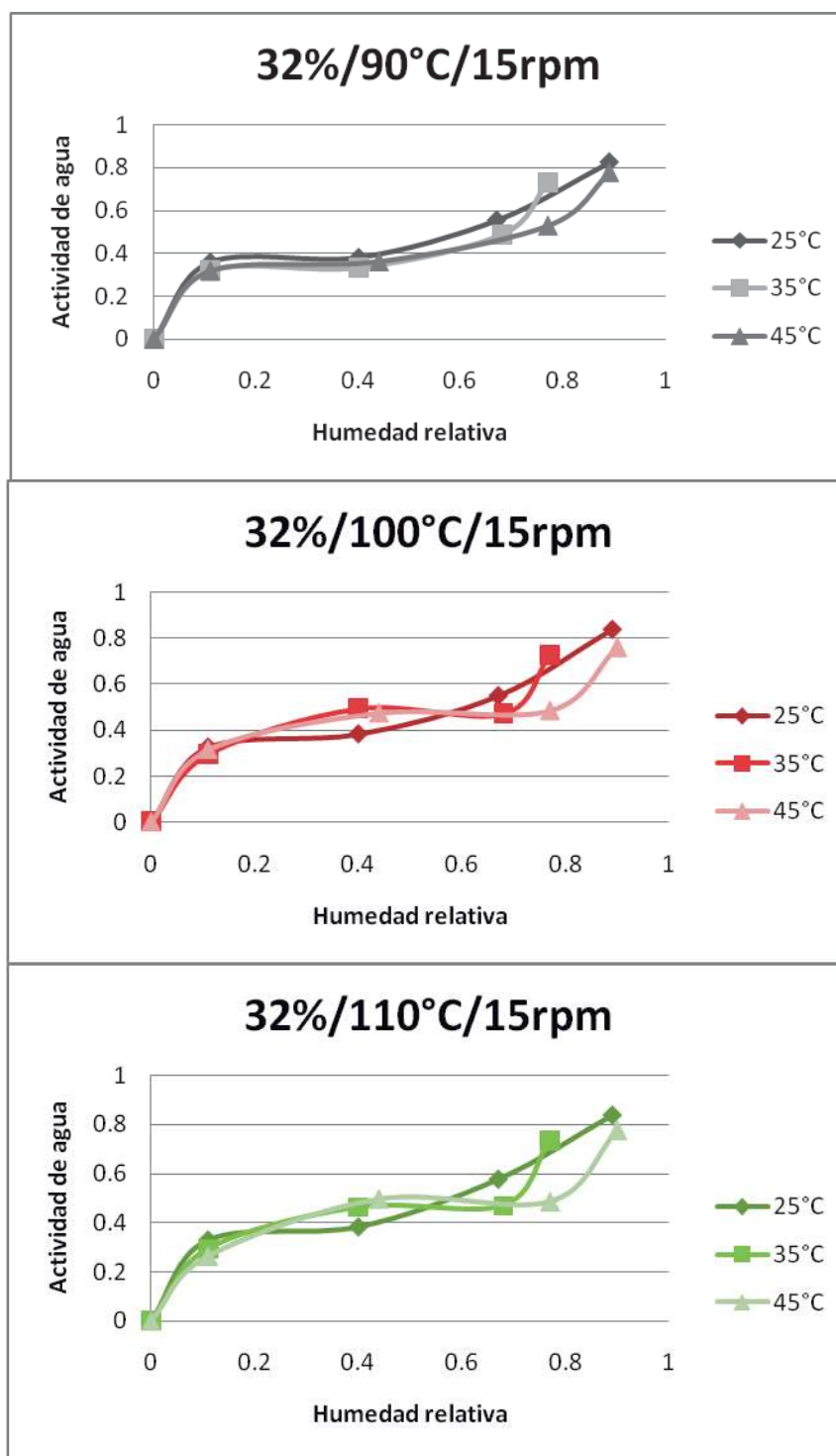


Figura 19. Isotermas de adsorción de la s muestras extruidas (32%/90°C, 32%100°C, 32%110°C) a 25, 35 y 45°C

