

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA QUÍMICA**



**“MODELAMIENTO DE LA LIBERACIÓN CONTROLADA DE  
NUTRIENTES ENCAPSULADOS POR NANOPARTÍCULAS EN  
HIDROGELES DE USO AGRÍCOLA”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN  
INGENIERÍA QUÍMICA**

**Daril Giovanni Martinez Hilario**

**Callao, 2021**

**PERÚ**

Handwritten signature of Daril Giovanni Martinez Hilario in blue ink.

Handwritten signature of Daril Giovanni Martinez Hilario in blue ink.

Handwritten signature of Daril Giovanni Martinez Hilario in blue ink.



## **PRÓLOGO DEL JURADO**

La presente tesis fue sustentada por el señor bachiller MARTINEZ HILARIO DARIL GIOVANNI ante el JURADO DE SUSTENTACION DE TESIS conformado por los siguientes profesores ordinarios:

- Mg. DIAZ BRAVO PABLO BELIZARIO PRESIDENTE
- Mg. ANGELES QUEIROLO CARLOS ERNESTO SECRETARIO
- Dra. AVELINO CARHUARICRA CARMEN GILDA VOCAL
- Mg. GUTIERREZ CUBA CESAR VOCAL
- Dr. CARRASCO VENEGAS LUIS AMÉRICO ASESOR
- Dra. CARRANZA OROPEZA MARIA VERONICA CO-ASESORA

Tal como está asentado en el libro N°01 – Acta N°010 de fecha 22 de diciembre del año 2021 para obtener el grado académico de maestro en ingeniería química, de conformidad con lo establecido por el reglamento de grados y títulos aprobado con resolución de consejo universitario N° 099-2021-CU de fecha 30 de junio de 2021.

## **DEDICATORIA**

A mi padre, que desde el cielo me cuida y que me recuerda que siempre podemos ser mejores personas.

A mi profesor Luis Carrasco, por la confianza depositada en mí, y por la paciencia infinita.

A mi familia que siempre está conmigo y las demás personas que me apoyaron y esperan siempre lo mejor de mí.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco al Concytec-Perú y al Banco Mundial por el financiamiento de esta investigación a través de la convocatoria “Mejoramiento y Ampliación de los Servicios del Sistema Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación Tecnológica” 8682-PE, mediante la subvención de PROCENCIA 017-2019 FONDECYT BM INC.INV.

# ÍNDICE

	Página
TABLAS DE CONTENIDO .....	3
RESUMEN .....	6
ABSTRATO.....	7
INTRODUCCIÓN .....	8
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
1.1. Descripción de la realidad problemática .....	9
1.2. Formulación del problema.....	9
1.2.1. Problema general.....	9
1.2.2. Problemas específicos.....	10
1.3. Objetivos .....	10
1.3.1. Objetivo general .....	10
1.3.2. Objetivos específicos .....	10
1.4. Limitantes de la investigación. ....	10
II. MARCO TEÓRICO .....	11
2.1. Antecedentes: Internacional y nacional.....	11
2.2. Bases teóricas .....	15
2.3. Conceptual.....	31
2.4. Definición de términos básicos .....	39
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	41
3.1. Hipótesis .....	41
3.2. Definición conceptual de variables.....	41
3.2.1. Operacionalización de variables .....	42
IV. DISEÑO METODOLÓGICO .....	44

4.1. Tipo y diseño de investigación .....	44
4.2. Método de investigación .....	46
4.3. Población y muestra.....	46
4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado .....	46
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información .....	47
4.6. Análisis y procesamiento de datos.....	47
V. RESULTADOS .....	48
5.1. Resultados descriptivos .....	48
5.2. Resultados inferenciales .....	64
5.3. Otro tipo de resultados estadísticos .....	70
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	72
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados .....	72
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares .....	74
6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes.....	75
CONCLUSIONES .....	76
RECOMENDACIONES .....	77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
ANEXOS .....	82

## TABLAS DE CONTENIDO

### INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Compuestos formadores de hidrogel.....	20
<b>Tabla 2</b> Operacionalización de variables.....	43
<b>Tabla 3</b> Parámetros de simulación para potasio.....	52
<b>Tabla 4</b> Parámetros de simulación para nitrógeno-nitrato.....	57
<b>Tabla 5</b> Parámetros de simulación para fósforo-fosfato.....	61
<b>Tabla 6</b> Coeficientes de difusión efectiva para potasio.....	64
<b>Tabla 7</b> Coeficientes de difusión efectiva para nitrógeno.....	67
<b>Tabla 8</b> Coeficientes de difusión efectiva para fósforo.....	69
<b>Tabla 9</b> Valores del error cuadrado media para cada simulación.....	70
<b>Tabla 10</b> Datos de simulación nitrógeno, fósforo y potasio.....	73
<b>Tabla 11</b> Coeficientes de difusión efectiva obtenidos por simulación a partir de datos experimentales de los autores indicados.....	75



## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Interacción de nutrientes en el suelo.....	17
<b>Figura 2</b> Formas de ensamblaje de nanopartículas .....	19
<b>Figura 3</b> Aplicación de hidrogeles en los cultivos.....	21
<b>Figura 4</b> Efecto del pH en hidrogeles .....	22
<b>Figura 5</b> Formas de estudiar un sistema mediante el modelado .....	25
<b>Figura 6</b> Relación de modelado y simulación.....	24
<b>Figura 7</b> Esquema de modelado de nutrientes encapsulados.....	26
<b>Figura 8</b> Esquema de modelado de una partícula recubierta.....	27
<b>Figura 9</b> Esquema de modelado para D-fructosa a través del hidrogel.....	28
<b>Figura 10</b> Esquema de modelado para la difusión de A.....	29
<b>Figura 11</b> Esquema de modelado para la difusión de urea .....	30
<b>Figura 12</b> Liberación de nutrientes encapsulados.....	32
<b>Figura 13</b> Distribución de compuestos activos en nanopartículas.....	33
<b>Figura 14</b> Diseño de la investigación.....	45
<b>Figura 15</b> Liberación de nutrientes en el sistema nanopartícula/hidrogel.....	48
<b>Figura 16</b> Perfil de concentración de potasio de la tableta 6 x2 mm .....	53
<b>Figura 17</b> Perfil de concentración de potasio de la tableta 9 x3 mm .....	53
<b>Figura 18</b> Perfil de concentración de potasio de la tableta 12 x4 mm .....	54
<b>Figura 19</b> Perfil de concentración de potasio de la tableta 15 x5 mm .....	54
<b>Figura 20</b> Perfil de liberación de potasio de la tableta 6 x2 mm .....	55
<b>Figura 21</b> Perfil de liberación de potasio de la tableta 9 x3 mm .....	55
<b>Figura 22</b> Perfil de liberación de potasio de la tableta 12 x4 mm .....	56
<b>Figura 23</b> Perfil de liberación de potasio de la tableta 15 x5 mm .....	56

<b>Figura 24</b> Perfil de concentración de nitrógeno-urea.....	58
<b>Figura 25</b> <i>Perfil de concentración de nitrógeno-nitrato de liberación parabólica</i> .....	58
<b>Figura 26</b> Perfil de concentración de nitrógeno-nitrato de liberación sigmoideal59	
<b>Figura 27</b> Perfil de liberación de nitrógeno-urea.....	59
<b>Figura 28</b> Perfil de liberación de nitrógeno-nitrato parabólica .....	60
<b>Figura 29</b> Perfil de liberación de nitrógeno-nitrato sigmoideal.....	60
<b>Figura 30</b> Perfil de concentración de fósforo-fosfato monoamónico.....	62
<b>Figura 31</b> Perfil de concentración de fósforo-fosfato diamónico tetrahidratado62	
<b>Figura 32</b> Perfil de liberación de fósforo-fosfato monoamónico .....	63
<b>Figura 33</b> Perfil de liberación de fósforo-fosfato diamónico tetrahidratado.....	63
<b>Figura 34</b> Perfil de liberación de potasio en tableta 6 x 2 mm.....	65
<b>Figura 35</b> Perfil de liberación de potasio en tableta 9 x 3 mm.....	65
<b>Figura 36</b> Perfil de liberación de potasio en tableta 12 x 4 mm.....	66
<b>Figura 37</b> Perfil de liberación de potasio en tableta 15 x 5 mm.....	66
<b>Figura 38</b> Perfil de liberación de nitrógeno urea.....	67
<b>Figura 39</b> Perfil de liberación de nitrógeno-nitrato parabólico .....	68
<b>Figura 40</b> Perfil de liberación de nitrógeno-nitrato sigmoideal.....	68
<b>Figura 41</b> Perfil de liberación de fósforo monoamónico .....	69
<b>Figura 42</b> Perfil de liberación de fósforo diamónico tetrahidratado.....	70
<b>Figura 43</b> Gráfica de cajas de los residuos de la simulación.....	71

## RESUMEN

Esta investigación desarrolló el modelado matemático de la liberación controlada de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola, mediante el cual se obtuvieron perfiles de concentración y liberación de nutrientes en función del tiempo.

El modelado se basó en la ecuación de conservación de materia para una geometría esférica con dispersión radial, considerando que la partícula en su interior contiene a los nutrientes de tamaños nanométricos, la liberación de nutrientes inicia desde el seno de la partícula hacia la interfase del hidrogel. Los efectos de los factores que influyen en la liberación tales como pH, conductividad iónica, entre otros, fueron englobados en un único coeficiente de difusión efectiva  $D_{eff}$ , el cual fue calculado mediante ensayo y error aplicando el método de diferencias finitas haciendo uso de la programación en Matlab.

Los resultados obtenidos permitieron contrastar el modelo matemático con datos experimentales de liberación controlada de autores referentes, encontrando una adecuada correlación con un error cuadrado medio  $MSE = 0.0125 - 0.3383$ , que permite estimar el coeficiente de difusión efectiva en el rango  $D_{eff} = [5.9 \times 10^{-12} - 1.4 \times 10^{-9}] \text{ m}^2/\text{s}$ .

**Palabras clave:** *modelado, liberación, nutriente, nanopartícula, hidrogel.*

## ABSTRATO

Esta pesquisa desenvolveu a modelagem matemática da liberação controlada de nutrientes encapsulados no sistema nanopartícula/hidrogel para uso agrícola, através da qual foram obtidos perfis de concentração e liberação de nutrientes em função do tempo.

A modelagem foi baseada na equação de conservação da matéria para uma geometria esférica com dispersão radial, considerando que a partícula em seu interior contém os nutrientes de tamanhos nanométricos, a liberação dos nutrientes começa do seio da partícula em direção à interface do hidrogel. Os efeitos dos fatores que influenciam a liberação como pH, condutividade iônica, entre outros, foram englobados em um único coeficiente de difusão efetivo  $D_{eff}$ , que foi calculado por tentativa e erro aplicando o método das diferenças finitas utilizando a programação em Matlab.

Os resultados obtidos permitiram contrastar o modelo matemático com dados experimentais de liberação controlada dos principais autores, encontrando uma correlação adequada com um erro quadrático médio  $MSE = 0.0125 - 0.3383$ , o que permite estimar o coeficiente de difusão efetivo na faixa  $D_{eff} = [5.9 \times 10^{-12} - 1.4 \times 10^{-9}] \text{ m}^2/\text{s}$ .

**Palavras-chave:** *modelagem, liberação, nutriente, nanopartícula, hidrogel.*

## INTRODUCCIÓN

La actual creciente demanda de productos agrícolas debido al incremento de la población humana es un tema de gran interés que conlleva a la búsqueda de la mejora de los procesos agrícolas, pues se sabe que cada vez los recursos naturales tienden a la escasez, principalmente el agua que se utiliza para los cultivos. En este sentido, los fertilizantes de liberación controlada presentan un gran potencial para aumentar la competitividad de las plantas forestales para una variedad de sitios de reforestación. Sin embargo, existe un pobre conocimiento sobre ellos. Con el fin de usar esta clase de fertilizantes en forma exitosa se debe considerar su formulación, el patrón de entrega y sus interacciones ambientales

La llamada tecnología de liberación lenta y controlada ha adquirido gran importancia tanto en el campo de la agricultura como en el de la medicina, siendo su principal objetivo la liberación lenta o gradual de un material activo desde una matriz orgánica al otro medio con el fin de conseguir sobre el mismo una acción determinada. Con la aplicación de esta tecnología se busca aumentar la eficiencia de la sustancia aplicada alargando su acción en el tiempo, evitando pérdidas de todo tipo tales como lixiviación, volatilización, contribuyendo así a la disminución de la contaminación ambiental. En esta investigación se presenta el modelado matemático como una herramienta poderosa para el análisis de la liberación controlada de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola, lo cual permitirá el estudio y posterior desarrollo de nuevas formulaciones de sistemas que favorezcan a la liberación de nutrientes en la agricultura.

# I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1. Descripción de la realidad problemática

El limitado acceso al agua en zonas desérticas que por su condición geográfica mantienen climas secos, ya sea por la ausencia de lluvias, el agotamiento de los acuíferos subterráneos o por su lejanía a la red pública de agua, se convierte en factor clave a resolver si se quiere aprovechar el potencial de estas zonas para la agricultura.

El uso de hidrogeles en los cultivos permite retener agua en su interior evitando la lixiviación y la pérdida de nutrientes, puesto que se mantienen encerrados dentro de sus redes poliméricas y van siendo liberados conforme la planta lo necesite. Los fertilizantes encapsulados por nanopartículas protegen el contenido de macronutrientes tales como nitrógeno, fósforo y potasio (N-P-K), fundamentales para la adecuada nutrición de los cultivos. La comprensión de la liberación de fertilizantes nos permitirá controlar adecuadamente los requerimientos nutritivos que los cultivos necesitan, por ello, los estudios de liberación controlada se convierten en una herramienta importante si se quiere mejorar la nutrición de los cultivos; sin embargo, tienden a ser muy costosos por el tiempo que se necesita para su evaluación y por los ensayos analíticos que se requieren para generar los perfiles de liberación.

Por tales razones la presente investigación plantea el modelado de la liberación controlada de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula /hidrogel de uso agrícola, para dar solución a los requerimientos de información en cuanto a tiempo y costo, el cual será validado para garantizar su confiabilidad.

## 1.2. Formulación del problema

### 1.2.1. Problema general

¿Cómo se debe realizar el modelado matemático de la liberación controlada de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola?

### 1.2.2. Problemas específicos

- a. ¿Cuál es el mecanismo de liberación controlada de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola?
- b. ¿Cuáles son los factores influyentes en la liberación controlada de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola?
- c. ¿Cómo debe validarse el modelo matemático propuesto?

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

Obtener el modelo matemático que describa la liberación controlada de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola a partir de las ecuaciones de conservación de masa, difusividad y las dimensiones de la partícula.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- a. Describir el mecanismo de liberación controlada de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola utilizando las ecuaciones básicas de conservación de materia y difusividad.
- b. Identificar los factores fisicoquímicos influyentes en la liberación controlada de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola.
- c. Validar el modelo matemático propuesto con datos obtenidos de la literatura mediante el cálculo estadístico del error y varianza.

## 1.4. Limitantes de la investigación

Teóricas: Existe información sobre la liberación controlada de fármacos que utilizan ecuaciones empíricas para predecir su comportamiento; sin embargo, respecto a la liberación controlada de nutrientes encapsulados en hidrogel y su modelado matemático, existe limitada información.

Temporal: Ninguna.

Espacial: Ninguna.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes: Internacional y nacional

#### 2.1.1. Antecedentes internacionales

Huang et al. (2019) enfocaron su estudio en la liberación controlada de nitrógeno para mejorar el rendimiento de cultivo de arroz en China en las estaciones temprana y tardía. Se presentan los perfiles de liberación de nitrógeno dependientes del tiempo para una liberación controlada de nitrógeno proveniente de conformados de urea, estos perfiles que se presentan son del tipo sigmoideal y parabólico. La tasa de liberación parabólica fue más rápida y más sensible a los cambios de temperatura que la sigmoideal. El análisis de regresión muestra que los patrones de liberación de nitrógeno (N) del perfil sigmoideal en los campos de arroz obtuvieron mayor absorción de nitrógeno. El rendimiento de grano de arroz de acuerdo al perfil sigmoideal fue ligeramente más alto que el perfil parabólico durante ambas temporadas de cosecha de arroz. Estos resultados demostraron que para el cultivo de arroz en el sur de China el tratamiento con fertilizante de perfil sigmoideal es mejor para el requerimiento de nitrógeno del arroz durante ambas estaciones.

Irfan et al. (2018) describen y analizan modelos matemáticos enfocados en las características y mecanismos de liberación para los fertilizantes de liberación controlada (CRF). Los fertilizantes aplicados directamente en el suelo no se aprovechan en su totalidad debido a la volatilización, desnitrificación, lixiviación. Esto ha generado pérdidas económicas, baja absorción de nutrientes y contaminación del agua por eutrofización. Los fertilizantes de liberación controlada pueden mejorar la cinética de liberación de nutrientes, en tal sentido tienen la capacidad de suministrar alimento de manera sincronizada con las necesidades de la planta. El conocimiento de los parámetros característicos de la liberación es importante para la formulación de los CFR. La experimentación resulta ser muy costosa en tiempo y en métodos. Las técnicas de modelado matemático se han convertido en herramientas para la predicción del



comportamiento de la liberación de nutrientes en CFR con la finalidad de mejorar el diseño de nuevos CFR en un tiempo reducido y con bajo costo.

Aguiar et al. (2018) produjeron hidrogeles de ácido acrílico mediante polimerización por radicales libres en solución a 70 ° C. Los materiales obtenidos se pusieron en contacto con solución de D-fructosa y se evaluó el comportamiento de la hinchazón. Los hidrogeles hinchados se sumergieron en agua destilada y se liberó la D-fructosa cuantificándola en tiempo mediante un sistema de detección optoelectrónico de luz polarizada de bajo costo. Se desarrolló un modelo matemático simplificado para representar el sistema en estudio. Este modelo fue probado contra datos experimentales, mostrando buen grado de correlación y se evaluaron los parámetros de los perfiles de predicción.

Guaya et al. (2018) estudiaron la recuperación de nutrientes nitrógeno-fosforo-potasio (N-P-K) de aguas residuales utilizando zeolita natural y presentaron ecuaciones de la liberación de los macronutrientes en las zeolitas. La liberación de nutrientes es necesaria para el crecimiento de las plantas y se controla mediante la fijación de la composición de la solución acuosa del suelo (pH y carga iónica); en particular, la presencia de calcita, la cual es determinante para la liberación de nutrientes en suelos alcalinos, la liberación de potasio ( $K^+$ ) y amonio ( $NH_4^+$ ) se favorece por el intercambio del ion calcio ( $Ca^{2+}$ ) y en consecuencia disminuye la composición de fosfato ( $PO_4^{3-}$ ).

Raymundi et al. (2016) realizaron experimentos de liberación controlada de insulina a través de los hidrogeles en medios ácidos y básicos para evaluar las tasas de liberación de esta proteína proporcionada por el copolímero referido. Así mismo, se formuló un modelo matemático del sistema basado en el balance de masa diferencial que fue simulado en MATLAB. Los valores del índice de hinchazón en el equilibrio y las tasas de liberación de insulina fueron inversamente proporcionales al grado de reticulación. El modelo proporcionó predicciones confiables de los perfiles de liberación con valores ajustados de difusividad de insulina a través de los hidrogeles en el rango de  $[6.0 \times 10^{-7} - 1.3 \times 10^{-6}] \text{ cm}^2/\text{s}$ . Valores experimentales de coeficientes de reparto de insulina entre el hidrogel y el medio fueron inferiores en medio básico, señalando buena

afinidad de insulina para estos medios en comparación con las soluciones ácidas.

Zhang et al. (2018) realizaron el estudio experimental y el modelado matemático de la liberación controlada de potasio ( $K^+$ ) a partir de la ceniza de biomasa, para lo cual formularon cuatro tipos de tabletas de configuraciones diferentes para evaluar la liberación de potasio. Para el estudio utilizaron una celda experimental que se asemejaba a las condiciones del suelo, utilizando una solución saturada de potasio embebiendo las partículas de biomasa. Realizaron mediciones de la conductividad para hacerle seguimiento a la liberación a cada hora y los resultados que obtuvieron fueron tratados con un algoritmo matemático para el ajuste de los datos y la obtención del coeficiente de difusión efectiva que le correspondía a cada configuración de tableta. La investigación logro establecer satisfactoriamente el mecanismo para la obtención de dichos coeficientes de difusión efectiva.

Alharbi et al. (2018) realizaron el estudio de un sistema de liberación controlada de fosforo a partir de poliacrilamida de injerto de carboximetil almidón unido a fosfato (P-CMS-g-PAM), el cual tuvo como objetivo aumentar la eficiencia del uso de fosforo y mantener hidratados los cultivos. En la elaboración del fertilizante utilizaron dos tipos de monoésteres de fosfato de almidón, el monoamonio (MAP) y diamónico (DAP), que fueron caracterizados utilizando espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier, análisis gravimétrico, microscopia electrónica de barrido y análisis de fósforo. El comportamiento de la liberación de fosforo fue estudiado a pH 7 y 25°C donde se encontró que los fertilizantes a base de monoamonio (MAP) presentan una liberación de hasta un 90% del fosforo en un intervalo de 30 días frente al diamónico (DAP) que alcanza el 80% en el mismo tiempo y se utilizó el modelo de Korsmeyer-Peppas para examinar el mecanismo de la liberación.