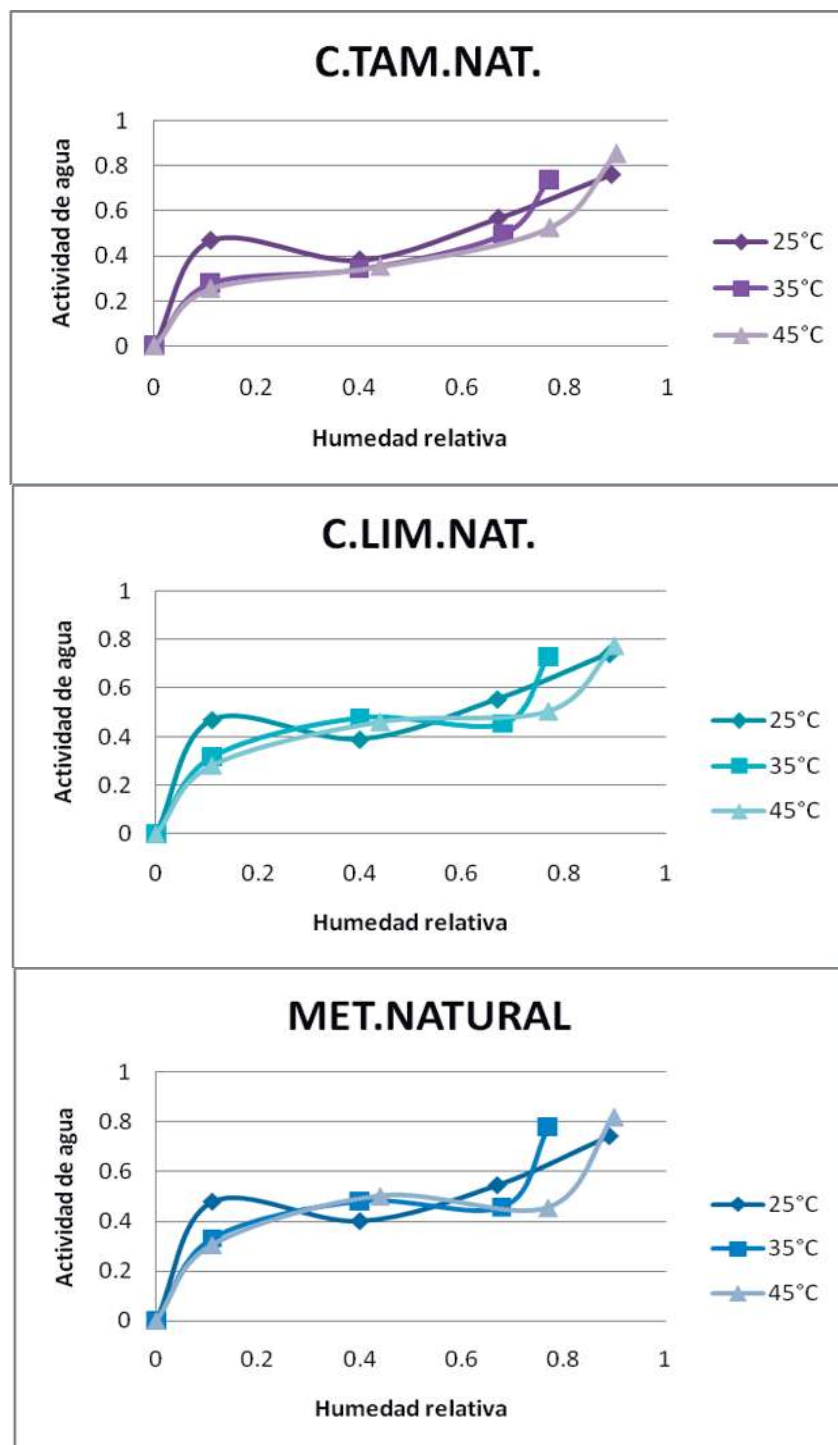


Figura 20. Isothermas de adsorción de las muestras control (CTN, CLN, y MN) a 25, 35 y 45°C



---

Se observó en todas las isothermas que la humedad de equilibrio aumentó conforme se incrementó el valor de humedad relativa siendo este aumento más rápido en valores de humedad relativa superiores a 0.6.

También se evidenció la dependencia de la humedad de equilibrio con la temperatura, notándose que este aumento disminuyó con el incremento de la temperatura para un valor fijo de humedad relativa.

Esto indica que las cáscaras son menos higroscópicas a temperaturas altas. Mazza, G. (1980) han explicado este comportamiento, argumentando que un incremento en la temperatura ocasiona cambios químicos y físicos en el producto, que pueden reducir el número de sitios activos donde se unen las moléculas de agua con la superficie del sólido del alimento.

De acuerdo a la clasificación descrita por la IUPAC las isothermas encontradas son de tipo IV. Nos dice que el adsorbente tiene una cantidad de grupos disponibles, y que conforme va aumentando la cantidad del compuesto adsorbido estos sitios disminuyen, por lo tanto a medida que aumente la concentración, hay menos posibilidad de que el adsorbente encuentre sitios disponibles donde fijarse.

Estas isothermas son características de sólidos mesoporosos ya que hay un incremento de cantidad adsorbida importante a presiones relativas intermedias, y ocurre mediante un mecanismo de llenado de multicapas lo cual conllevaría a la aparición de ciclo de histéresis que se debe al proceso de llenado de los mesoporosos gobernado por la condensación capilar. Esto se puede observar en las condiciones de humedad relativa de 60 a 90%.

Por lo cual se podría decir que nuestros materiales presentan las características de adsorbentes que tienen un tamaño de poro de entre 20 a 500 Å. La mayoría de

---

los investigadores representan a estos sólidos como arreglos regulares de cilindros, esferas, placas paralelas.

Kraermer (1931) describe que según la geometría del poro puede ocurrir que la condensación capilar se produzca a una presión diferente a la que se produce la evaporación del poro, ocasionándose un ciclo de histéresis en la isoterma de adsorción-desorción.

Por lo tanto dadas las diferentes etapas de vaciado y llenado de un poro ya sea de cilindro cerrado o cilindro abierto, la región de multicapa previa a la condensación que presentan las isothermas ocurre en rangos de HR no mayores de 70% lo que nos habla de que es el valor necesario para que se produzca la condensación capilar y es posible que el tipo de poro que presentan nuestros materiales sea un poro de cilindro cerrado.

---

## 11. CONCLUSIÓN

El efecto del tratamiento de extrusión sobre la cáscara de tamarindo no beneficia la capacidad de adsorción de agua, aunque este favorezca la fracción de fibra soluble (incremento) ya que esta juega un papel importante en la capacidad de adsorción de agua.

Las muestras de cáscara de tamarindo con tratamiento presentan fenómenos de adsorción- desorción debido al efecto que generan las microatmósferas de humedad y la temperatura sobre alguno de los componentes de estas. Siendo las cáscaras con las condiciones de tratamiento de extrusión (32%/90°C, 32%/100°C y 32%/110°C) las que presentan una humedad de equilibrio mayor y más estable.

Las condiciones de humedad relativa y temperatura donde las cáscaras presentan una adsorción más estable son a condiciones de humedad y temperaturas intermedias.

La muestras extruidas presentan un fenómeno de sorción del tipo IV, que depende de la humedad relativa y la temperatura entre otros factores lo que nos habla de que nuestro material se clasificaría dentro de ser un sólido mesoporosos.