### 2.1.2. Antecedentes nacionales

Santillán Espinoza (2019) estudió la síntesis y caracterización de hidrogeles sensibles a la temperatura y al grado de acidez (pH) a partir de la polimerización radicalaria, iniciada por el persulfato de potasio ( $K_2S_2O_8$ ), N,N-dimetilacrilamida (DMAA), N-isopropilacrilamida (NIPAAm) y un macromonómero de 2-oxazolina (MK-17). La sensibilidad a estos parámetros fue expresada macroscópicamente como una contracción o expansión del volumen del hidrogel por cambios de temperatura y de pH. A mayor contenido de NIPAAm el hidrogel presentó mayor sensibilidad a la temperatura y a mayor contenido de macromonómero se incrementó también la sensibilidad al pH. Los hidrogeles del tipo DMAA y MK-17 fueron utilizados como material adsorbente del azul de metileno en un medio acuoso. Se evaluó la influencia de factores, tales como, la concentración inicial de azul de metileno, la masa del hidrogel, el pH y el tiempo de contacto entre el hidrogel y el pigmento. Se obtuvo como resultado que la adsorción se regía bajo el modelo de Freundlich y con una cinética de pseudo-segundo orden.

Díaz Laupa (2018) empleó el diseño de bloques completamente al azar (DCA), con arreglo factorial combinatorio donde se evaluó 3 factores: factor A (tipos de suelo: Franco arenoso y arenoso franco), factor B (dosis de hidrogel: 14.00, 20.00, 26.00 y 0.00 g/tratamiento) y factor C (interacción de tipo de suelo x dosis de hidrogel). El mejor rendimiento de peso de tubérculo en kilogramo de la papa de variedad "Única" fue en el tipo de suelo arenoso franco por dosis media de hidrogel (20 g/ tratamiento), se obtuvo un peso de tubérculo total de 30.60 kg/tratamiento, equivalente a 70 t/ha y el mejor rendimiento de número de tubérculos se presentó en el suelo arenoso franco x dosis alta de hidrogel (26 g/tratamiento), con un promedio de 99 unidades que equivale a 11 unidades por planta, mostrando una mejora significativa en la implementación de hidrogeles a cultivos de papa variedad Única.

Cabrel Rengifo (2018) diseñó un hidrogel que tiene como matriz al  $\beta$ -quitosano, que retarda la liberación del factor de crecimiento derivado de plaquetas-BB (PDGF-BB). El  $\beta$ -quitosano fue caracterizado en porcentaje de

humedad, grado de desacetilación y peso molecular promedio, usando gravimetría, titulación potenciométrica y medición de viscosidad con el viscosímetro de Ostwald, respectivamente. La liberación del PDGF-BB del hidrogel de  $\beta$ - quitosano con 6% de lisado plaquetario fue influenciada por el pH ( $p < 0.05$ ); mientras que en el hidrogel de  $\beta$ -quitosano con 12% de lisado plaquetario no fue influenciada por el pH ( $p > 0.05$ ). Este hidrogel, de  $\beta$ -quitosano con 12% de lisado plaquetario, cumplió el objetivo al conseguir retardar la liberación del PDGF-BB en veintiséis horas.

Bautista Inga (2018) estudió la aplicación de hidrogel en el crecimiento y desarrollo del *Eucalyptus urograndis* en campo. Realizó la producción de 72 plantas (36 en tubetes y 36 en bolsas), en los tubetes a 18 plantas se aplicó hidrogel al momento de instalar en campo y a 18 plantas no se aplicó, lo mismo se realizó con las plantas en bolsas. Los resultados obtenidos muestran diferencia significativa en cuanto al diámetro y la altura de los árboles de bolsas y tubetes ( $p < 0.05$ ), así mismo no observaron diferencia significativa entre la altura y diámetro de los árboles producidos en bolsas con o sin el uso del hidrogel ( $p > 0.05$ ).

Cuando se comparó los árboles producidos en tubetes aplicando y sin aplicar hidrogel no se observó diferencia significativa ( $p > 0.05$ ). Los árboles producidos con la aplicación de hidrogel en tubetes difieren significativamente de los árboles producidos en bolsas aplicando hidrogel ( $p < 0.05$ ), esto muestra que las condiciones de aplicación del hidrogel influyen en el desempeño de los cultivos.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Nutrientes:**

Gran parte de la masa de sólidos en el suelo lo conforman los minerales que son denominados los nutrientes del suelo. Dichos nutrientes se clasifican en macronutrientes y micronutrientes, los primeros están disponibles en mayor cantidad necesarios para la alimentación de los cultivos y los segundos están presentes en menor cantidad, pero necesarios para el crecimiento adecuado de los cultivos.

#### a. Macronutrientes

Son sustancias que los cultivos necesitan en grandes cantidades, que deben ser suministradas al suelo si es que existe deficiencia de éstos. Los cultivos extraen naturalmente dichos nutrientes a lo largo de los años y dejan un suelo pobre, el cual deberá ser suplementado a medida del crecimiento de las plantas, de acuerdo a la variedad y cantidad de cultivos (FAO, 2016).

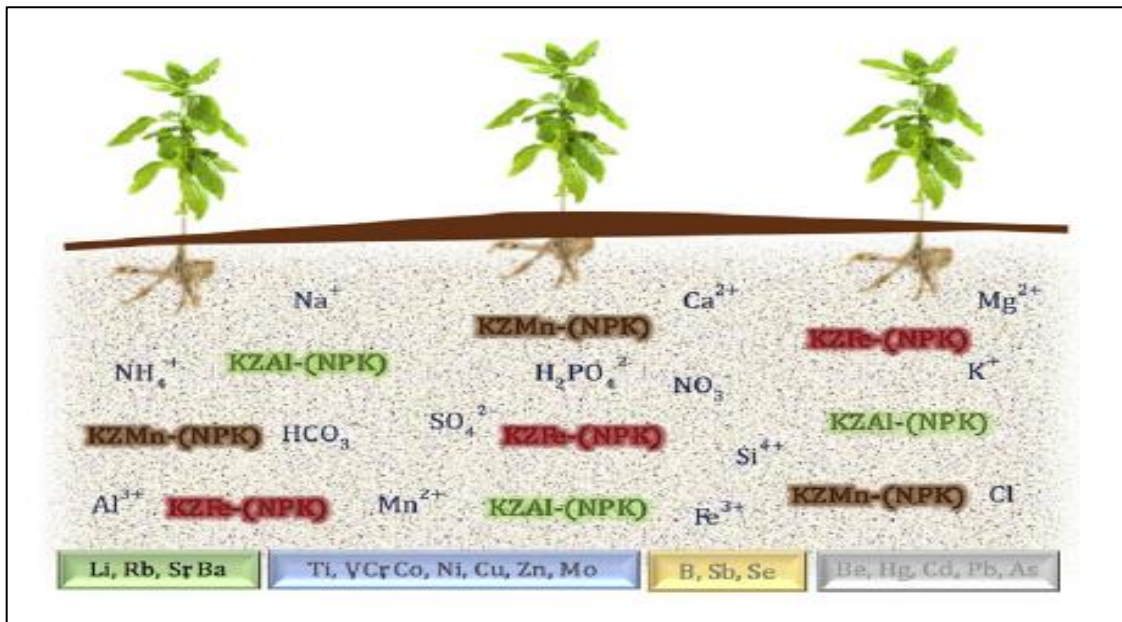
Dentro del grupo de los macronutrientes se encuentra: nitrógeno, fósforo y potasio.

- El nitrógeno (N) es indispensable para el crecimiento de la planta. Este nutriente es absorbido bajo la forma de ion nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) o ion amonio ( $\text{NH}_4^+$ ). La planta lo utiliza para la fabricación de aminoácidos y proteínas. Debido a que el nitrógeno está presente en la estructura molecular de las proteínas, este macronutriente se convierte en uno de los principales para el desarrollo y el óptimo rendimiento de los cultivos. Así mismo, una buena alimentación de nitrógeno para la planta acarrea la absorción de otros nutrientes esenciales.
- El fósforo (P) adquiere importancia en la transferencia de energía. Por tal razón, es indispensable para la fotosíntesis y otros procesos fisiológicos. Mas allá de su papel energético, su desempeño dentro de la planta radica en el desarrollo de los tejidos y la diferenciación de las células para el crecimiento de la planta. La deficiencia de fosforo en el suelo muchas veces es debido a la fijación, pues tiende a lixiviarse o ser consumido por otros organismos, dejando limitada disponibilidad para los cultivos.
- El potasio (K) posee muchas funciones. Ayuda a la regulación electrolítica dentro de las plantas y activa más de 60 enzimas en el metabolismo de los cultivos. Además , su importancia radica en la síntesis de proteínas y carbohidratos, mejora la distribución de agua dentro de la planta y aumenta su eficacia frente a las sequías o climas helados. Los cultivos alimentados con potasio tienden a sufrir menos las enfermedades.

En la Figura 1 se observa la distribución de los nutrientes en el suelo y su interacción con los cultivos.

**Figura 1**

*Interacción de nutrientes en el suelo*



Fuente: Guaya et al., (2018)

b. Micronutrientes

Los micronutrientes o microelementos son compuestos químicos requeridos en ínfimas cantidades por las plantas, debiendo ser agregados en cantidades relativamente muy pequeñas cuando el suelo no dispone de éstos, lo conforman principalmente el magnesio (Mg), azufre (S) y calcio (Ca) (FAO, 2016).

El magnesio es el actor principal de la clorofila, la coloración verde de las hojas es debido a la presencia de magnesio, las cuales funcionan como un receptor de la energía solar. El magnesio también está presente en las reacciones enzimáticas que involucran transferencia de energía dentro de la planta.

El azufre es un componente esencial de las proteínas y está ligado a la formación de la clorofila. El contenido de azufre es del 0.05 a 0,5 por ciento del extracto seco de una planta. Por tal razón, es muy importante para el crecimiento de la planta tal como el fósforo y el magnesio; sin embargo, su función es muchas veces subestimada.

El calcio, primordial para el crecimiento de la raíz de la planta, así como para la formación del tejido celular de las membranas. La función del calcio en el suelo

es reducir la acidez del mismo; sin embargo, en suelos tropicales su presencia es usualmente baja , debiendo ser suministrado para un correcto balance del medio de cultivo.

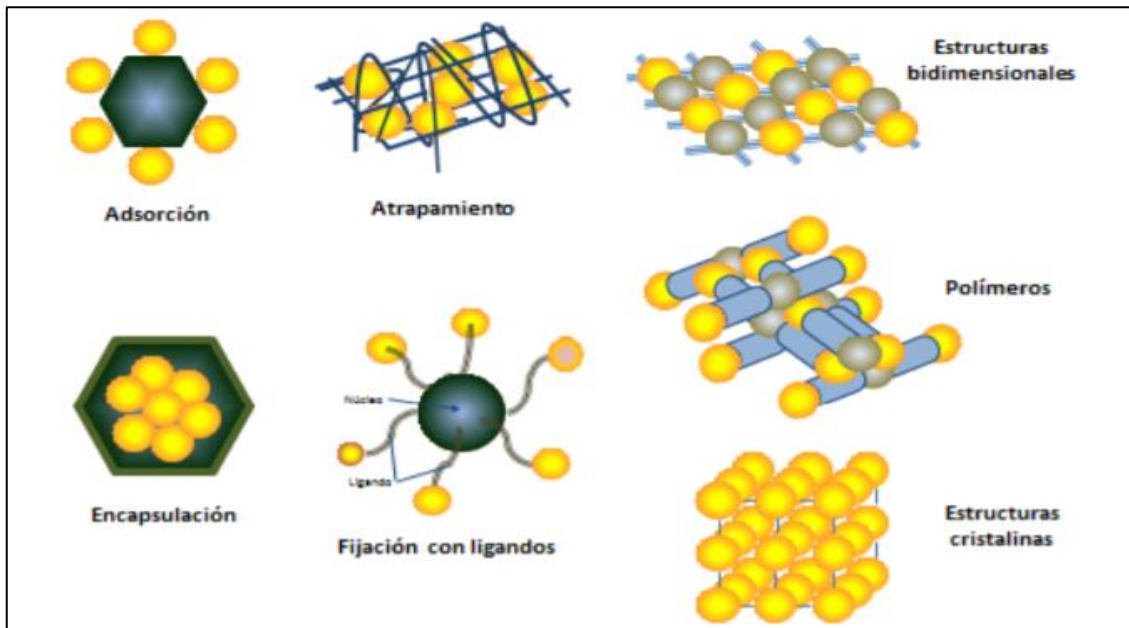
c. Nanonutrientes (Nanopartículas / nutrientes encapsulados)

Las partículas cuyas dimensiones se encuentran dentro del rango desde 1 nm hasta los 100 nm son consideradas nanopartículas. Algunas tienen origen natural como en las erupciones volcánicas y otras son producto de la mano del hombre como las emisiones de un motor de combustión y las manufacturadas por el hombre. La producción de nanopartículas gana interés notable por tres grandes razones: por los beneficios de sus propiedades en múltiples disciplinas, por ser una tecnología emergente en continuo desarrollo y por los riesgos asociados a la salud y el ambiente (Medina M. et al., 2015)

El método de fabricación y la composición química influenciarán la funcionalidad y efectividad de las nanopartículas. Las nanopartículas pueden clasificarse en nanoesferas y nanocápsulas; Las nanoesferas son sistemas matriciales, donde el elemento que nos interesa (bien un fármaco, una vitamina, o un colorante alimentario) está disperso en una matriz polimérica. Las nanocápsulas por su parte son sistemas de tipo reservorio, en donde el constituyente se encuentra en una cavidad central cubierta por una membrana polimérica que controla la cinética de liberación dependiendo de su naturaleza química (Murru, 2017). En la Figura 2 se observa los diferentes tipos de ensamblajes de las nanopartículas.

**Figura 2**

*Formas de ensamblaje de nanopartículas*



Fuente: Rocha (2015)

Existen diversos materiales empleados como componente principal de la matriz que formará las nanopartículas: dentro de éstos se incluyen las grasas (fosfolípidos, ácidos grasos), las proteínas (gelatina, albúmina) y los polímeros, ya sea naturales (dextrano, quitosano), semisintéticos (derivados de celulosa) o sintéticos poly(acrilatos), poly(anhídridos), poly(acrilamidas) y poly(ésteres). (Murru, 2017)

### 2.2.2. Hidrogeles

Los hidrogeles son polímeros hidrofílicos con capacidad de albergar cantidades considerables de agua y otros elementos de menor tamaño en su interior gracias a su poder de hinchamiento. Se clasifican debido a la respuesta rápida a los cambios en las condiciones ambientales tales como temperatura, pH, luz, campo magnético, fuerza iónica, entre otros. Debido a la sensibilidad a los estímulos y los cambios posteriores en su comportamiento físico o químico es adecuado para la liberación controlada de sustancias. La liberación de los compuestos es una función del coeficiente de difusión de las moléculas de soluto a través del polímero. Debido a las propiedades únicas de los hidrogeles, tales como la absorción, comportamiento de hinchamiento, hidrofiliidad y biocompatibilidad,



se ha convertido en un tema de investigación tecnológica (Aguiar et al., 2018). La Tabla 1 muestra los principales compuestos utilizados en la fabricación de hidrogeles.

**Tabla 1**

*Compuestos formadores de hidrogel*

<b><i>Polímero natural</i></b>	<b><i>Monómero sintético</i></b>
Quitosano	Hidroxietil metilacrilato (HEMA)
Alginato	N-(2-hidroxipropil) metilacrilato (HPMA)
Fibrina	N-vinil-2-pyrrolidona (NVP)
Colageno	N-isopropil acrilamida (NIPAAm)
Gelatina	Vinil acetato (VAc)
Ácido hialurónico	Ácido acrílico (AA)
Dextran	Ácido metaacrílico (MAA)
	Polietilen glycol acrilato/metaacrilato (PEGA/PEGMA)
	Polietilen glycol diacrilato/dimetaacrilato (PEGDA/PEGDMA)

Fuente: Adaptado de Lin (2006)

El hidrogel se compone de polímeros biodegradables que duran bajo tierra de siete a 10 años, absorben agua de lluvia o de pozos y canales, y la libera de 30 a 60 días dependiendo de la textura, temperatura ambiental y cantidad de residuo que tenga la tierra, lo que permite que el agua de la última lluvia pueda aprovecharse al máximo (Granados, 2013). En la Figura 3 se observa la aplicación del hidrogel en los cultivos.

### Figura 3

#### *Aplicación de hidrogeles en los cultivos*



Fuente: "Hidrogel: Ahorro de agua", (2020)

La principal característica de los hidrogeles es su hidrofiliidad, la cual se debe a la presencia de grupos solubles en agua tales como oxidrilo (-OH), carboxilo (-COOH), amino (-CONH-), entre otros. La insolubilidad y la estabilidad de la forma del hidrogel se deben a la presencia de la red tridimensional. El alto contenido de agua en el hidrogel puede contribuir con su compatibilidad con los tejidos naturales (Gonzales, 2007).

Se conoce como hidrogeles inteligentes a aquellos que presentan una respuesta frente a estímulos del medio, tales como la temperatura, pH, campo eléctrico, campo magnético, luz, sonido, composición del solvente, fuerza iónica, entre otros. Debido a esta característica, la aplicación de los hidrogeles tiene un amplio horizonte de aplicación: en la liberación controlada de fármacos, de fertilizantes, inmovilización de enzimas, de células, etc. (Santillán, 2019).

#### a. Sensibilidad a la temperatura

La sensibilidad de los hidrogeles a la temperatura se debe a una de sus características llamada temperatura crítica de miscibilidad inferior (LCST) del polímero o copolímero en disolución acuosa. Los hidrogeles que presentan una

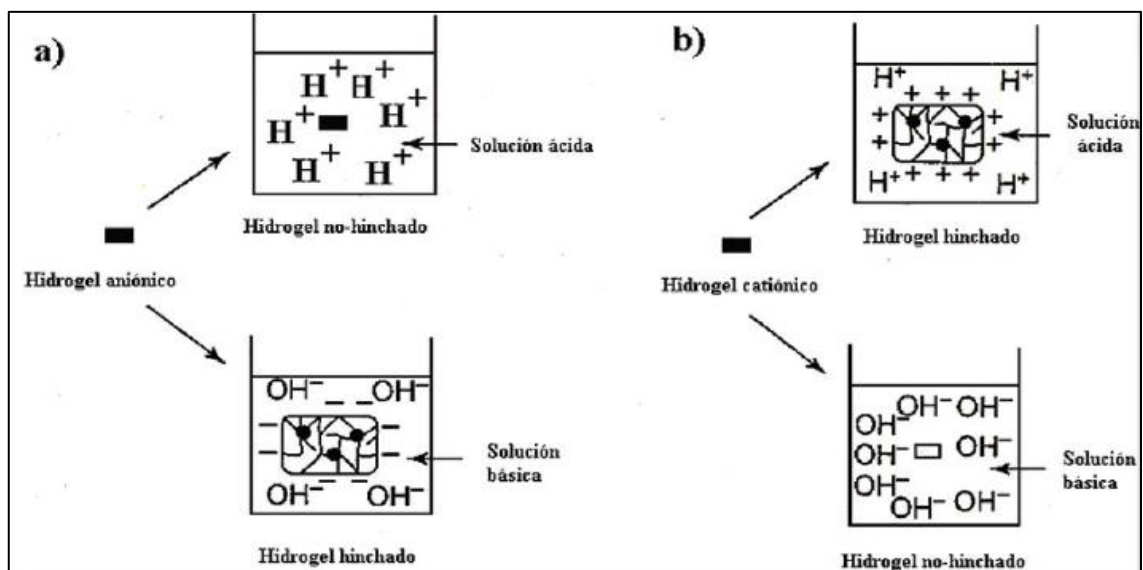
temperatura crítica de miscibilidad superior (UCST) se expanden al aumentar la temperatura, mientras que los que presentan LCST se contraen. La UCST es función de las fuerzas moleculares dentro del polímero, la cual se rige mediante la teoría de Flory-Huggins, relacionado a la entropía de mezclado en soluciones poliméricas. En cambio la LCST se debe al cambio en el balance de diversos tipos de interacciones, principalmente en los enlaces de hidrogeno y las interacciones hidrófobas (Katime et al., 2005).

#### b. Sensibilidad al pH

La sensibilidad al pH en hidrogeles se debe a la presencia de grupos ácidos o básicos, los cuales responden a los cambios de pH ganando o perdiendo protones. Para un hidrogel que posee grupos aniónicos, por ejemplo: grupo carboxílicos, la absorción de agua aumentara cuando el pH sea básico, producto de la repulsión de cargas en este medio, aumentado el volumen de la red polimérica. En el caso de los grupos catiónicos, como los grupos amino, el hinchamiento se beneficiará en medio ácido (Rengifo, 2018). En la Figura 4, en a) se observa el comportamiento de los hidrogeles con grupos aniónicos y en b) el comportamiento de hidrogeles con grupos catiónicos.

**Figura 4**

*Efecto del pH en hidrogeles*



Fuente: Katime et al. (2005)

### c. Contenido de agua en el equilibrio

Los sistemas basados en hidrogeles son muy populares debido a la estructura única que poseen, la cual les permite un gran hinchamiento en presencia de agua, logrando conservar su forma original. El contenido de agua en el equilibrio de un hidrogel depende principalmente de la naturaleza del monómero o monómeros hidrófilos que lo forman, tipo y densidad de entrecruzamiento, entre otros factores tales como, temperatura, fuerza iónica y pH del medio de hidratación.(Gonzales, 2007)

La capacidad de absorción de agua, determinada por el estado de equilibrio hinchado, se debe al balance que ocurre entre las fuerzas osmóticas, debidas al agua que entra en la red, y las fuerzas que ejercen las cadenas poliméricas en oposición a esa expansión. El proceso de obtención del hidrogel determina la capacidad de hinchamiento que este tendrá, dado que los espacios que se establezcan entre las redes poliméricas flexibles que se formen en dicho proceso determinará la cantidad de agua que el hidrogel pueda albergar (Arredondo y Londoño, 2009).