---

## 12. BIBLIOGRAFÍA

- AACC.**(2001). American Association of Cereal Chemists. Dietary fiber Technical Committee. The definition of dietary fiber. *Cereal Foods World*, 46:112-126.
- Aceves** LA, López JF, Palma DJ, López R, Rivera B, Rincón JA, Morales R, Hernández R. (2008). Estudio para determinar zonas de alta potencialidad del cultivo del tamarindo (*Tamarindus Indica*) en el estado de tabasco. SAGARPA, INIFAP, Tabasco, México. Tomo XVIII. 36 p.
- Aguilar** DS. (2009). Uso de Residuos de Naranja (*Citrus sinensis*) y Tamarindo (*Tamarindus indica*) como biosorbentes en la remoción de plomo, cadmio y zinc de aguas contaminadas. Tesis de Licenciatura. Facultad de Químico Farmacología. U.M.S.N.H. Morelia, Mich., México.
- Aguilar** DS. (2012).Efecto del proceso de extrusión sobre las propiedades funcionales de la cáscara de tamarindo (*Tamarindus indica* L.). Tesis de Maestría. Facultad de Químico Farmacología. U.M.S.N.H. Morelia, Mich., México.
- Ahachad** M, Almers A, Mimet. (2005). Solar-based comparasion of adsorption and absorption refrirating machines. Laboratorio de Transferencia de Calor y Energía de la Facultad de Ciencias de Morocco, *International Journal of Sustainable Energy* 24, 4:199-206.
- Anónimo.** (2009). Consultado en Julio del 2012: <http://www.limonmexicano.gob.mx/index.php?portal=limon>
- Apró** N, Rodríguez J, Gornatti C, Cuadrado C, Secreto P. (2000), La extrusión como tecnología flexible de procesamiento de alimentos, Jornada de desarrollo e innovación (CEMPAM). pag 1.
- Baudi** DS. (1999). Química de los alimentos. Logman de México Editores, S.A. de C.V. Pearson Educación México 10.3.1: 511-513
- Brown** L, Rosner B. (1999). Cholesterol-lowering effects of dietary fiber: a meta-analysis. *American Journal of Clinical Nutrition*, 69 (1): 30-42.

---

**De Caluwé E**, Halamová K, Van Damme P. (2010). *Tamarindus indica* L. – A review of traditional uses, phytochemistry and pharmacology. *Africa focus* 23 (1), 53-83.

**Documento** web en línea: Disponible (metamucil.com.mx/porque.php) (Consulta: 2012/05/18)

**Documento** web en línea: Disponible:  
<http://elrincondeneta.blogspot.mx/2012/01/limon-para-adelgazar.html> (Consulta: 2012/05/18)

**Documento** web en línea: Disponible:  
<http://princessnancyflor.blogspot.mx/2010/08/porque-lo-pidieronmas-sobre-el.html> (Consulta: 2012/05/18)

**Dubois** , M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A y Smith, F. (1956) Colorimetric method for determination of sugars and related substances, *Analytical Chemistry*, 28:3:350-356

**El-Siddig** K, Gunasena HPM, Prasad BA, Pushpakumara DKN, Ramana KYR, Vijayanand P, Williams JT. (2006). Tamarind *Tamarindus indica* L. fruits for the future 1, pp 11, 29, 31. En J.T. Williams, R.W. Smith, N. Haq, Z. Dunsiger (ed.) *International Centre for Underutilised Crops*, W. Sussex, England.

**Escudero** AE, González-Sánchez, P. (2006). La fibra dietética. *Nutrición Hospitalaria*. 21(2):61-72.

**Figuerola** F, Muñoz O, Estévez AM. (2008). La linaza como fuente de compuestos bioactivos para la elaboración de alimentos. *Agro sur*. 36 (2): 49-58.

**Fox** B y Cameron A. (2002.) *Ciencia de los alimentos, nutrición y salud*. Ed. Limusa, S.a. de C.V. p. 174-176.

**Fuentes** A. (1996). Predicción de la actividad de agua en harinas precocidas de quinchoncho (*Cajanus cajan* L. Millsp) y habas (*Canavalia ensiformis*) y sus mezclas. Trabajo grado maestría. UDO. Venezuela.