### 2.2.3. Modelado matemático

Jiménez (2003) menciona que el modelado matemático de un proceso consiste en una serie de relaciones que se establecen para cada equipo que forma parte del sistema. Podemos establecer que en general para cada equipo un modelo consiste de una combinación de las siguientes expresiones:

- Balance de cantidad de movimiento
- Balance de materia
- Balance de energía
- Ecuaciones de diseño
- Relaciones termodinámicas y ecuaciones cinéticas
- Especificación de algunas variables o restricciones particulares

No se requiere balance de cantidad de movimiento porque el proceso de transferencia de masa es por difusión y no por flujo.

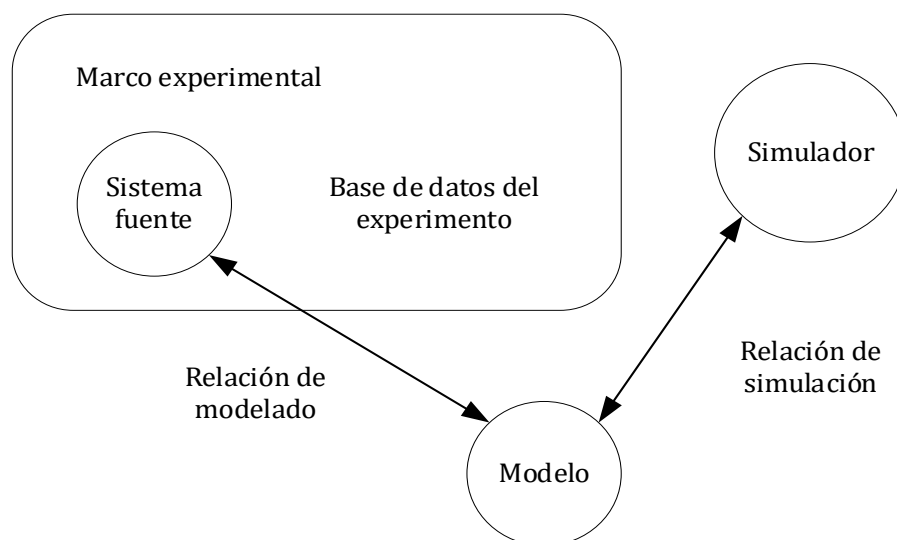
Por su parte las ecuaciones básicas de balance de materia y energía se establecen en estado estacionario para fines de diseño o en estado no estacionario para fines de estudios dinámicos y de control (Jiménez, 2003).

El modelado relacionado al campo de la liberación controlada de productos farmacéuticos a partir de materiales recubiertos ha sido muy importante. Muchos de los métodos de modelización son transferibles a los fertilizantes de liberación controlada (CRF). Para hacer un modelo matemático para CRF, es muy importante tener una comprensión clara de los procesos químicos y fisiológicos relacionados con el fenómeno de liberación. Algunos de los factores importantes que significativamente influyen en el mecanismo de liberación controlada son las propiedades mecánicas y biodegradabilidad (Irfan et al., 2018).

Urquía y Villalba (2016) mencionan que experimentar con modelos matemáticos puede resultar más seguro y de bajo costo en comparación a la experimentación directa con el sistema. Mediante el modelo se pueden ensayar diversas condiciones que en la práctica real resultarían poco factibles o riesgosas, esto sucede cuando se quiere modificar variables en el sistema o se busca establecer nuevos rangos de operación. En la Figura 5, se observa la relación entre el modelo, el sistema de estudio y la simulación.

### Figura 5

*Relación de modelado y simulación*

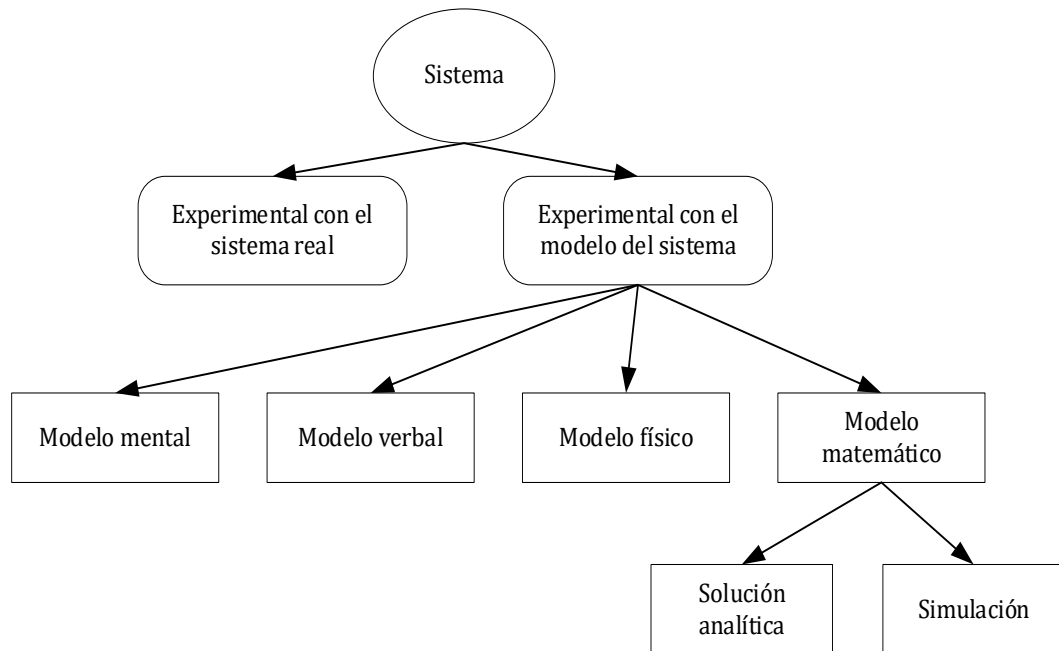


Fuente: Adaptado de Urquía y Villalba (2016)

En la Figura 6, se observa las diferentes formas de estudiar un sistema, el estudio mediante modelos matemáticos implica una solución analítica del modelo o la simulación mediante algoritmos de programación.

**Figura 6**

*Formas de estudiar un sistema mediante el modelado*



Fuente: Adaptado de Urquía y Villalba (2016)

La validez del modelo se refiere a la relación entre el modelo y el marco experimental de tal forma que el modelo represente de forma fiel el comportamiento del sistema o hasta un determinado punto, el cual es precisado por los objetivos de la simulación (Urquía y Villalba, 2016).

#### 2.2.4. Modelos matemáticos alternativos

Los modelos matemáticos para la liberación controlada han sido estudiados y orientados con mayor énfasis en la aplicación de fármacos. El modelado de la liberación de fármacos es de gran importancia para la ingeniería y la industria farmacéutica ya que permite estudiar los mecanismos de transporte y predecir los efectos de la composición mediante los perfiles de liberación, lo cual es muy útil para el diseño y la administración de la dosis adecuada (Wu et al., 2005).

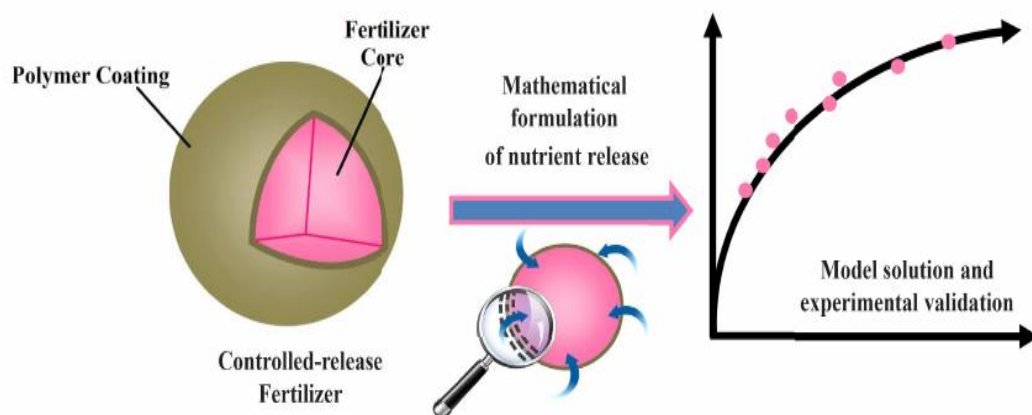
El estudio del mecanismo de liberación de fármacos a través de una matriz hinchable de polímero hidrófilo es muy complejo para considerar solamente la difusión, pues está presente también el fenómeno de hinchazón asociado a la reticulación y la liberación de fármaco en el polímero. Los modelos al considerar estos aspectos se vuelven más detallados a la vez más difíciles de resolver, tanto empírica y teóricamente. La mayoría de modelos considera ciertas características físicas y descuida los aspectos relacionados a la difusión, éstos consideran un estado pseudoestable y el transporte de agente activo en una sola dimensión (Liu, Wu, y Chang, 2008)

Un enfoque de dos dimensiones para el transporte de fármacos considera la segunda ley de difusión de Fick con difusividad dependiente de la concentración, una constante de velocidad normalizada para la disolución en la superficie del polímero y una constante de hinchazón considerando el movimiento de las condiciones de contorno (Wu et al., 2005).

En la Figura 7 se observa el esquema de liberación de un compuesto contenido en una partícula de matriz polimérica y el perfil de liberación:

### Figura 7

*Esquema de modelado de nutrientes encapsulados*



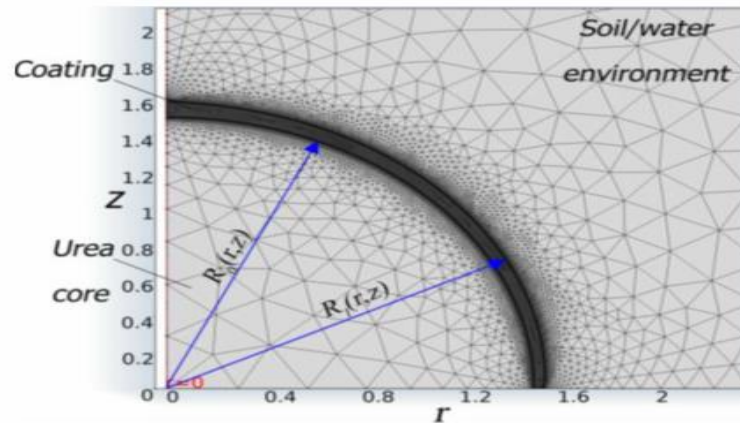
Fuente: Irfan et al., (2018)

### Modelo de Irfan

Irfan (2018) propone el modelo matemático para un fertilizante de urea recubierto con polímero, para lo cual plantea el esquema de modelado tal como se muestra en la Figura 8.

### Figura 8

Esquema de modelado de una partícula recubierta



Fuente: Irfan et al. (2018)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2D}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \quad (1)$$

$$D = 5.55 \times 10^{-5} T \exp\left(\frac{2135}{T}\right) \quad (2)$$

Donde

- $C$  : concentración de nutrientes
- $r$  : radio de la partícula
- $D$  : difusividad efectiva
- $T$  : temperatura en K
- $t$  : tiempo de liberación



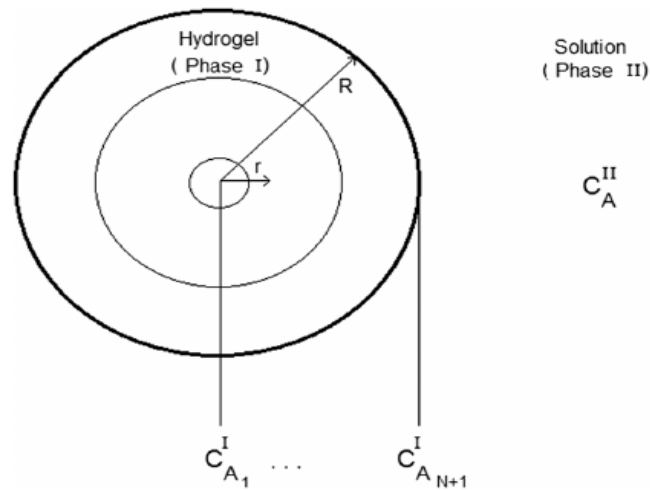


### Modelo de Raymundi

Raymundi et al. (2016) propone el esquema de modelado para la difusión de un compuesto A desde el seno de una partícula esférica hacia una cubierta de hidrogel y posteriormente a una fase acuosa como se muestra en la Figura 10.

**Figura 10**

Esquema de modelado para la difusión de A



Fuente: Raymundi et al. (2016)

Ecuaciones de modelado

$$\frac{\partial C_A^I}{\partial t} = D_A \left[ \frac{\partial^2 C_A^I}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C_A^I}{\partial r} \right] \quad (7)$$

$$t = 0, C_A^I = C_{A, inicial}^I \quad (8)$$

$$r = 0, \left. \frac{\partial C_A^I}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (9)$$

$$r = R, -D_A \left. \frac{\partial C_A^I}{\partial r} \right|_{r=R} = k_c \left( \frac{C_A^I|_{r=R}}{K_p} - C_A^{II} \right) \quad (10)$$

Donde:

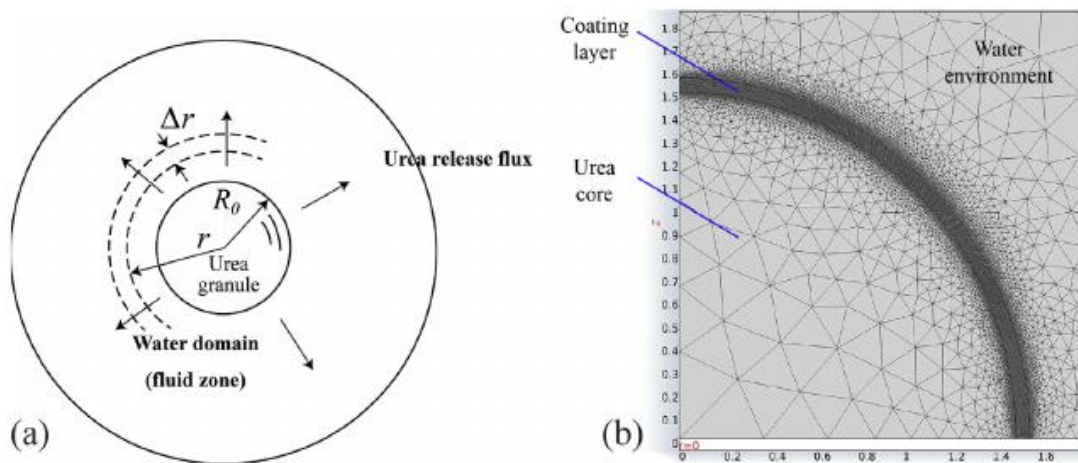
- $C$  : concentración de A
- $D$  : difusividad efectiva
- $t$  : tiempo de liberación
- $r$  : radio de la partícula

### Modelo de Trinh

Trinh et al. (2015) propone el esquema de modelado para la difusión de urea desde el seno de una partícula con recubrimiento polimérico hacia una fase acuosa, tal como se muestra en la Figura 11.

### Figura 11

Esquema de modelado para la difusión de urea



Fuente: Trinh et al., (2015)

### Ecuaciones de modelado

$$D_e \left[ \frac{\partial^2 C(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C(r, t)}{\partial r} \right] = \varepsilon \frac{\partial C(r, t)}{\partial t} \quad (11)$$

$$D_{urea} \frac{\partial^2 C(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2D_{urea}}{r} \frac{\partial C(r, t)}{\partial r} = \frac{\partial C(r, t)}{\partial t} \quad (12)$$

$$D_{urea}(r, t) = (1.380 - 0.0782C(r, t) + 0.00464C(r, t)^2) 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \quad (13)$$

Donde:

- $C$  : concentración de urea
- $D_{urea}$  : difusividad efectiva de la urea
- $t$  : tiempo de liberación
- $r$  : radio de la partícula

## **2.3. Conceptual**

### 2.3.1. Tipos de fertilizantes utilizados en la liberación

#### a. Fertilizantes con nitrógeno orgánico (de baja solubilidad)

Producto de estructura molecular compleja formado por un componente nitrogenado soluble en agua y aldehídos a través de reacciones químicas, con un nivel de solubilidad baja. En la solución suelo el producto es liberado y convertido de forma lenta en soluciones químicas disponibles para la planta. Dentro de este grupo tenemos las Urea-Form, la cual libera sus nutrientes principalmente por la actividad microbiológica del suelo; y las Isobutilidendiurea (IBDU) a diferencia de las Urea-Form, libera sus nutrientes a través de la hidrólisis. Debido a que la liberación de nutrientes de este tipo de fertilizantes depende totalmente del suelo y de las condiciones climáticas y no puede predecirse se les denomina fertilizantes de liberación lenta (Shaviv et al., 2003).

#### b. Fertilizantes recubiertos

Fertilizantes en los que una barrera física controla la penetración del agua y liberación de sus nutrientes. Consisten en un concentrado que aparte del N contiene otros nutrientes solubles, los cuales se encuentran recubiertos por una capa insoluble al agua. Para recubrir estos fertilizantes se han hecho uso de distintos materiales como ceras, aceites, azufre, plásticos y resinas; siendo la más común las cubiertas a base de polímeros (Shaviv et al., 2003).

#### c. Fertilizantes inorgánicos de baja solubilidad

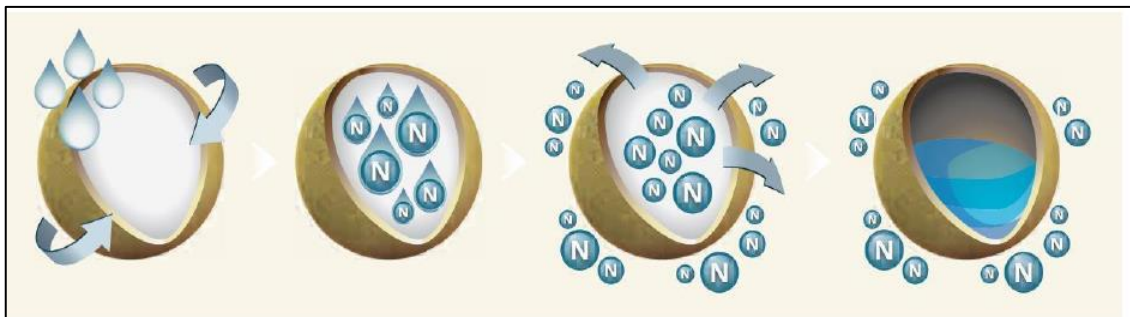
Estas sustancias nitrogenadas inorgánicas de baja solubilidad son mucho más limitadas, ya que casi todas las sales nítricas y amónicas usadas como fertilizantes son muy solubles en agua, en este grupo se tienen a los fosfatos de amonio y un metal (fosfato amónico magnésico y el fosfato amónico ferroso) los cuales son liberados al medio de forma lenta; contienen un bajo porcentaje de nitrógeno menos del ocho por ciento (Shaviv et al., 2003).

### 2.3.2. Liberación controlada de nutrientes

El mecanismo de liberación incluye el transporte de agua a través del recubrimiento, la condensación de moléculas de agua en la superficie del núcleo de nutrientes, el desarrollo de la presión osmótica, disolución del nutriente activo, hinchazón de la CRF gránulo, y finalmente la liberación de los nutrientes por el transporte a través del recubrimiento, lo que podría ser a través de microporos en el recubrimiento cuando la presión osmótica excede la resistencia del umbral de la membrana de recubrimiento. La liberación puede ser espontánea y a granel, que se llama el mecanismo de fallo o liberación catastrófica puede ser controlada por el transporte a través del recubrimiento con una concentración o gradiente de presión como la fuerza impulsora. (Irfan et al., 2018). En la Figura 12 se observa el mecanismo de liberación de nitrógeno encapsulado, el agua se difunde en la partícula y genera el movimiento del nitrógeno, el cual se libera debido al gradiente de concentración alrededor de la partícula.

#### Figura 12

##### *Liberación de nutrientes encapsulados*



Fuente: Castañeda Tarrillo (2018)

### 2.3.3. Nutrientes encapsulados por nanopartículas

El término nutrientes encapsulados por nanopartículas en hidrogeles hace referencia a la encapsulación de los nutrientes en el sistema nanopartícula / hidrogel. Las técnicas de encapsulación han sido extensamente aplicadas a fármacos en la forma de nanoencapsulación, microencapsulación, encapsulación en hidrogeles o encapsulación micelar en copolímeros en bloque. Algunas de estas técnicas han sido extendidas a aplicaciones agrícolas. Los fertilizantes de liberación lenta y controlada pueden reunir estos requisitos de

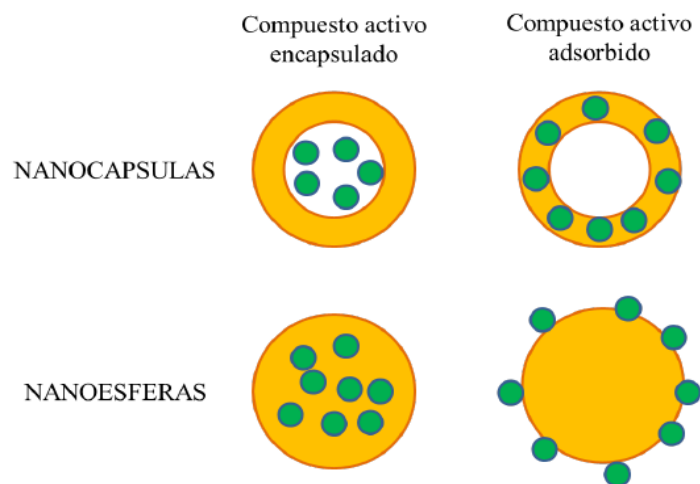
fertilizante ideal cuando su cinética de liberación y las necesidades de las plantas se ajustan.

El principal proceso de obtención de los fertilizantes de liberación controlada esta dado en proteger por recubrimiento o microencapsulación un fertilizante convencional, haciéndolo un material semipermeable, controlando la penetración del agua y de liberación de los nutrientes más solubles presente en el fertilizante convencional, siendo estos utilizado por las plantas de acuerdo a sus necesidades (Gonzáles et al., 2007)

Las nanopartículas son un término colectivo empleado para las nanocápsulas y nanoesferas. Las primeras son sistemas vesiculares en los que el principio activo está confinado en una cavidad o núcleo líquido rodeado por una membrana polimérica, mientras que las esferas son sistemas matriciales en los que el activo se encuentra incrustado en la matriz polimérica de manera uniforme. La principal ventaja de las nanocápsulas frente a las nanoesferas es su menor contenido polimérico y mayor eficiencia de encapsulación. En la Figura 13 se observa diferentes configuraciones del sistema nanopartícula / compuesto activo.

### Figura 13

#### *Distribución de compuestos activos en nanopartículas*



Fuente: Murru (2017)

La calidad de las partículas producidas se evalúa en base a la capacidad de retención del material polimérico y de la estabilidad de la dispersión con el

tiempo. También es importante evaluar el sistema de liberación, asegurando que el compuesto encapsulado es liberado en el sitio y a la velocidad de interés. Existen numerosos mecanismos de liberación, que varían en función del método de preparación, del agente encapsulante y de las condiciones seleccionadas. Su clasificación se basa en los fenómenos físico-químicos que promueven la liberación del compuesto encapsulado: por difusión, por gradientes de presión u osmóticos, por cambios de pH o temperatura o una combinación de ellos. Existen modelos matemáticos que permiten desarrollar sistemas con características específicas y optimizar la cinética de liberación (Murru, 2017).

#### 2.3.4. Modelado de la liberación controlada de nutrientes

Para el modelado matemático se utilizó la ecuación general de balance de materia que se muestra en la ecuación (14) ,

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_A}{\partial t} + \left( V_r \frac{\partial C_A}{\partial r} + V_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial C_A}{\partial \theta} + V_\varphi \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial C_A}{\partial \varphi} \right) \\ = D_{AB} \left( \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial C_A}{\partial \theta} \right) \right. \\ \left. + \frac{1}{r^2 \sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 C_A}{\partial \varphi^2} \right) + R_A \end{aligned} \quad (14)$$

Se realizaron simplificaciones a la ecuación considerando lo siguiente: las partículas empleadas son esféricas, no hay transporte convectivo, las densidades son constantes para todas las fases, no se presentan reacciones químicas durante el evento de transporte, se presenta un gradiente homogéneo de forma radial en la partícula, el medio fuera de la partícula es homogéneo, el coeficiente de transporte de masa entre las fases trabajadas es constante y existe transporte fickiano.

Las condiciones de frontera para la liberación controlada fueron las siguientes:

$$\begin{aligned} t = 0, \quad C = C_{ini}, \quad \forall r > 0 \\ r = 0, \quad \frac{dC}{dr} = 0, \quad \forall t > 0 \\ r = R, \quad -D_{eff} \frac{dC}{dr} = K_m(C - C_\infty), \quad \forall t > 0 \end{aligned}$$

Donde

- $t$  : tiempo
- $C$  : concentración de nutriente
- $r$  : radio de la partícula
- $D_{eff}$  : coeficiente de difusión efectiva
- $K_m$  : constante de transferencia de masa

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de masa  $K_m$  se utilizaron las siguientes correlaciones de las ecuaciones (15), (16) y (17) (Zhang et al., 2018):

$$Sh = K_m(V_p/A_p)/D_p = 2.0 + 0.6Re^{0.5}Sc^{0.33} \quad (15)$$

$$Re = v(V_p/A_p)/\nu \quad (16)$$

$$Sc = \nu/D \quad (17)$$

Donde

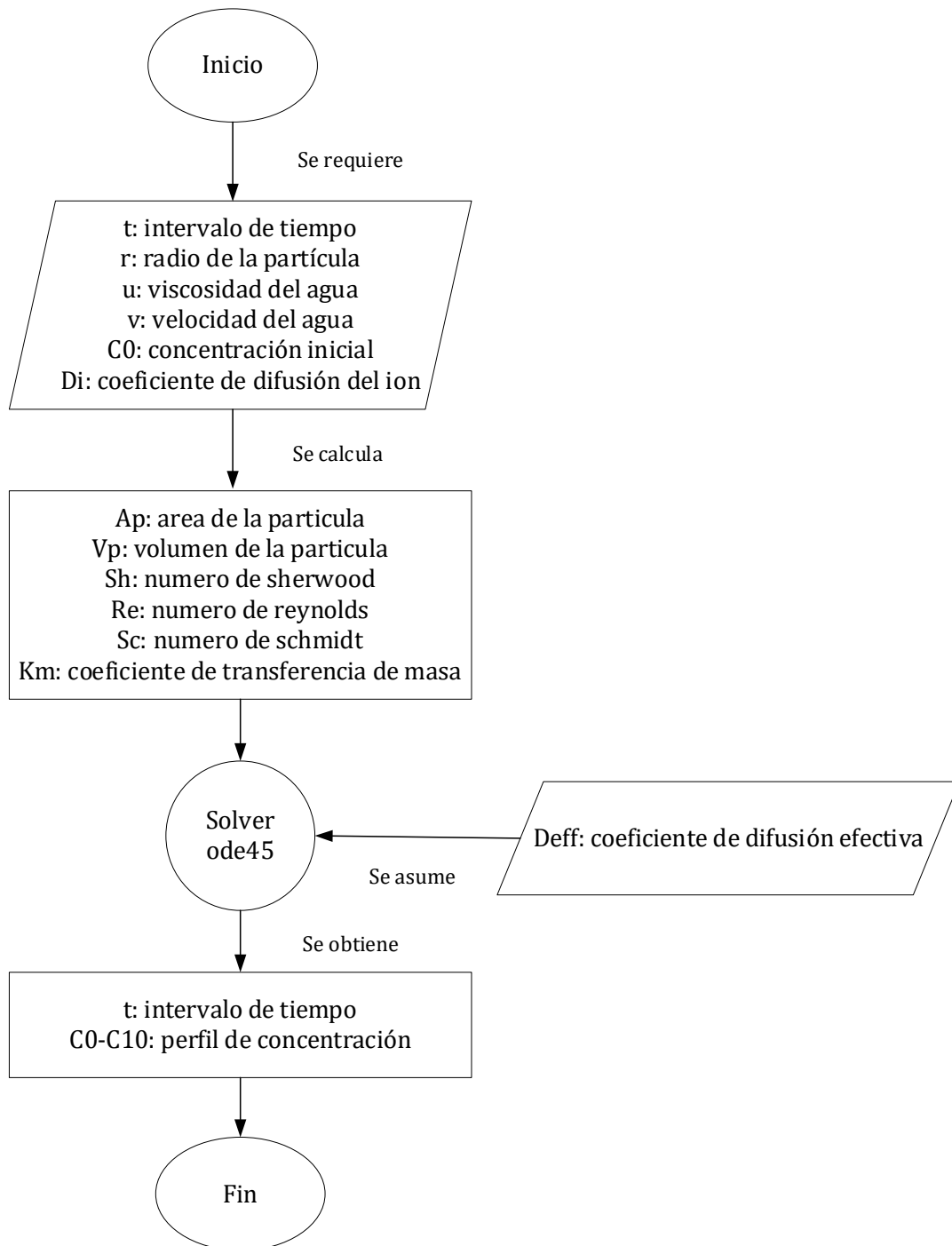
- $Sh$  : número de Sherwood
- $Re$  : número de Reynolds
- $Sc$  : número de Schmidt
- $D$  : coeficiente de difusión del ion
- $\nu$  : velocidad del agua
- $\nu$  : viscosidad del agua
- $V_p$  : volumen de la partícula
- $A_p$  : área de la partícula
- $D_p$  : diámetro de la partícula
- $K_m$  : constante de transferencia de masa

La resolución del sistema se realizó aplicando el método de diferencias finitas, discretizando parcialmente la ecuación diferencial parcial (EDP), convirtiéndola en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) y la simulación se realizó utilizando la programación en Matlab con la función ode45 que resuelve ecuaciones diferenciales. En la Figura 14 se muestra la secuencia utilizada para resolver el sistema EDO.



**Figura 14**

*Procedimiento para resolver la ecuación diferencial*



Con los resultados de la simulación se calcula la fracción liberada haciendo uso de la ecuación (18):

$$\text{Fracción Liberada} = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \quad (18)$$

Donde:

- $m_0$  : masa de nutriente en el tiempo inicial
- $m_t$  : masa de nutriente para un tiempo t

Para el ajuste de los datos experimentales se utilizó el estadístico error cuadrado medio (MSE)

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{i\text{calc}})^2}{n} \quad (19)$$

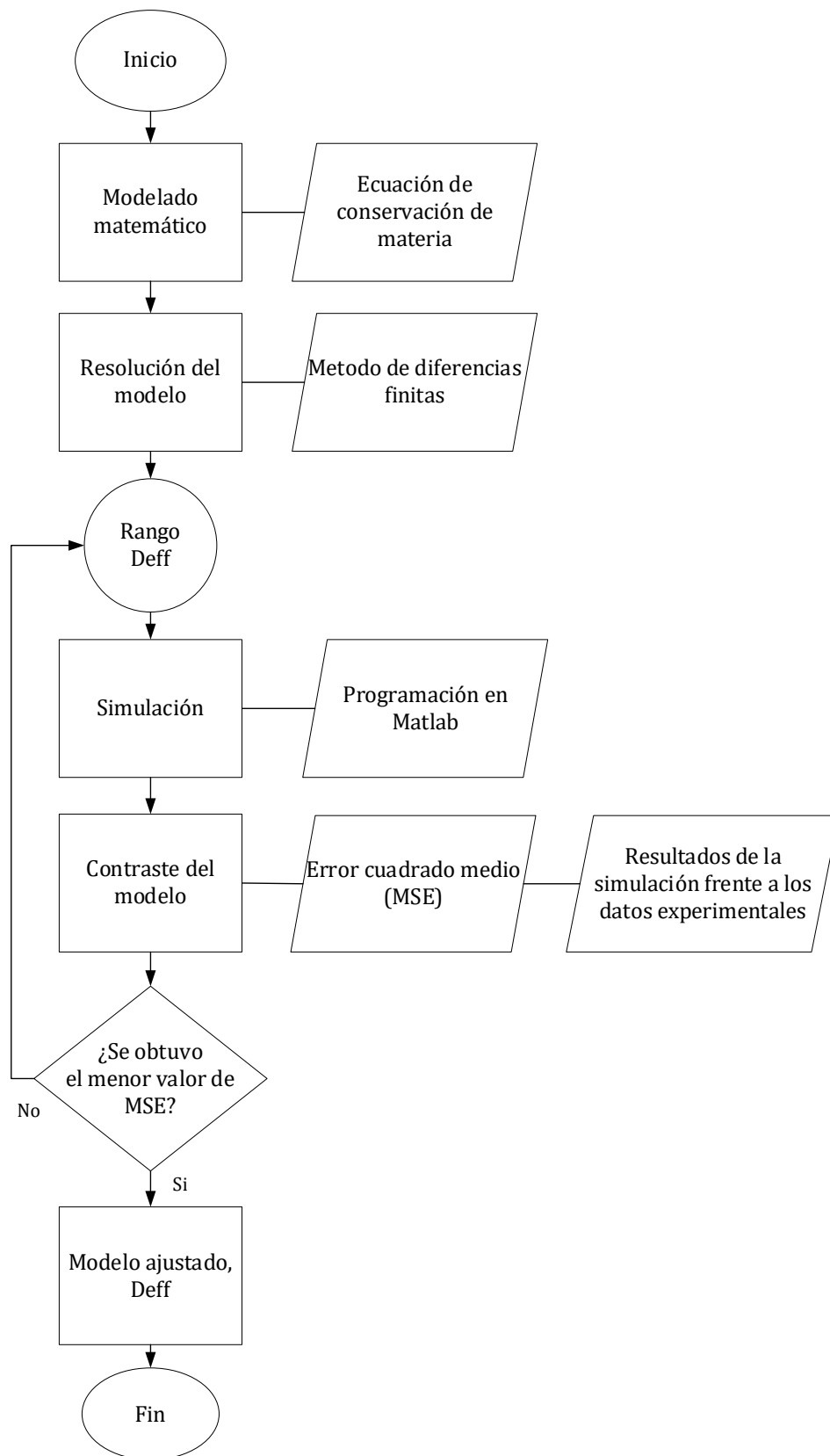
Donde

- $y_i$  : datos de fracción liberada tomada de la literatura
- $y_{i\text{calc}}$  : datos de fracción liberada resultado de la simulación
- $n$  : número de datos

Para calibrar el sistema simulado y los experimentales se utilizó el siguiente flujograma, en el cual se inicia asumiendo un valor para el coeficiente de difusión efectiva  $D_{eff}$ , luego se resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales, se calcula el valor de la fracción liberada y se calcula el valor de MSE. Este proceso se repite hasta encontrar el menos valor posible para dicho estadístico.

**Figura 15**

*Procedimiento para el ajuste del modelo matemático*



## 2.4. Definición de términos básicos

- Conductividad iónica: Es la medida de la tendencia del movimiento de iones a través de los defectos de la red cristalina de una sustancia.
- Fertilizante de liberación controlada (CFR): Fertilizante mejorado con una cubierta sensible a estímulos y que posee un periodo de liberación definido para mantener el control de la difusión de su contenido.
- Fertilizante de liberación lenta: Son aquellos fertilizantes que no liberan el total de los nutrientes al momento de su aplicación.
- Grado de reticulación: Magnitud del entrecruzamiento de cadenas poliméricas que provoca el hinchamiento de un hidrogel.
- Hidrogel: polímero con capacidad de absorber agua que forman una estructura sólida.
- Hinchamiento: Efecto de la absorción de agua de un hidrogel que produce una estructura sólida
- Liberación controlada: Difusión de un fármaco o compuesto donde se ha establecido un régimen controlado
- Macronutrientes: Compuestos químicos esenciales para el crecimiento de los cultivos, conformado por los elementos nitrógeno (N), fósforo (P) y Potasio (K).
- Micronutrientes: Compuestos químicos requeridos en cantidades mínimas para el crecimiento correcto de los cultivos, principalmente magnesio (Mg), azufre (S) y calcio (Ca).
- Modelado: Técnica basada en los principios naturales y el análisis matemático para formular la representación simbólica de un fenómeno.
- Modelo de liberación controlada: Representación matemática del fenómeno de difusión de un fármaco o compuesto en un determinado medio.
- Nanopartícula: agregados atómicos con dimensiones entre 1nm a 10 nm
- Periodo de liberación: Tiempo previsto para la liberación total de un compuesto.

- Poliacrilamida (PAM): Polímero a base de acrilato, utilizado en la formación de hidrogeles.
- Reticulación: es la formación de redes tridimensionales causada por a la unión de cadenas de polímero homogéneas.
- Simulación: Representación de un fenómeno mediante la resolución de un modelo matemático.
- Sustrato: Lugar que sirve de base para la siembra de una planta.
- Tasa de liberación: Velocidad de entrega de un fármaco o compuesto a través de un medio específico.

### III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

#### 3.1. Hipótesis

##### 3.1.1. Hipótesis general

La ecuación de conservación de materia y el conocimiento de los parámetros como la difusividad efectiva, radio de la partícula, así como la concentración inicial del micronutriente permite el desarrollo del modelado matemático de la liberación controlada de los nutrientes nitrógeno-fósforo-potasio (N-P-K) encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola.

##### 3.1.2. Hipótesis específicas

- a. El conocimiento de la ecuación de conservación de materia y de los parámetros como la difusividad efectiva, radio de partícula y la concentración inicial del sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola, permite la descripción del mecanismo de la liberación controlada de nutrientes encapsulados.
- b. Los factores fisicoquímicos influyentes, tales como: pH [7-8], conductividad eléctrica [700-1000]  $\mu\text{S/cm}$  y humedad [90-100]%, condicionan la transferencia efectiva de liberación controlada de nutrientes encapsulados N-P-K en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola.
- c. Los perfiles de concentración obtenidos por el modelo matemático propuesto son concordantes con los datos experimentales reportados de la literatura; por tanto, permiten la validación de dicho modelo al estar en concordancia estadística con los datos experimentales.

#### 3.2. Definición conceptual de variables

##### *Variable dependiente*

Y= Modelado de la liberación controlada

El modelo matemático de la liberación controlada de nutrientes encapsulados por nanopartículas describe el fenómeno a través de perfiles de concentración

basándose en las ecuaciones de transferencia de masa y la caracterización del sistema (Irfan et al., 2018).

### ***Variables independientes***

X1= Mecanismo de liberación controlada de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola

El mecanismo de liberación controlada de nutrientes encapsulados por nanopartículas en hidrogeles de uso agrícola permite la entrega efectiva de fertilizantes a los cultivos (Mansi P. et al., 2017)

X2= Factores influyentes en la liberación controlada de nutrientes

Los factores influyentes en la liberación controlada de nutrientes, tales como el pH, conductividad eléctrica (C.E.) , temperatura y humedad generan cambios significativos en la difusión de nutrientes (Aguiar et al., 2018)

X3= Validación del modelo matemático propuesto

La validación del modelo matemático es la etapa que permite comprobar el desempeño del modelo frente al fenómeno haciendo uso de herramientas estadísticas (Pinzón et al., 2002)

### **3.2.1. Operacionalización de variables**

En la Tabla 2 se muestra el esquema de operacionalización de variables que permitirá el desarrollo de la investigación.

**Tabla 2**

*Operacionalización de variables*

<b>VARIABLES</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>TÉCNICA</b>
<b>Variable dependiente</b>				
Y= Modelado de la liberación controlada	Modelo matemático que describe el proceso de liberación controlada	Perfil de concentración de nutrientes N-P-K en el sistema nanopartícula/hidrogel	Formulación y programación de modelos matemáticos en el software Matlab	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modelado con ecuación de conservación de materia</li> <li>Diferencias finitas</li> </ul>
<b>Variables independientes</b>				
X1= Mecanismo de liberación controlada de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nutriente</li> <li>Nanopartícula</li> <li>Hidrogel</li> <li>Mecanismos de transferencia de masa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>[N]-[P]-[K]</li> <li>nm</li> <li>g/g</li> <li>Variación de concentración en el sistema en función al tiempo</li> </ul>	Contrastación con datos de referencias bibliográficas.	Revisión bibliográfica
X2= Factores influyentes en la liberación controlada de nutrientes	<ul style="list-style-type: none"> <li>pH</li> <li>Humedad</li> <li>Conductividad</li> <li>Temperatura</li> <li>Coefficiente de difusión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Acido-alcalino</li> <li>%</li> <li>(uS/cm)</li> <li>oC</li> <li>(m<sup>2</sup>/s)</li> </ul>	Contrastación con datos de referencias bibliográficas.	Revisión bibliográfica
X3= Validación del modelo matemático propuesto	Verificación de los errores del modelo matemático propuesto y los datos experimentales reportados en la literatura.	Error y varianza generado entre el modelo matemático propuesto y los datos experimentales reportados en la literatura.	Calculo de error y varianza entre el modelo matemático propuesto y los datos experimentales reportados en la literatura	Cálculo estadístico



## **IV. DISEÑO METODOLÓGICO**

### **4.1. Tipo y diseño de investigación**

#### **4.1.1. Tipo de investigación**

Exploratoria, porque la investigación del modelado de la liberación controlada de fertilizantes a través de hidrogeles es variante que no ha sido estudiada y se convertirá en una herramienta para la simulación de nuevas formulaciones de hidrogel/fertilizante para la mejora de los cultivos.

Básica, porque el resultado de la investigación aportará el conocimiento para la aplicación de nuevas técnicas que favorecen el aprovechamiento de los fertilizantes en los cultivos.