**Giles** CH, MacEwan TH, Nakwa SN. and Smith D. (1960). Studies in adsorption Par XI. A system of classification of solution adsorption isotherms, and its

- 
- use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific surface areas of solids. *J. Chem. Soc.* 3973- 3993.
- Gregg** S J. and Sing K SW. (1982). *Adsorption, Surface Area and Porosity*. Second Edition, Academic Press.
- Gutiérrez** R, A. D. (1997): Predicción de las isotermas de porción de diferentes tipos de alimentos . Tesis de maestría en ciencia en ingeniería bioquímica. Instituto Tecnológico de Veracruz . Mexico . 99-114.
- Ho** YS. y McKay G. (2000). The kinetic of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss peat. *Water Research*. 34(3): 735-742.
- Jongaroontaprangsee**, S., Tritrong, W., Chokanaporn, W. 2007. Effects of drying temperature and particle size on hydration properties of dietary fiber powder from lime and cabbage by-products. *International Journal of Food Properties*, 10 (4): 887-897.
- Kraemer** E. O. *Treatise on Physical Chemistry*, Taylor H. S. Ed. New York (1931).
- Labuza**, T. P.; Kaanane, A y J, Chen (1985). Effect of temperatura on the moisture sorption isotherms and wáter activity on two dehydrated foods. *J. Food Sci.* 50 (2): 385-391.
- Landaeta**, J (2005) Características de sorción de humedad de la harina precocida de batata (*Ipomoea batata* spp. Trabajo de grado de maestría. UNELLEZ. Venezuela.
- López** G, Ros, Rincón F, Periago MJ, Martínez C, Ortuño J. (1997). Propiedades Funcionales de la fibra dietética. Mecanismos de acción en el tracto Gastrointestinal. *Archivos Lationoamericanos de Nutrición*, 47 (3): 2003-2007.
- Marín** VM. (2011). Biosorción de Arsénico (V) En Biomasa de *Trichoderma atroviride* cultivada sobre residuos de limón criollo (*Citrus aurantifolia* Swingle). Tesis de Maestría. Facultad de Químico Farmacología. U.M.S.N.H. Morelia, Mich., México.
- Martínez- Flores**, H.E., y Figueroa, J.D.C. (2008). La fibra dietética y su importancia en la salud. *Temas selectos en alimentos, nutrición y salud*.
-

- 
- Facultad de Químico Farmacobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. p.8-9 y 18.
- Martínez, N.** (1998). Termodinámica y cinética de sistemas de alimento, entorno. España. Universidad politécnica de Valencia. p. 46.
- Maya DC.** (2009). Estudios nutricionales y de absorción de calcio a partir de tortillas integrales de maíz elaboradas por un método ecológico de nixtamalización. Facultad de Químico Farmacobiología UMSNH. Morelia, Michoacán, México.
- Mazza, G.** Thermodynamic considerations of water vapour sorption by horseradish roots, *Lebenm, Wiss, technol.*, 13, 13-17. 1980
- Mc Minn, W.A.M., Magee, T.R.A** (2003). Thermodynamic properties of moisture sorption of potato. *Journal of food Engineering* 33, 227-237.
- McBain, J W.** (1909). *Phys Chem.* p. 38, 471.
- Méndez R.** (1995). Aprovechamiento de subproductos agropecuarios. Unisur, Santafé de Bogotá. 336 p
- Millán CE., Balderas HP, Roa MG, Barrera DC. y Colín CA.** (2008). Sorción de Cd(II) y Pb(II) usando un biosorbente de bajo costo. Memorias del VII Congreso internacional y XIII congreso nacional de ciencias ambientales. Ciudad Obregón, Sonora. México.
- Mohamed, LA., KOUHILA, M., JAMALI, A., LAHSASNI, S. and MAHROUZZ, M.** Moisture sorption isotherms and heat of sorption of bitter orange leaves (*Citrus aurantium*). *J Food eng.*, 67, 491-498.200
- Moldes, AB.,Cruz, JM., Dominguez,JM., Parajó, JC.**(2002). Production of a cellulosic substrate susceptible to enzymatic hydrolysis from prehidrolized barley husks. *Agr. Food Sci. Filand II* (1): 51-58
- Orozco M.** (2006). Cenicilla (*Oidium sp.*) del tamarindo (*Tamarindus Indica L.*): Un problema recurrente y su manejo integrado en el trópico seco de México. *Revista Mexicana de Fitopatología.* 24(202):152-155.