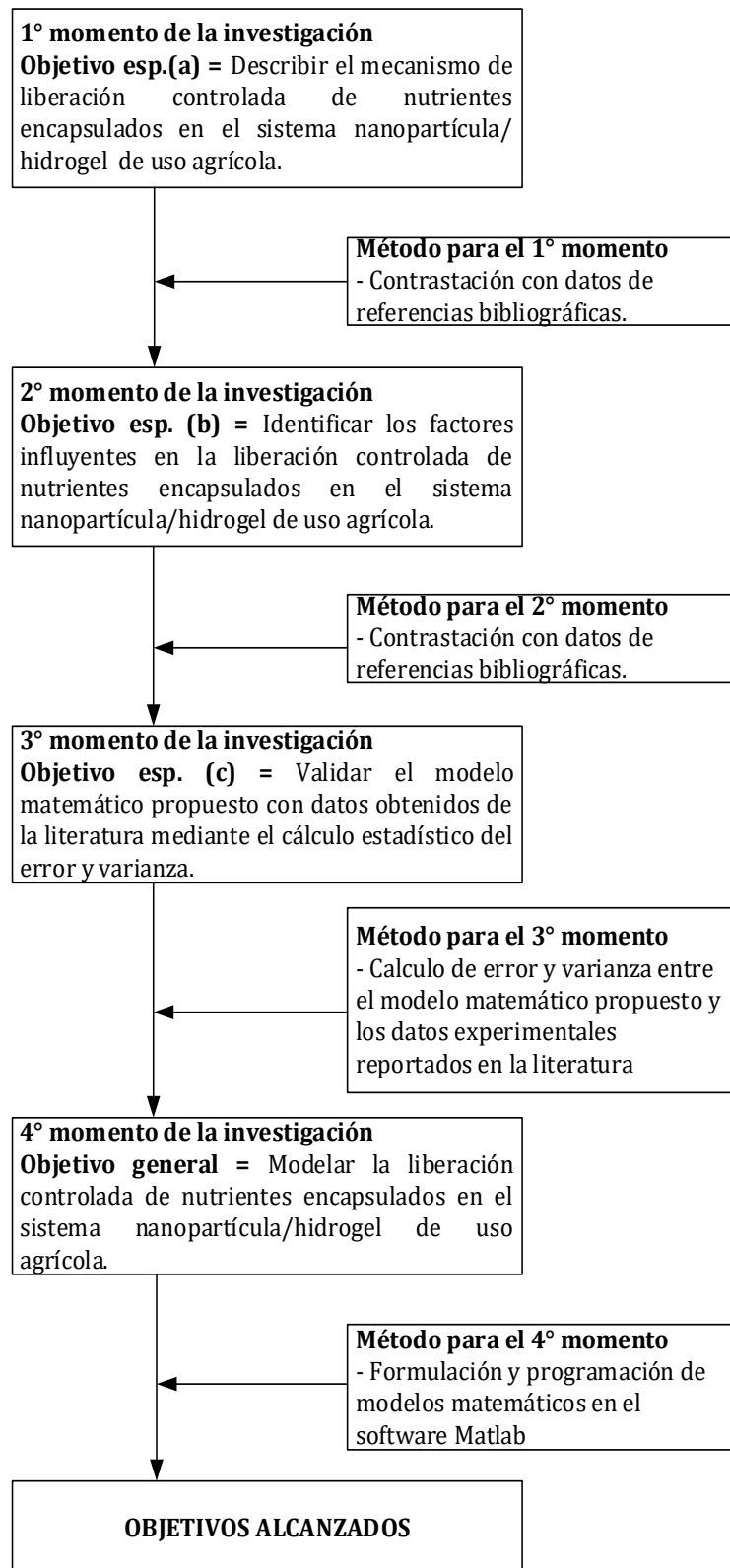
Descriptiva, porque el resultado de la investigación permitirá conocer el comportamiento de la liberación de fertilizantes a través de hidrogeles de uso agrícola, lo cual será representado mediante la simulación.

#### **4.1.2. Diseño de investigación**

El diseño para el desarrollo de la investigación se muestra en la Figura 16.

**Figura 16**

*Diseño de la investigación*



## **4.2. Método de investigación**

Los métodos para alcanzar los objetivos fueron:

- Revisión de publicaciones: se realizó la búsqueda bibliográfica de publicaciones referentes a la liberación controlada de nutrientes, el uso de hidrogeles en la agricultura y modelos alternativos para la liberación de fertilizantes.
- Modelado matemático: fue realizado partiendo de la ecuación general de conservación de materia para una geometría esférica, que fue adaptada a la situación en estudio.
- Programación del modelo: La solución del modelo matemático fue escrita en el lenguaje de programación de Matlab, donde fueron introducidas las ecuaciones diferenciales, los parámetros del sistema, las condiciones iniciales y de frontera.
- Contraste del modelo: las curvas concentración versus tiempo generadas por la simulación fueron contrastadas con las curvas concentración versus tiempo de la literatura referida.
- Análisis estadístico: el cálculo del error cuadrado medio (MSE) que es media de la distancia no negativa entre curvas, fue el indicador para la adecuada correlación de la simulación y los datos de la literatura.

## **4.3. Población y muestra**

Para la investigación propuesta no aplican los criterios de población y muestra ya que el estudio que se realiza es de carácter teórico referido a modelado matemático basado en los principios de conservación de materia y energía. En este sentido, para el desarrollo de la investigación se propone la unidad de análisis como: "Nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola".

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

En una primera etapa, la investigación se realizó en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM) en

coordinación con el equipo de trabajo de modelamiento y en las etapas posteriores fue realizada en domicilio, en el periodo desde febrero 2020 hasta marzo 2021.

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

Las técnicas inician con la búsqueda de publicaciones y la organización detallada de la información, elaborando para ello mapas conceptuales, fichas de resumen y tablas de doble entrada.

Los instrumentos para la recolección de la información son los siguientes:

- Registro de modelos matemáticos
- Registro de publicaciones

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

El análisis de los datos se realizó en forma sistemática, abarcando desde los datos generales hasta llegar a los datos específicos que se utilizan en el modelado tales como constantes cinéticas, coeficientes de difusión y el procesamiento de los datos se realiza a través del modelado matemático basado en las ecuaciones generales de conservación de materia y energía, que posteriormente será validado con la información recopilada de fuentes confiables. Así mismo, se aplica el método del error cuadrado medio (MSE) para evaluar el desempeño del modelo propuesto frente a los datos experimentales de otros autores.

## V. RESULTADOS

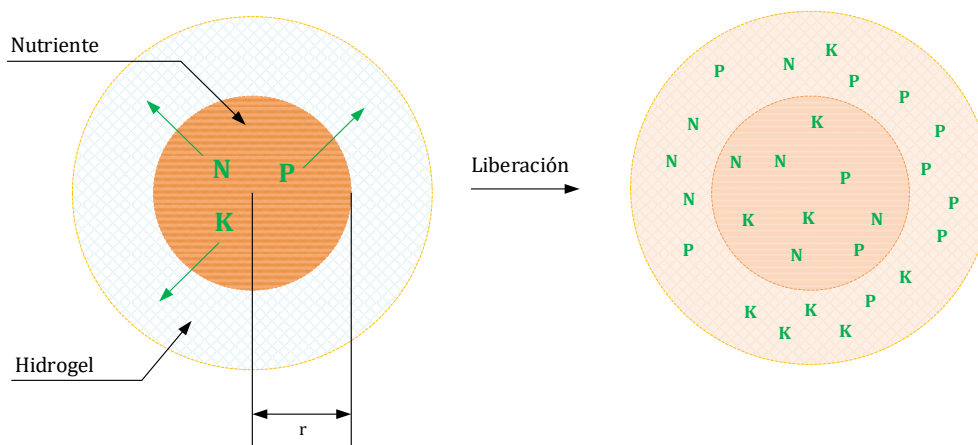
### 5.1. Resultados descriptivos

#### *Planteamiento del modelo matemático*

Una forma de representar el sistema de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel es mediante los modelos de matemáticos basados en la conservación de la materia. Este tipo de modelado implica el planteamiento del balance de materia de los nutrientes en el sistema nanopartícula/hidrogel. En la Figura 17 se plantea una representación de dicho sistema. La formulación del modelo toma en cuenta los efectos de dispersión radial, el parámetro de difusividad efectiva ( $D_{eff}$ ) y el coeficiente global de transferencia de masa ( $K_m$ ), el cual fue estimado mediante correlaciones con los números adimensionales de Schmidt ( $Sc$ ), Reynolds ( $Re$ ) y Sherwood ( $Sh$ ) (Zhang et al., 2018).

#### **Figura 17**

#### *Liberación de nutrientes en el sistema nanopartícula/hidrogel*



Partiendo de la ecuación general de conservación de materia (14), se realizaron las simplificaciones respectivas para adecuar el modelo de conservación al caso específico de la liberación controlada de nutrientes.

Se consideró la difusión de los nutrientes en el eje radial, en tal sentido, se simplificaron los términos velocidad en el eje polar y azimutal con lo cual sus respectivos términos quedan fuera de la ecuación. Así mismo los términos de dispersión en el eje angular y azimutal fueron simplificados de la ecuación. El

término de generación fue simplificado al no existir generación, con lo cual se obtuvo la siguiente formulación (20) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eff} \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{dC}{dr} \right) \quad (20)$$

Donde  $D_{eff}$  representa el coeficiente de difusión efectiva para el sistema de liberación controlada,  $C$  representa la concentración de los nutrientes dentro de la partícula,  $r$  el radio de la partícula y  $t$  el tiempo de liberación. Las condiciones de frontera que representan adecuadamente el sistema fueron:

$$\begin{aligned} t = 0, \quad C &= C_{ini}, \quad \forall r > 0 \\ r = 0, \quad \frac{dC}{dr} &= 0, \quad \forall t > 0 \\ r = R, \quad -D_{eff} \frac{dC}{dr} &= K_m(C - C_\infty), \quad \forall t > 0 \end{aligned}$$

### **Resolución del modelo matemático**

Se aplicó el método de diferencias finitas para la resolución del modelo matemático, este método nos lleva a formar un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de acuerdo a la siguiente distribución:

Para el centro de la partícula que contiene a los nutrientes, en  $r = 0$ , se obtiene:

$$\frac{dC}{dt} = D_{eff} \left( \frac{2r}{r} \frac{dC}{dr} + \frac{d^2C}{dr^2} \right) \quad (21)$$

Para salvar la indeterminación que se presenta en el término  $\frac{1}{r} \frac{dC}{dr}$  en  $r = 0$ , se aplicó la regla de L'Hospital y se procedió a discretizar parcialmente la ecuación diferencial (21):

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{r} \frac{dC}{dr} = \frac{d^2C}{dr^2} \quad (22)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eff} \left( 3 \frac{d^2C}{dr^2} \right) \quad (23)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = 3 \frac{D_{eff}}{\Delta r^2} (C_{i+1} - 2C_i + C_{i-1}) \quad (24)$$

$$\frac{\partial C_0}{\partial t} = 3 \frac{D_{eff}}{\Delta r^2} (C_1 - 2C_0 + C_{-1})$$

Aplicando las condiciones de frontera en  $r = 0$

$$\frac{dC}{dr} = 0 \rightarrow \frac{C_i - C_{i-1}}{\Delta r} = 0, C_i = C_{i-1}, C_0 = C_{-1} \quad (25)$$

Para el interior de la partícula, en  $0 < r < R$

$$\frac{dC}{dt} = D_{eff} \left( \frac{2r}{r} \frac{dC}{dr} + \frac{d^2 C}{dr^2} \right) \quad (26)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = D_{eff} \left( \frac{2}{i\Delta r} \frac{C_i - C_{i-1}}{\Delta r} + \frac{C_{i+1} - C_i + C_{i-1}}{\Delta r^2} \right) \quad (27)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = D_{eff} \left( \frac{2}{i\Delta r} \frac{C_i - C_{i-1}}{\Delta r} + \frac{C_{i+1} - C_i + C_{i-1}}{\Delta r^2} \right) \quad (28)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{D_{eff}}{\Delta r^2} \left( C_{i+1} - C_i + C_{i-1} + \frac{2}{i} (C_i - C_{i-1}) \right) \quad (29)$$

$$\frac{dC_1}{dt} = \frac{D_{eff}}{\Delta r^2} \left( C_2 - C_1 + C_0 + \frac{2}{1} (C_1 - C_0) \right)$$

$$\frac{dC_2}{dt} = \frac{D_{eff}}{\Delta r^2} \left( C_3 - C_2 + C_1 + \frac{2}{2} (C_2 - C_1) \right)$$

$$\frac{dC_3}{dt} = \frac{D_{eff}}{\Delta r^2} \left( C_4 - C_3 + C_2 + \frac{2}{3} (C_3 - C_2) \right)$$

$$\frac{dC_4}{dt} = \frac{D_{eff}}{\Delta r^2} \left( C_5 - C_4 + C_3 + \frac{2}{4} (C_4 - C_3) \right)$$

$$\frac{dC_5}{dt} = \frac{D_{eff}}{\Delta r^2} \left( C_6 - C_5 + C_4 + \frac{2}{5} (C_5 - C_4) \right)$$

$$\frac{dC_6}{dt} = \frac{D_{eff}}{\Delta r^2} \left( C_7 - C_6 + C_5 + \frac{2}{6} (C_6 - C_5) \right)$$

$$\frac{dC_7}{dt} = \frac{D_{eff}}{\Delta r^2} \left( C_8 - C_7 + C_6 + \frac{2}{7} (C_7 - C_6) \right)$$

$$\frac{dC_8}{dt} = \frac{D_{eff}}{\Delta r^2} \left( C_9 - C_8 + C_7 + \frac{2}{8} (C_8 - C_7) \right)$$

$$\frac{dC_9}{dt} = \frac{D_{eff}}{\Delta r^2} \left( C_{10} - C_9 + C_8 + \frac{2}{9} (C_9 - C_8) \right)$$

$$\frac{dC_{10}}{dt} = \frac{D_{eff}}{\Delta r^2} \left( C_{11} - C_{10} + C_9 + \frac{2}{10} (C_{10} - C_9) \right)$$

Aplicando la condición de frontera para el borde de la partícula en  $r = R$

$$-D_{eff} \frac{dC}{dr} = K_m (C - C_\infty) \quad (30)$$

$$-D_{eff} \frac{C_{i+1} - C_i}{\Delta r} = K_m (C_i - C_\infty) \quad (31)$$

$$C_{11} = C_{10} - \frac{K_m \Delta r}{D_{eff}} (C_{10} - C_\infty) \quad (32)$$

Para la estimación del coeficiente global de transferencia  $K_m$  se utilizó correlaciones con los números adimensionales  $Sh$ ,  $Sc$  y  $Re$  que se presentaron en las ecuaciones (15), (16) y (17) propuestas por (Zhang et al., 2018).

### ***Simulación del modelo matemático***

La simulación del modelo matemático fue realizada mediante la programación en Matlab, con la cual se logró la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales derivado del método de diferencias finitas.

El programa en Matlab inicia calculando los números adimensionales  $Sc$ ,  $Re$  y  $Sh$ . Para el ciclo de iteraciones se asume el parámetro del coeficiente de difusión efectiva ( $D_{eff}$ ) y se resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales. Los perfiles de concentración generados por el modelo son contrastados con los datos experimentales de los autores referentes, calculándose el error cuadrado medio (MSE), cuyo valor es el indicativo de una adecuada correlación de la simulación. El proceso se repite hasta encontrar el menor valor posible para el MSE (Ver Anexo 2).

A continuación, se presentan los resultados de la simulación para cada caso de nutriente (Ver Anexo 3).



## Potasio

Para una condición específica de nutrientes en la difusión de potasio se tiene los siguientes parámetros que se muestran en la Tabla 3 .

**Tabla 3**

*Parámetros de simulación para potasio*

<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Descripción</b>
$D_K$	$5.80 \times 10^{-11}$	(m <sup>2</sup> /s) coeficiente de difusión de potasio
$C_{K0}$	0.17	(kg/kg) concentración inicial
$v$	0.1	(m/s) velocidad del agua
$\mu$	$1.15 \times 10^{-6}$	(m <sup>2</sup> /s) viscosidad del agua a T=20 °C
$R$	0.0001	(m) radio de la partícula
$V_p$	$4.1888 \times 10^{-12}$	Volumen de la partícula
$A_p$	$1.2566 \times 10^{-7}$	Área de superficie de la partícula
$Sc$	$6.0526 \times 10^3$	Número de Schmidt
$Re$	2.8986	Número de Reynolds
$Sh$	20.0835	Número de Sherwood
$K_m$	$1.1448 \times 10^{-4}$	Coficiente de transferencia de masa

Los resultados de la simulación se muestran en la Figura 18,

Figura 19, Figura 20 y Figura 21, se observa la disminución de la concentración de potasio dentro de la partícula desde la posición central en C0 ( $r = 0$ ) hasta el contorno en C10 ( $r = R$ ) a través del tiempo.

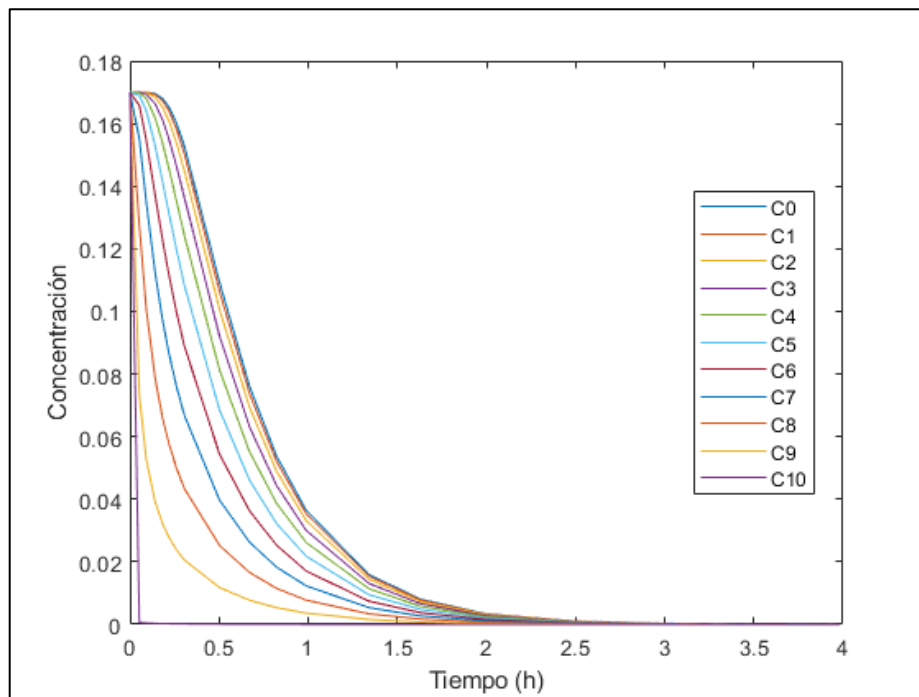
En la Figura 22, Figura 23, Figura 24 y Figura 25, se muestran los perfiles de la fracción liberada de potasio contenida en la partícula a través del tiempo, la cual fue calculada mediante la ecuación (33).

$$\text{Fracción Liberada} = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \quad (33)$$

Donde  $m_0$  representa la masa inicial del nutriente y  $m_t$  la masa de nutriente que queda en la partícula transcurrido un tiempo  $t$ .

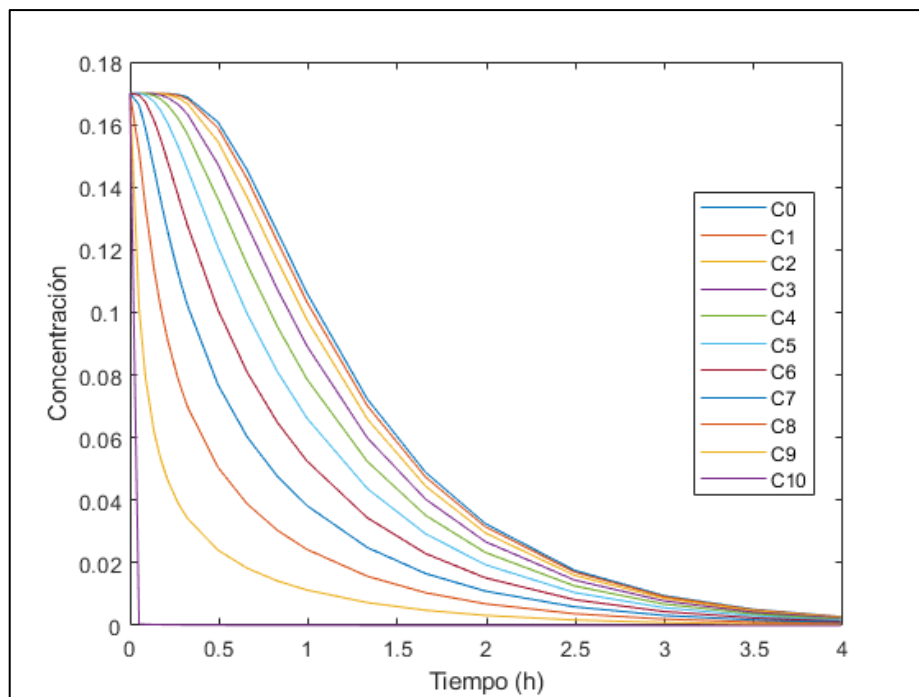
**Figura 18**

*Perfil de concentración de potasio de la tableta 6 x2 mm*



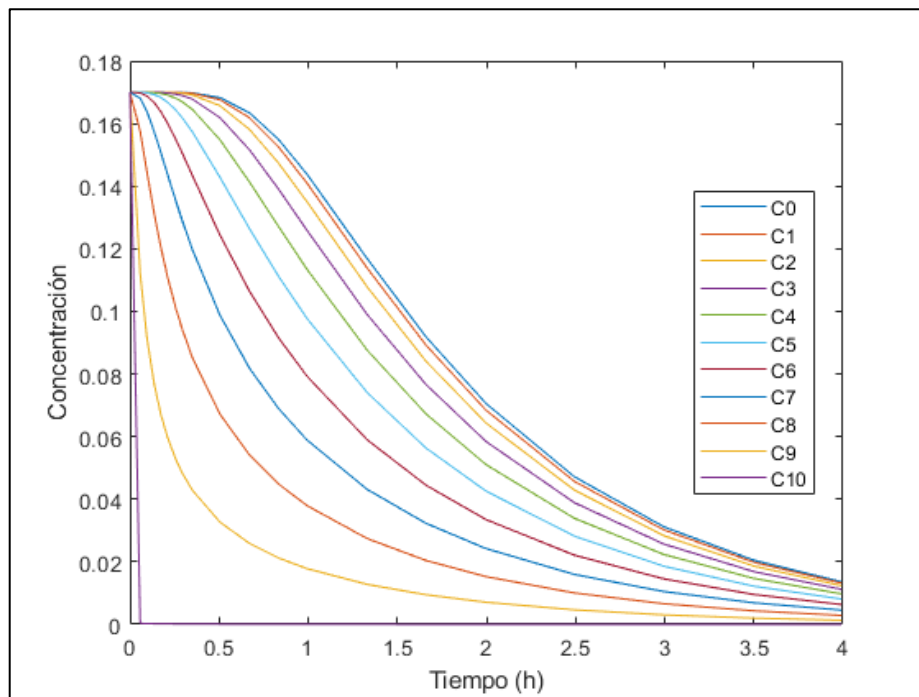
**Figura 19**

*Perfil de concentración de potasio de la tableta 9 x3 mm*



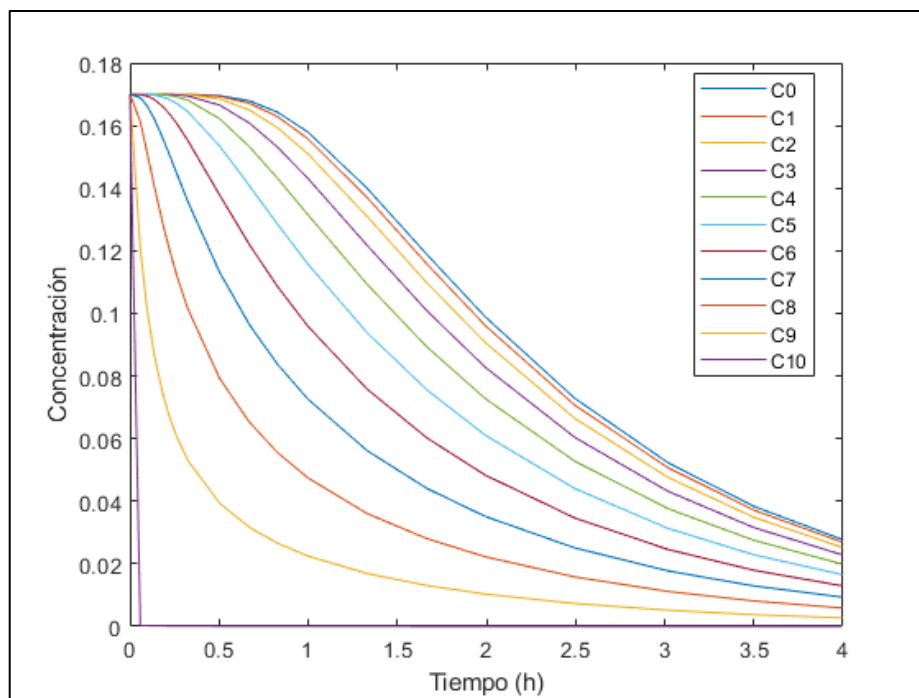
**Figura 20**

*Perfil de concentración de potasio de la tableta 12 x4 mm*



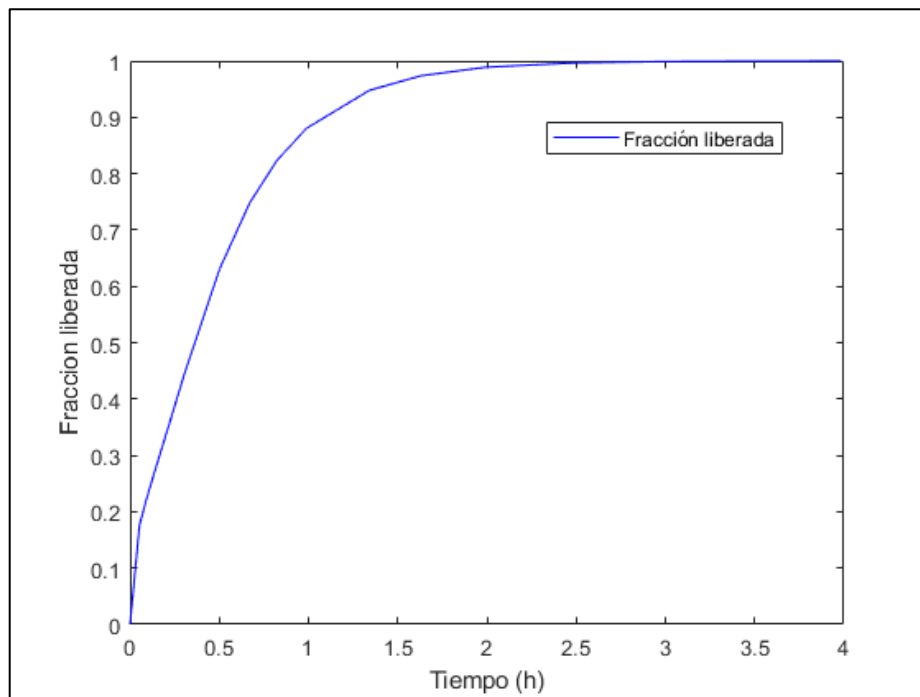
**Figura 21**

*Perfil de concentración de potasio de la tableta 15 x5 mm*



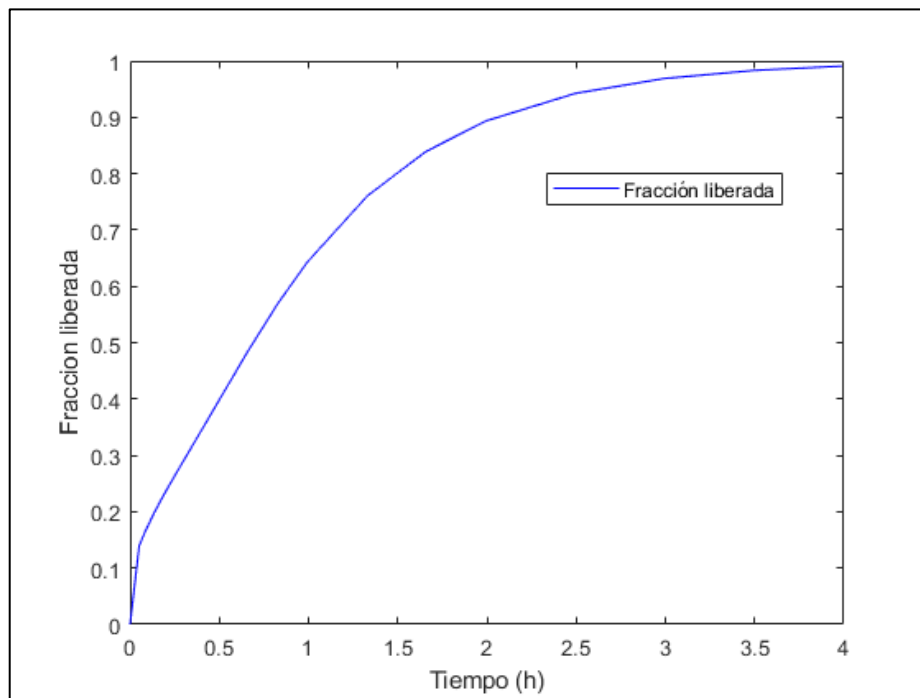
**Figura 22**

*Perfil de liberación de potasio de la tableta 6 x2 mm*



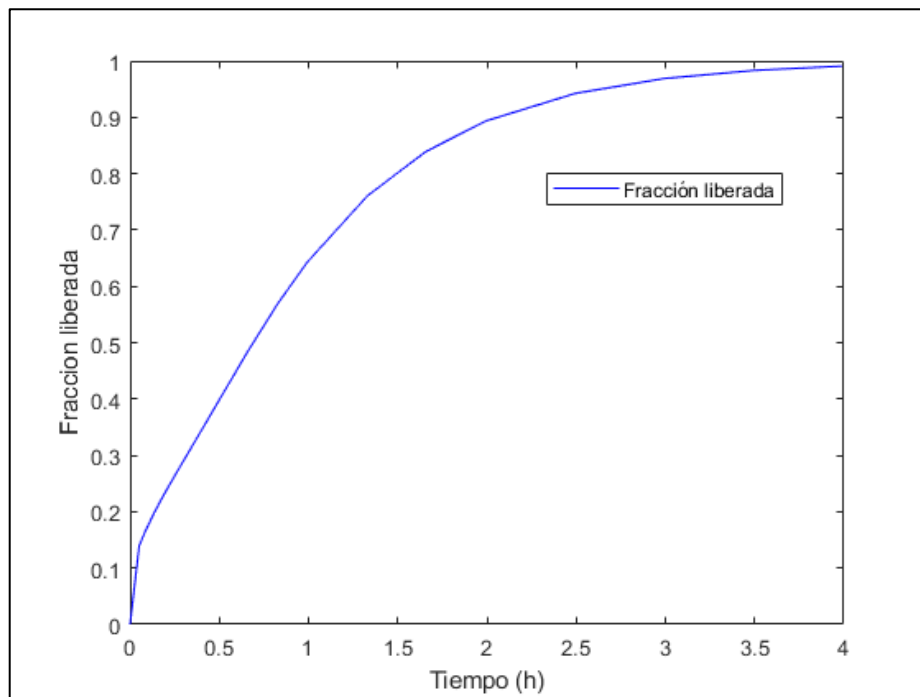
**Figura 23**

*Perfil de liberación de potasio de la tableta 9 x3 mm*



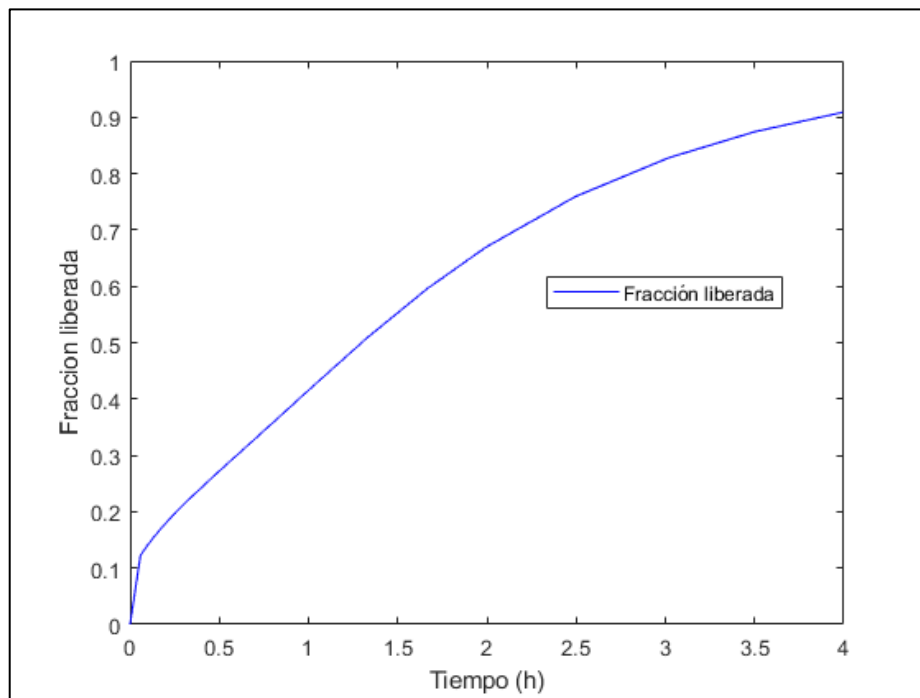
**Figura 24**

*Perfil de liberación de potasio de la tableta 12 x4 mm*



**Figura 25**

*Perfil de liberación de potasio de la tableta 15 x5 mm*



## Nitrógeno

Para una condición específica de nutrientes en la difusión de nitrógeno se tiene los siguientes parámetros que se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4**

*Parámetros de simulación para nitrógeno-nitrato*

<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Descripción</b>
$D_N$	$1.32 \times 10^{-08}$	(m <sup>2</sup> /s) coeficiente de difusión de nitrógeno-nitrato
$C_0$	2.35	(g/kg) concentración inicial
$v$	0.1	(m/s) velocidad del agua
$\mu$	$1.15 \times 10^{-6}$	(m <sup>2</sup> /s) viscosidad del agua a T=20 °C
$R$	0.0001	(m) radio de la partícula
$V_p$	$4.1888 \times 10^{-12}$	Volumen de la partícula
$A_p$	$1.2566 \times 10^{-7}$	Área de superficie de la partícula
$Sc$	87.0754	Número de Schmidt
$Re$	2.8986	Número de Reynolds
$Sh$	6.4607	Número de Sherwood
$K_m$	$2.6 \times 10^{-3}$	Coficiente de transferencia de masa

Los resultados de la simulación se muestran en la Figura 26,

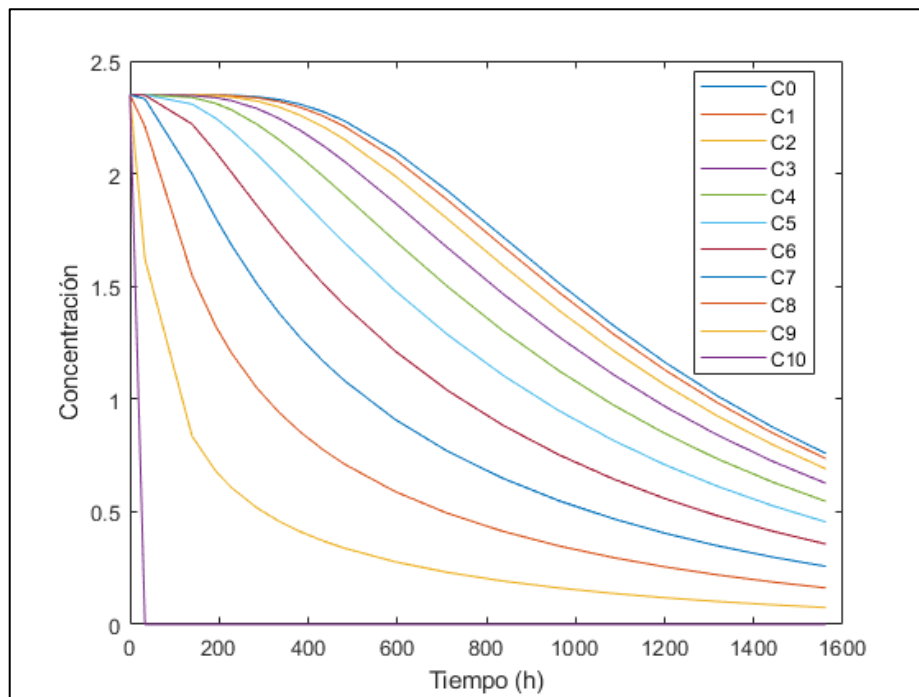
Figura 27 y Figura 28, la disminución de la concentración de nitrógeno dentro de la partícula desde la posición central en C0 ( $r = 0$ ) hasta el contorno en C10 ( $r = R$ ) a través del tiempo.

Asimismo, en la

Figura 29, Figura 30 y Figura 31 se muestran los perfiles de la fracción liberada de nitrógeno contenida en la partícula a través del tiempo.

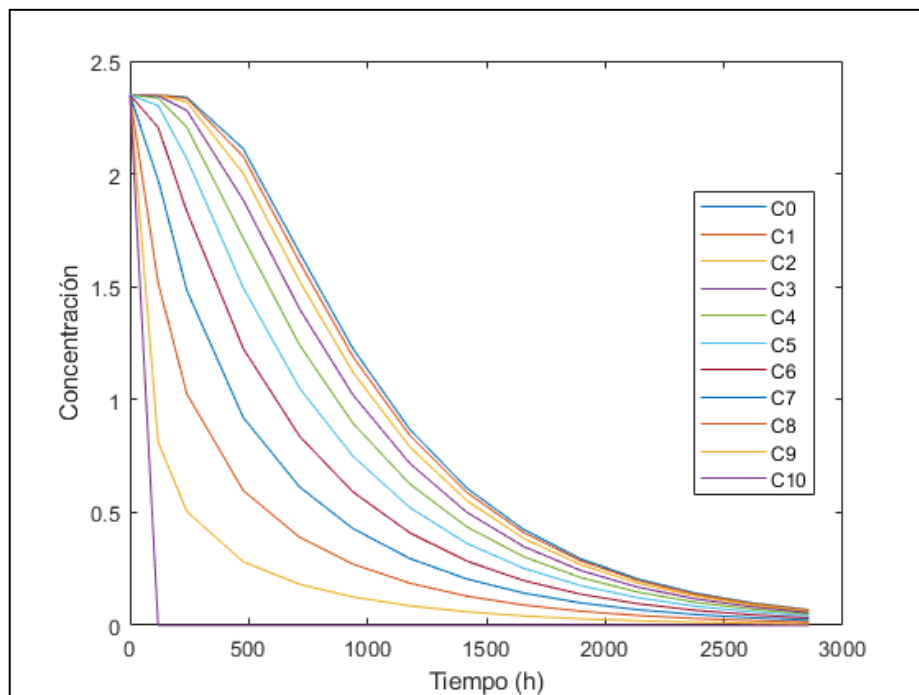
**Figura 26**

*Perfil de concentración de nitrógeno-urea*



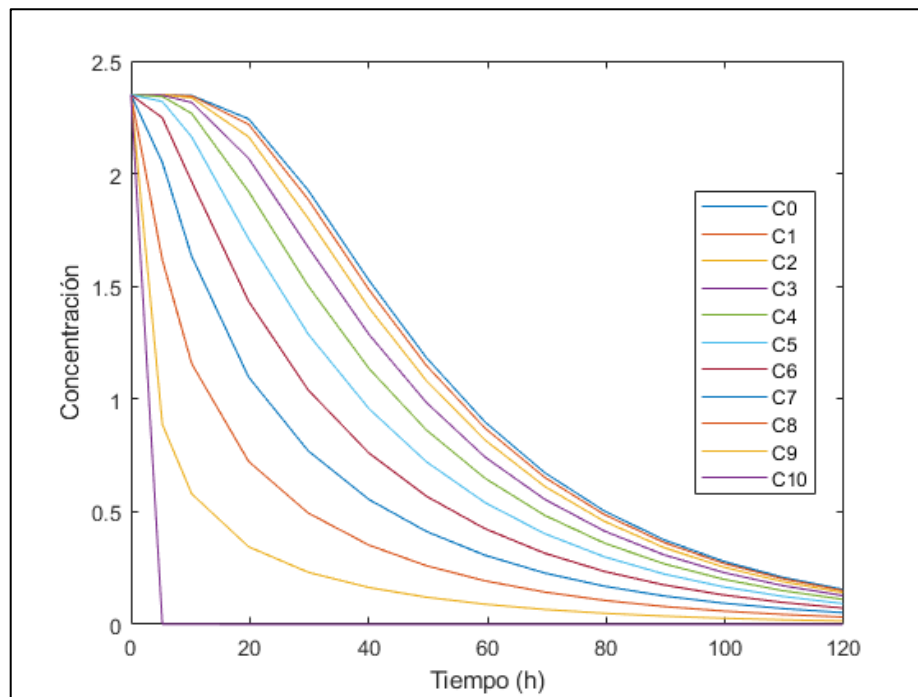
**Figura 27**

*Perfil de concentración de nitrógeno-nitrato de liberación parabólica*



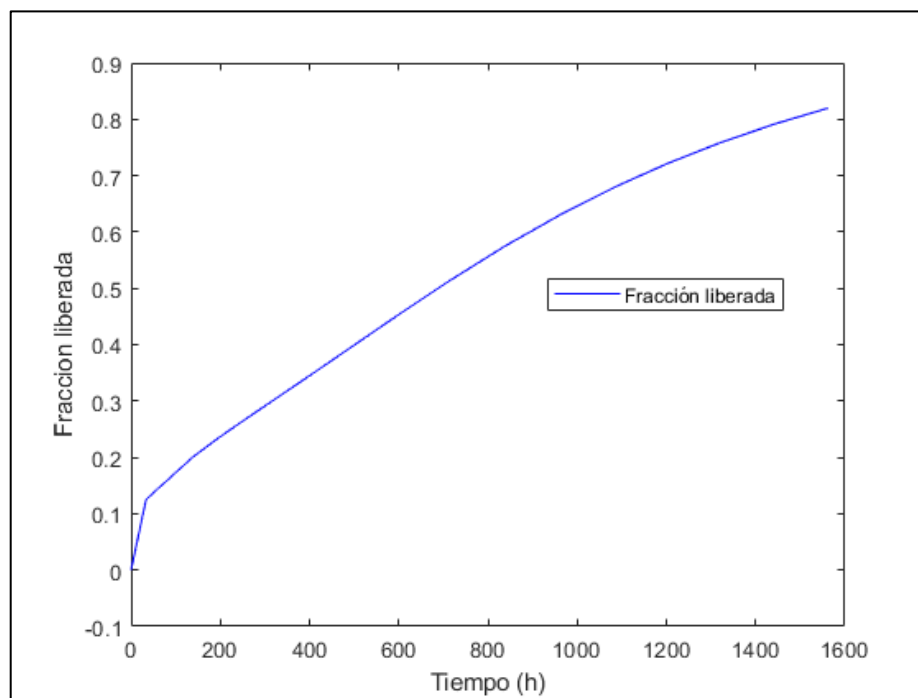
**Figura 28**

*Perfil de concentración de nitrógeno-nitrato de liberación sigmoïdal*



**Figura 29**

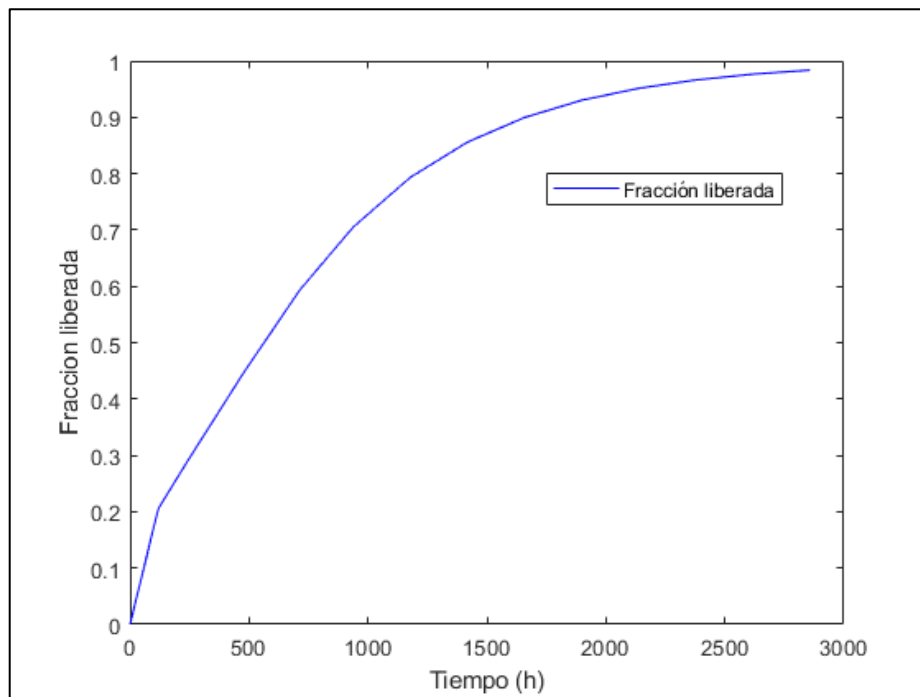
*Perfil de liberación de nitrógeno-urea*