- 
- Parrotta** JA. (1990). *Tamarindus indica* L. Tamarind. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. p. 519- 523.
- Priego** M N, (2007). Obtención de fibra dietética a partir de sáculos de naranja aplicando un tratamiento con vapor. Tesis de Licenciatura. Universidad Tecnológica de la Mixteca. Huajapan de León, Oaxaca. 64pp.
- Prosky** L, Asp NG, Schweizer TF, DeVries, J.W., Furda, I. (1988). Determination of insoluble, soluble, and total dietary fiber in foods and food products: interlaboratory study. *J Assoc Off Anal Chem*, 71 (5): 1017-1023.
- Qiu** H, Lv L, Pan B-C.Zhang, Q-J Zhang, W-M Zhang, Q-X. (2009). Critical review in adsorption kinetic models. *Journal of Zhejiang University Science A*, 10(5): 716-724.
- Raghavendra** S, Ramachandra S, Rastogi N, Raghavarao K, Kumar S, Tharanathan. (2006). Grinding characteristics and hydration properties of coconut residue: A source of dietary fiber. *J. Food Eng.* 72: 281-286.
- Rascón** DC. Geometría y nanotécnica Adsorción de líquidos en sustratos no planos. Depto. de Matemáticas, Universidad Carlos III de Madrid y Dpto. de Física y Astronomía de la Universidad de Edimburgo.
- Rivas** B, Moldes AB, Domínguez JM, Parajó J C. (2004). Lactic acid production from corn cobs by simultaneous saccharification and fermentation: a mathematical interpretation. *Enzyme Microbial.*
- Rosell** CM, Santos E, Collar C. (2009). Physico chemical properties of commercial fibres from different sources: A comparative approach. *Food Res. Int.* 42: 176-184
- Ross** O, J.P. (1964): On physical adsorption. Edit. Inter science Publishers. New York. pdg 78.).
- Sanni** Lo, Atere C and KUYE, A. (1997). Moisture sorption isotherms of fufu and tapioca at different temperatures, *J Food Eng.*, 34, 203-212.
-



- 
- Saravacos** , G.D., Tsiogras, D.A y Tsami, E. (1986) Effect of temperatura on the water adsorptions isotherms of Sultna Raisins. *Journal of food Science* 51, 381, 383, 387.
- Sing** K. S. W., Everett D. H., Haul R. A.W., Moscou L., Pierotti R. A., Rouquerol J. and Tronc E, Hernández ECA, Ibarra GR, Estrada M A, Navarrete BJ. and Zaragoza CEA. (2007). Blue agave fiber esterification for the reinforcement of thermoplastic composites. *Carbohydrate Polymers*. 67: 245-255.
- Tronc** E, Hernandez ECA, Ibarra GR, Estrada MA, Navarrete BJ. And Zaragoza CEA. (2007). Blue agave fiber esterification for the reinforcement of thermoplastic composites. *Carbohydrate Polymers*. 67:245-255
- Wong** K, Cheung P. (2005). Dietary fibers from mushroom sclerotia: 1. Preparation and physicochemical and functional properties. *J. Agri. Food Chem*. 53: 9395-9400