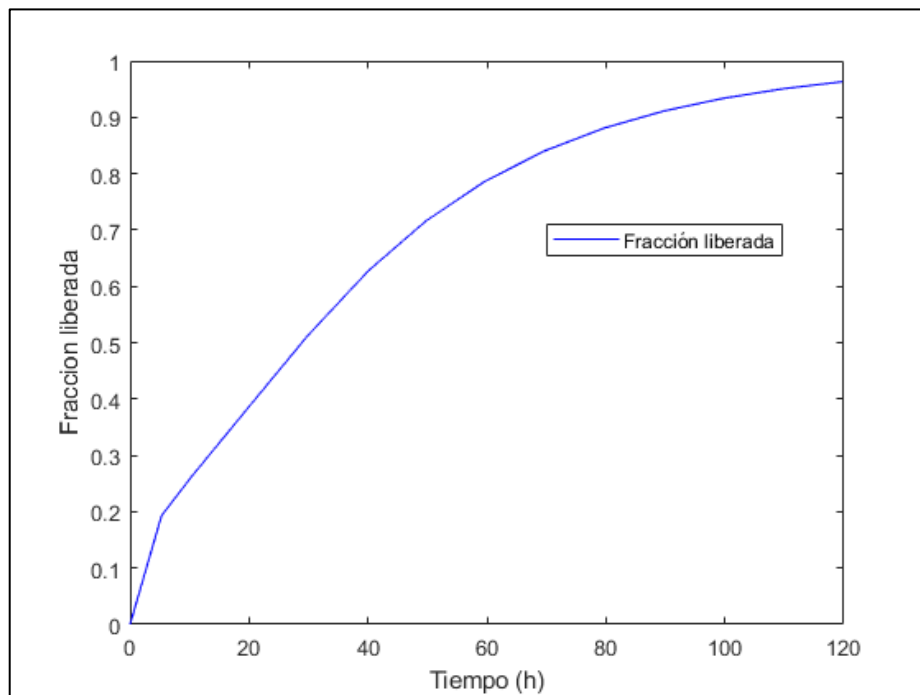
**Figura 30**

*Perfil de liberación de nitrógeno-nitrato parabólica*



**Figura 31**

*Perfil de liberación de nitrógeno-nitrato sigmoïdal*



## Fósforo

Para una condición específica de nutrientes en la difusión de fósforo se tiene los siguientes parámetros que se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5**

*Parámetros de simulación para fósforo-fosfato*

<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Descripción</b>
$D_p$	$1.80 \times 10^{-13}$	(m <sup>2</sup> /s) coeficiente de difusión de fosforo-fosfato
$C_{p0}$	0.02	(mg/kg) concentración inicial
$v$	0.1	(m/s) velocidad del agua
$\mu$	$1.15 \times 10^{-6}$	(m <sup>2</sup> /s) viscosidad del agua a T=20 °C
$R$	0.0001	(m) radio de la partícula
$V_p$	$4.1888 \times 10^{-12}$	Volumen de la partícula
$A_p$	$1.2566 \times 10^{-7}$	Área de superficie de la partícula
$Sc$	$6.3889 \times 10^6$	Número de Schmidt
$Re$	2.8986	Número de Reynolds
$Sh$	181.9004	Número de Sherwood
$K_m$	$9.8226 \times 10^{-7}$	Coefficiente de transferencia de masa

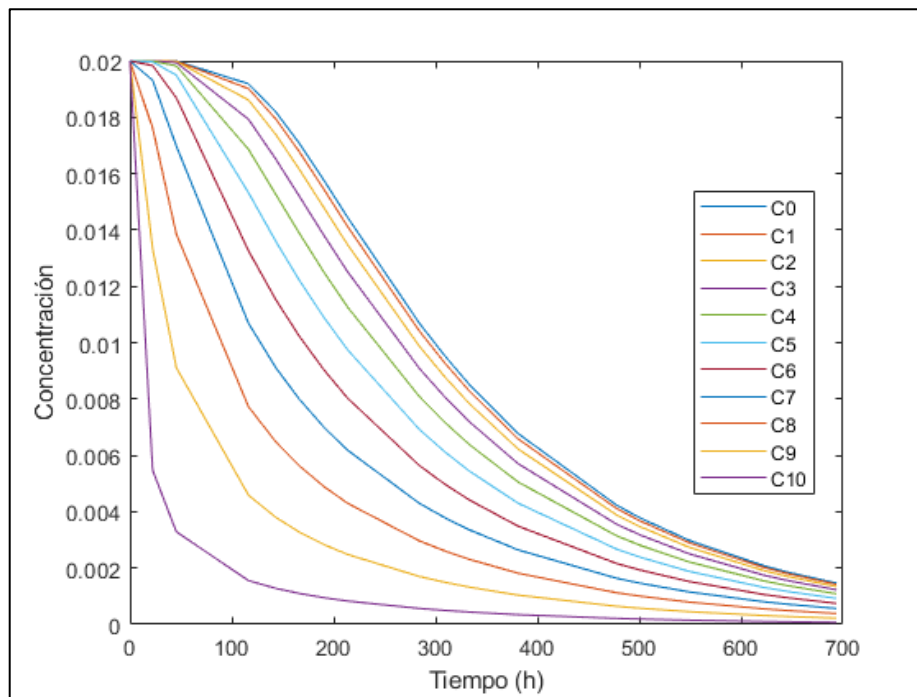
Los resultados de la simulación se muestran en la Figura 32 y Figura 33, la disminución de la concentración de fosforo-fosfato dentro de la partícula desde la posición central en C0 ( $r = 0$ ) hasta el contorno en C10 ( $r = R$ ) a través del tiempo.

En la Figura 34 y

Figura **35** se muestran los perfiles de la fracción liberada de fosforo-fosfato contenida en la partícula a través del tiempo.

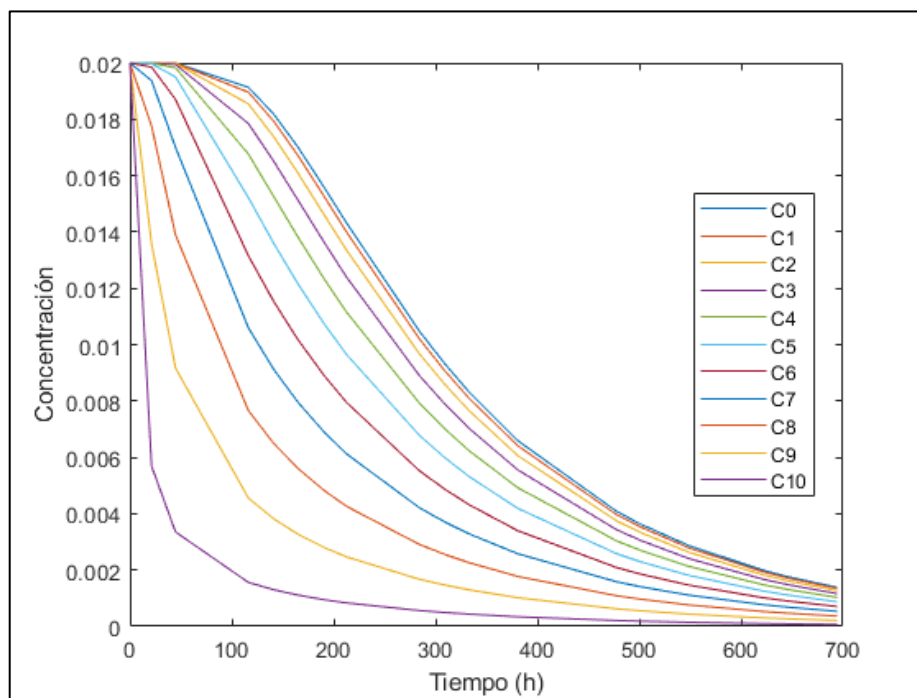
**Figura 32**

*Perfil de concentración de fósforo-fosfato monoamónico*



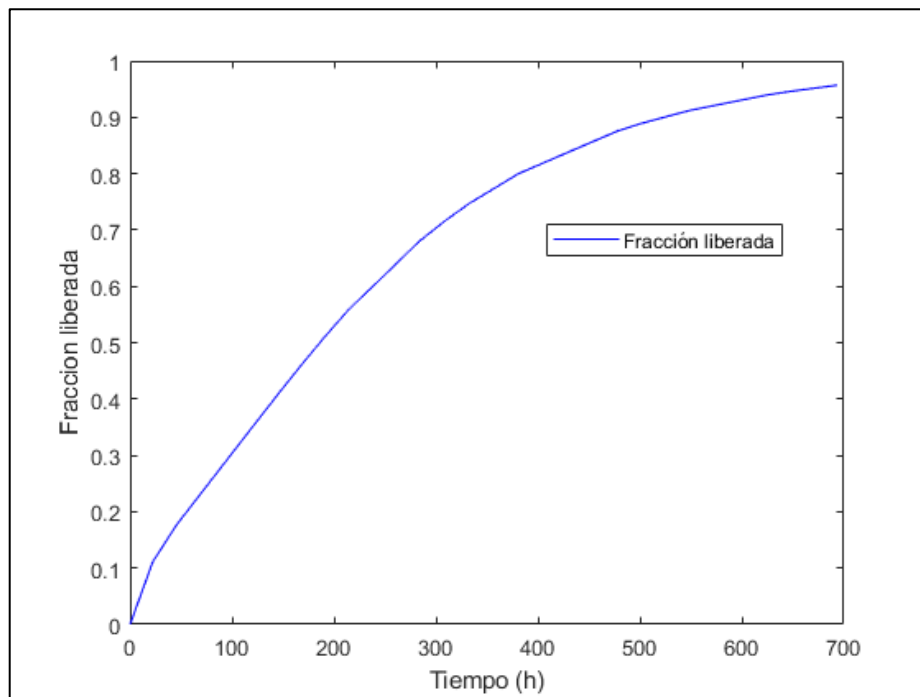
**Figura 33**

*Perfil de concentración de fósforo-fosfato diamónico tetrahidratado*



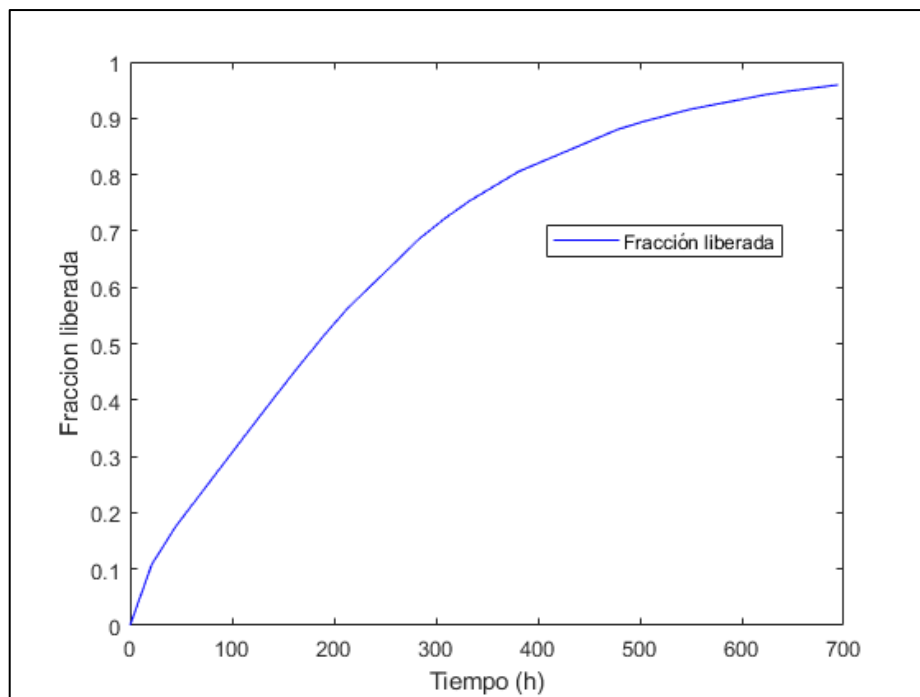
**Figura 34**

*Perfil de liberación de fósforo-fosfato monoamónico*



**Figura 35**

*Perfil de liberación de fósforo-fosfato diamónico tetrahidratado*



## 5.2. Resultados inferenciales

En la simulación del modelo fue necesario introducir el valor del coeficiente de difusión efectiva  $D_{eff}$ , el cual fue estimado mediante ensayo y error hasta lograr una adecuada correlación entre los resultados de la simulación y los datos experimentales tomados de investigaciones precedentes.

A continuación, se presenta el coeficiente de difusión efectiva obtenido con el cual el sistema simulado muestra la mejor concordancia frente a los datos experimentales.

### Potasio

Para la liberación de potasio se obtuvo el coeficiente de difusión efectiva  $D_{eff}$  que se muestra en la Tabla 6 con el cual el sistema simulado muestra la mejor concordancia frente a los datos experimentales.

**Tabla 6**

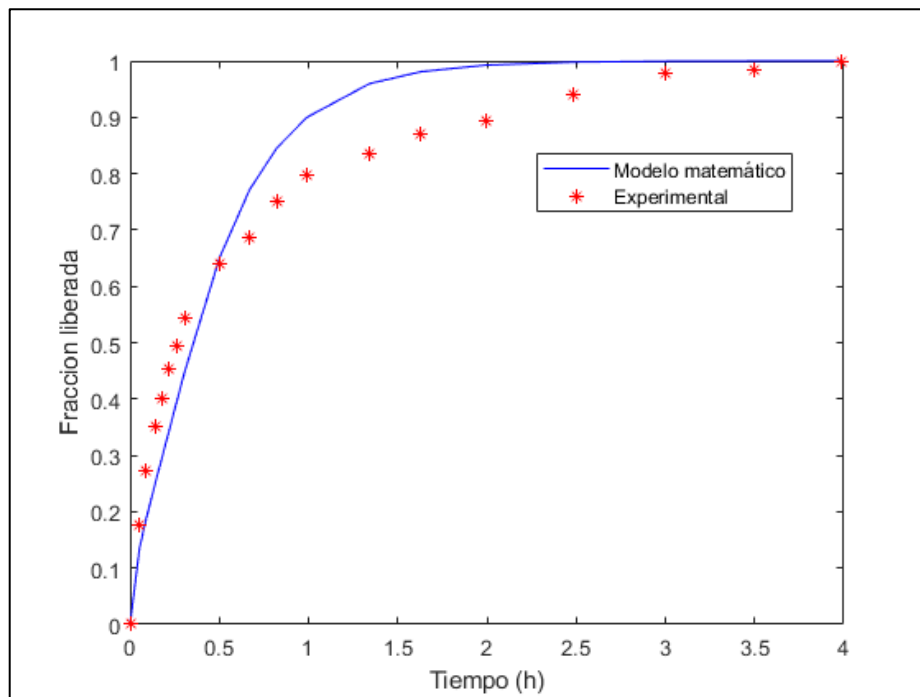
*Coefficientes de difusión efectiva para potasio*

<b>Especificación</b>	<b>Coefficiente de difusión efectiva (<math>m^2/s</math>)</b>
Tableta 6 x2 mm	$D_{eff}= 3.0 \times 10^{-09}$
Tableta 9 x3 mm	$D_{eff}= 1.4 \times 10^{-09}$
Tableta 12 x4 mm	$D_{eff}= 9.3 \times 10^{-10}$
Tableta 15 x5 mm	$D_{eff}= 7.2 \times 10^{-10}$

En la Figura 36, Figura 37, Figura 38 y Figura 39 se muestran los perfiles de liberación de potasio frente a los datos experimentales recogidos de la literatura.

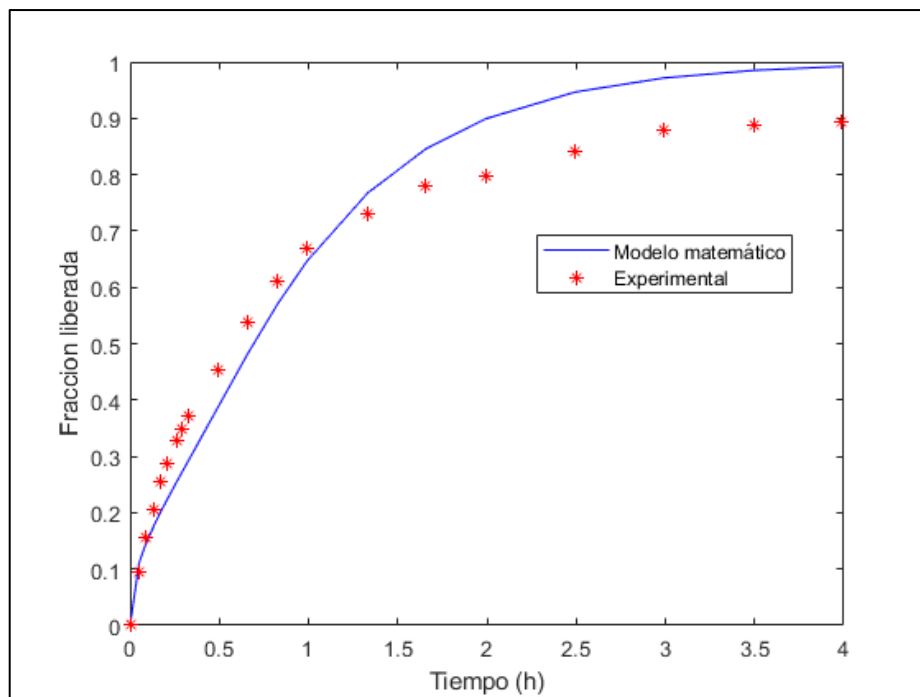
**Figura 36**

*Perfil de liberación de potasio en tableta 6 x 2 mm*



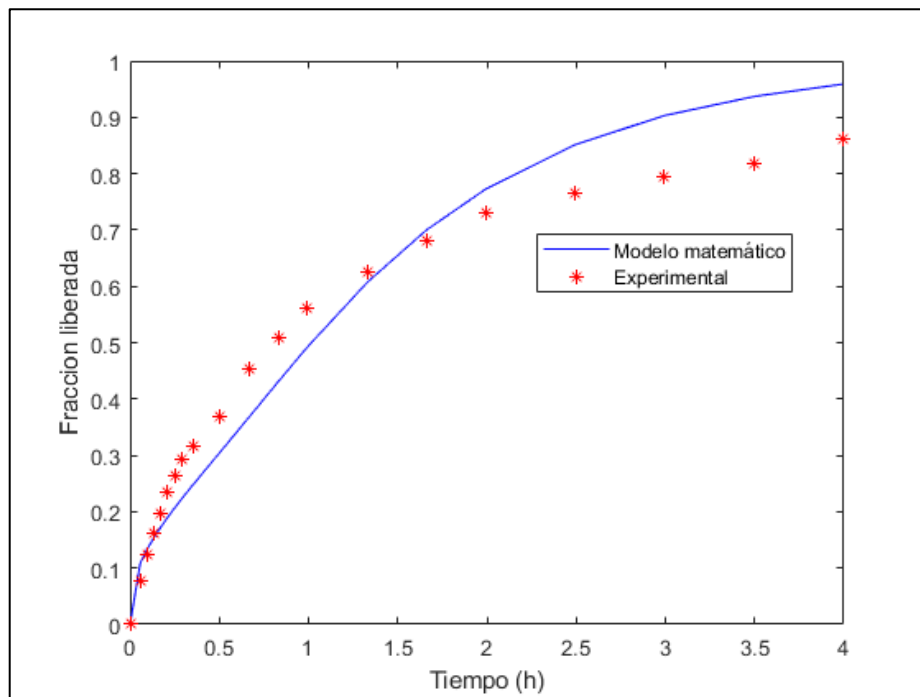
**Figura 37**

*Perfil de liberación de potasio en tableta 9 x 3 mm*



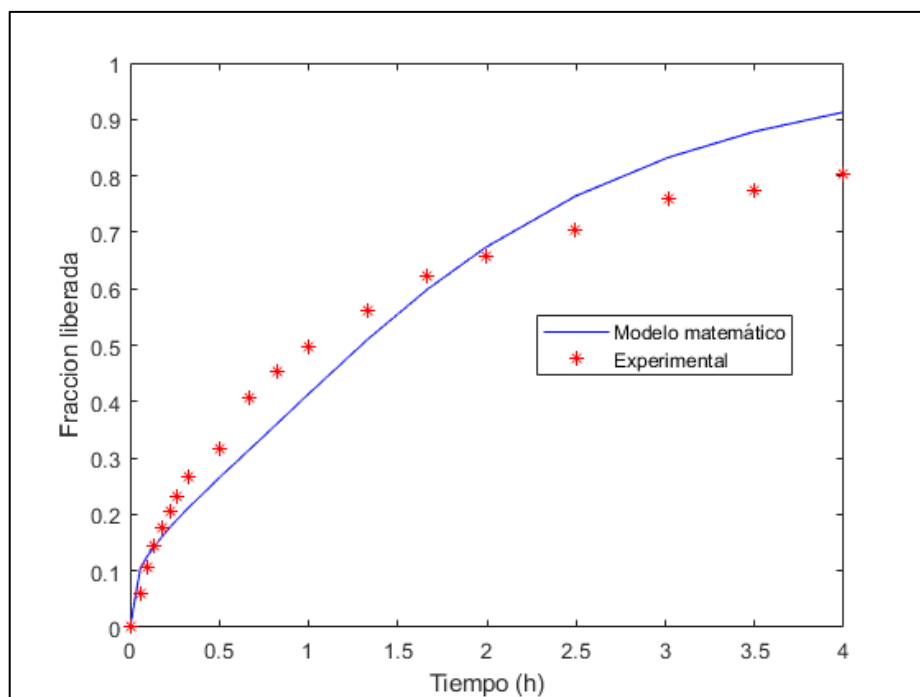
**Figura 38**

*Perfil de liberación de potasio en tableta 12 x 4 mm*



**Figura 39**

*Perfil de liberación de potasio en tableta 15 x 5 mm*



## Nitrógeno

Para la liberación de nitrógeno se obtuvo el coeficiente de difusión efectiva  $D_{eff}$  que se muestra en la Tabla 7 con el cual el sistema simulado muestra la mejor concordancia frente a los datos experimentales.

**Tabla 7**

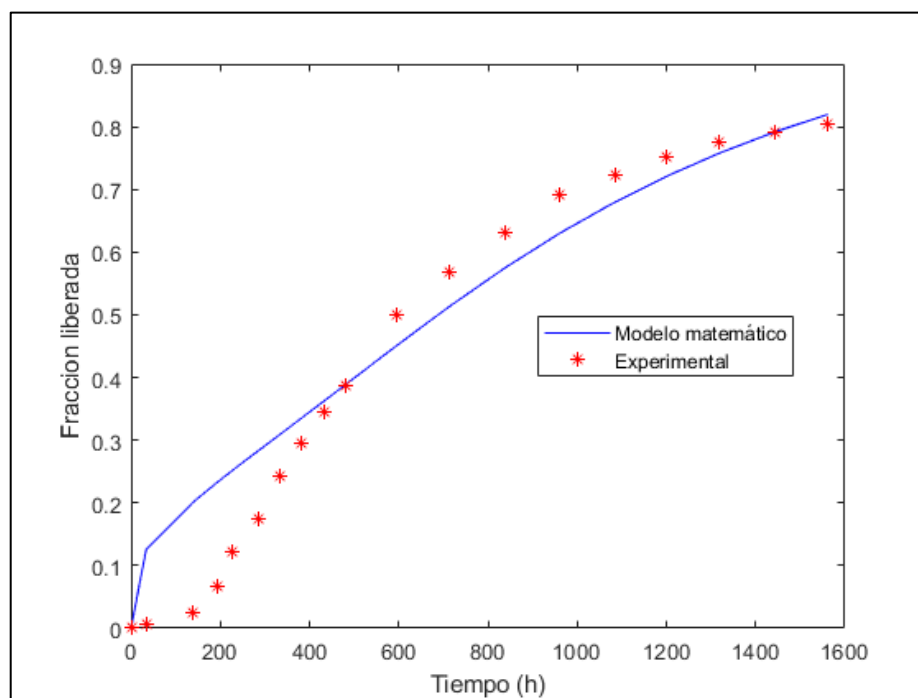
*Coeficientes de difusión efectiva para nitrógeno*

<b>Especificación</b>	<b>Coeficiente de difusión efectiva (<math>m^2/s</math>)</b>
Nitrógeno urea	$D_{eff}= 1.3 \times 10^{-12}$
Nitrógeno nitrato parabólico	$D_{eff}= 1.3 \times 10^{-11}$
Nitrógeno nitrato sigmoideal	$D_{eff}= 3.1 \times 10^{-11}$

En la Figura 40, Figura 41 y Figura 42 se muestran los perfiles de liberación de nitrógeno frente a los datos experimentales recogidos de la literatura.

**Figura 40**

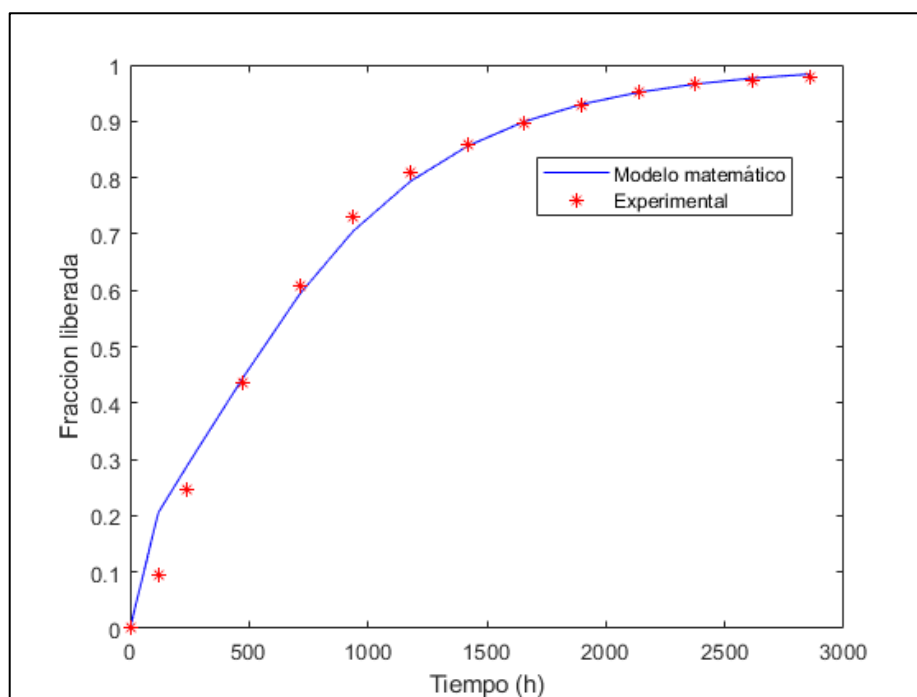
*Perfil de liberación de nitrógeno urea*





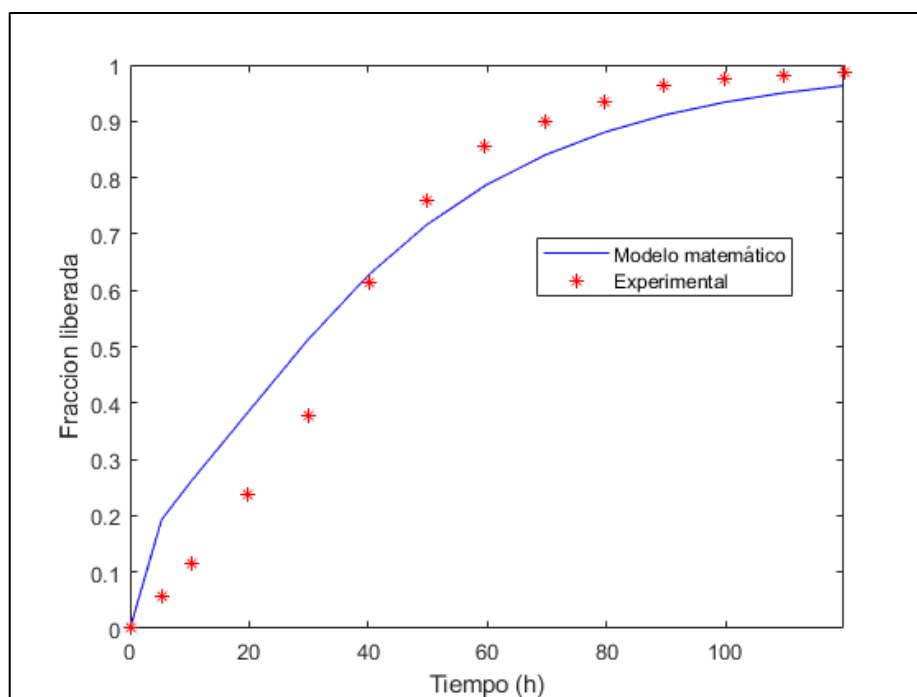
**Figura 41**

*Perfil de liberación de nitrógeno-nitrato parabólico*



**Figura 42**

*Perfil de liberación de nitrógeno-nitrato sigmoideal*



## Fósforo

Para la liberación de fósforo se obtuvo el coeficiente de difusión efectiva  $D_{eff}$  que se muestra en la Tabla 8, con el cual el sistema simulado muestra la mejor concordancia frente a los datos experimentales.

**Tabla 8**

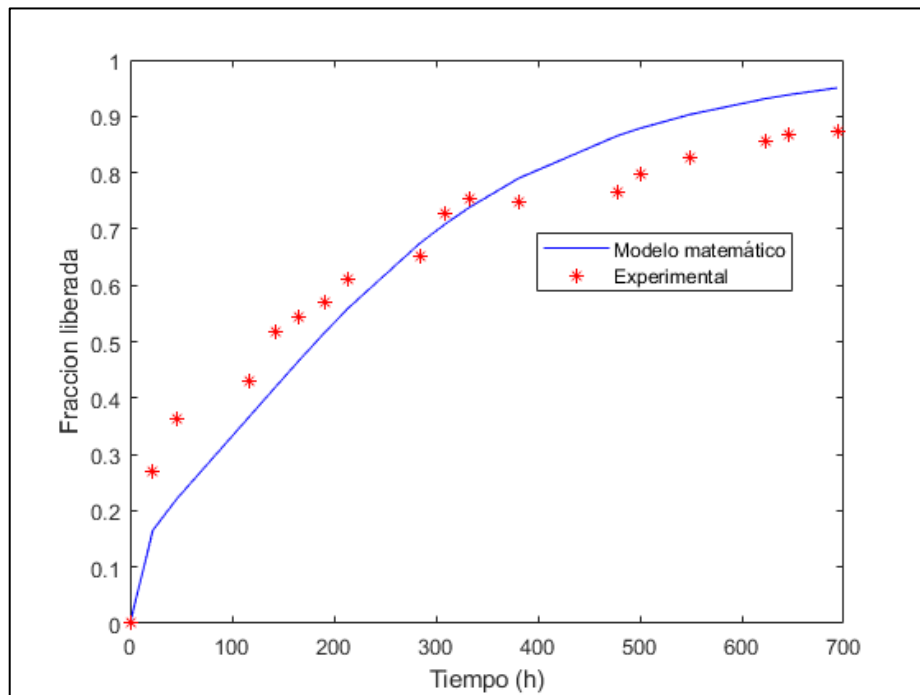
*Coeficientes de difusión efectiva para fósforo*

<b>Especificación</b>	<b>Coeficiente de difusión efectiva (<math>m^2/s</math>)</b>
Fósforo fosfato monoamónico	$D_{eff} = 5.8 \times 10^{-12}$
Fosforo fosfato diamónico tetrahidratado	$D_{eff} = 5.9 \times 10^{-12}$

En las Figura 43 y Figura 44 se muestran los perfiles de liberación de nitrógeno frente a los datos experimentales recogidos de la literatura.

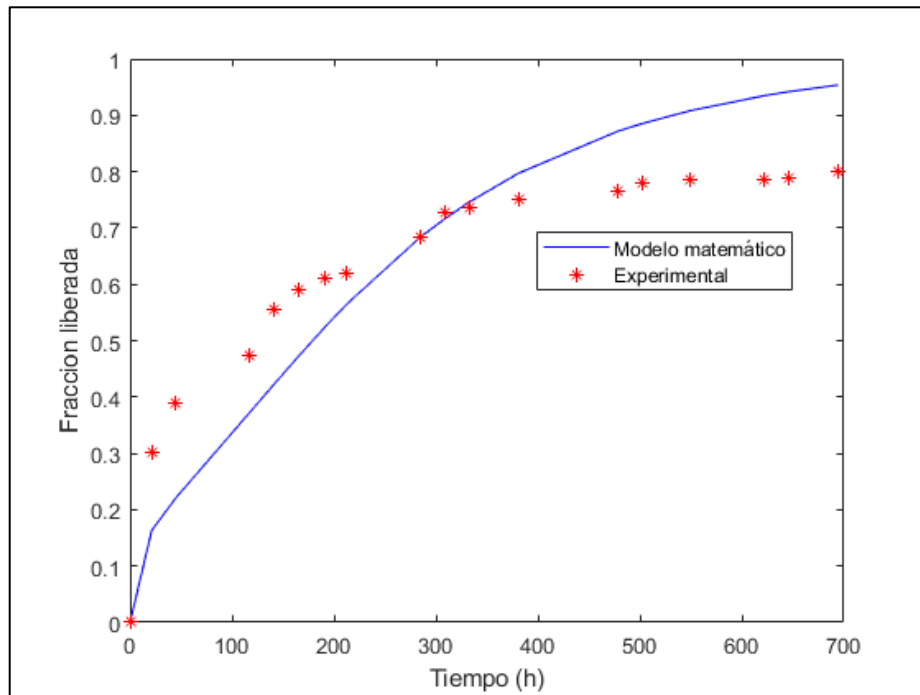
**Figura 43**

*Perfil de liberación de fósforo monoamónico*



**Figura 44**

*Perfil de liberación de fósforo diamónico tetrahidratado*



### 5.3. Otro tipo de resultados estadísticos

Se utilizó el estadístico de contraste error cuadrado medio (*MSE*) que se muestra en la ecuación (34) , como un indicador en la búsqueda de la mejor correlación entre los datos experimentales tomados de investigaciones precedentes y los resultados de la simulación.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{icalc})^2}{n} \quad (34)$$

En la

Tabla 9 se muestran los valores del error cuadrado medio obtenidos para cada simulación:

**Tabla 9**

*Valores del error cuadrado media para cada simulación*

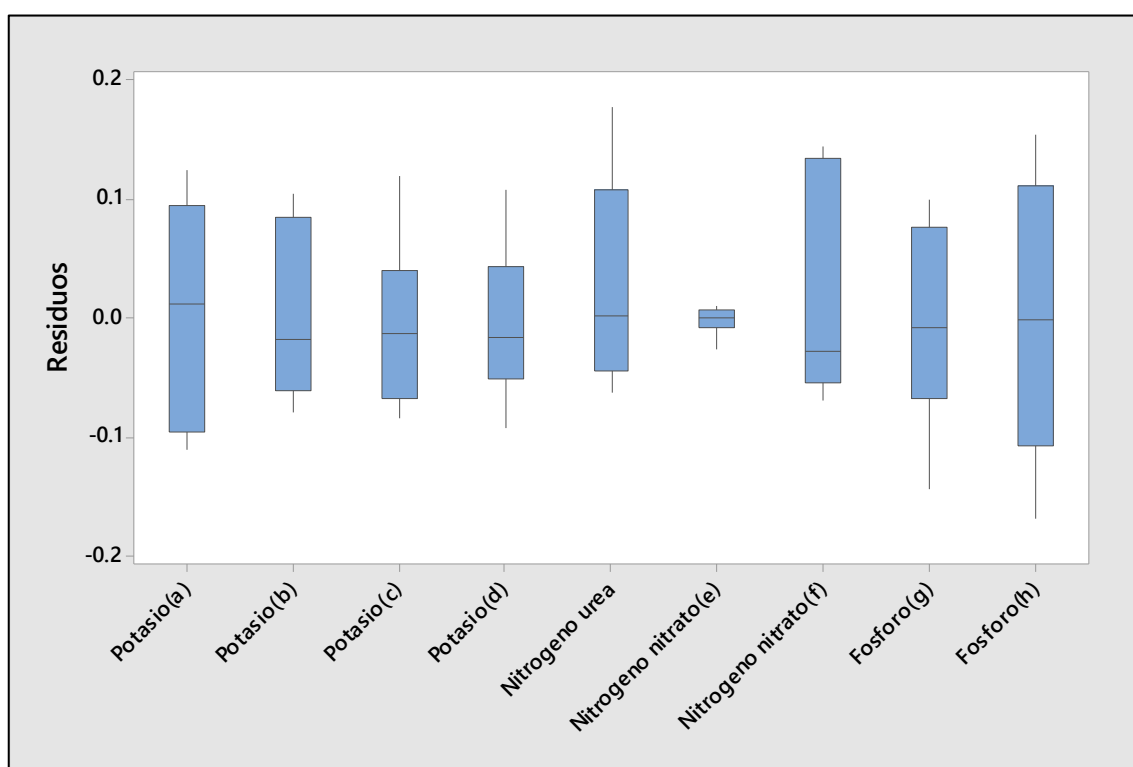
<b>Especificación</b>	<b>Error cuadrado medio</b>
Potasio en tableta 6 x2 mm	MSE= 0.1291
Potasio en tableta 9 x3 mm	MSE= 0.0899
Potasio en tableta 12 x4 mm	MSE= 0.0833

Potasio en tableta 15 x5 mm	MSE= 0.0697
Nitrógeno urea	MSE= 0.1241
Nitrógeno nitrato parabólico	MSE= 0.0125
Nitrógeno nitrato sigmoidal	MSE= 0.0980
Fósforo fosfato monoamónico	MSE= 0.2023
Fosforo fosfato diamónico tetrahidratado	MSE= 0.3383

En la Figura 45 se muestra la gráfica de cajas elaborada a partir de los residuos del ajuste de la simulación para cada uno de los compuestos de liberación.

### Figura 45

*Gráfica de cajas de los residuos de la simulación*



Nota: (a) tableta 6 x 2 mm, (b) tableta 9 x 3 mm, (c) tableta 12 x 4 mm, (d) tableta 15 x 5 mm, (e) parabólico, (f) sigmoidal, (g) monoamónico, (h) diamónico tetrahidratado.

## VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

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

Para el contraste de la hipótesis general se utilizó la ecuación general de conservación de materia (35), la cual fue simplificada para representar al sistema de liberación controlada obteniéndose la ecuación (36).

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_A}{\partial t} + \left( V_r \frac{\partial C_A}{\partial r} + V_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial C_A}{\partial \theta} + V_\varphi \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial C_A}{\partial \varphi} \right) \\ = D_{AB} \left( \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial C_A}{\partial \theta} \right) \right. \\ \left. + \frac{1}{r^2 \sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 C_A}{\partial \varphi^2} \right) + R_A \end{aligned} \quad (35)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eff} \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{dC}{dr} \right) \quad (36)$$

Donde  $D_{eff}$  representa el coeficiente de difusión efectiva, para el sistema de liberación controlada,  $C$  representa la concentración de los nutrientes dentro de la partícula,  $r$  el radio de la partícula y  $t$  el tiempo de liberación. Las condiciones de frontera fueron:

$$t = 0, \quad C = C_{ini}, \quad \forall r > 0$$

$$r = 0, \quad \frac{dC}{dr} = 0, \quad \forall t > 0$$

$$r = R, \quad -D_{eff} \frac{dC}{dr} = K_m(C - C_\infty), \quad \forall t > 0$$

La estimación del coeficiente global de transferencia de masa entre la partícula y el hidrogel ( $K_m$ ), se realizó con las ecuaciones empíricas (37), (38) y (39) propuesta por (Zhang et al., 2018) con los números adimensionales de Sherwood ( $Sh$ ), Schmidt ( $Sc$ ), y Reynolds ( $Re$ ).

$$Sh = K_m(V_p/A_p)/D_p = 2.0 + 0.6Re^{0.5}Sc^{0.33} \quad (37)$$

$$Re = v(V_p/A_p)/\nu \quad (38)$$

$$Sc = v/D \quad (39)$$

Los datos para la simulación de los nutrientes nitrógeno, fósforo y potasio fueron tomados de la literatura, los cuales se muestran en la Tabla 10:

**Tabla 10**

*Datos de simulación nitrógeno, fósforo y potasio*

<b>Símbolo</b>	<b>Nitrógeno</b>	<b>Fósforo</b>	<b>Potasio</b>	<b>Descripción</b>
$D_i$	$1.32 \times 10^{-08}$	$1.80 \times 10^{-13}$	$5.80 \times 10^{-11}$	(m <sup>2</sup> /s) coeficiente de difusión
$C_0$	$2.35 \times 10^3$	0.02	$0.17 \times 10^6$	(mg/kg) concentración inicial

Para el contraste de las hipótesis específicas, el conocimiento del mecanismo de liberación controlada, que consiste en el transporte por difusión del nutriente desde el seno de la partícula hacia el hidrogel, fue corroborado con las investigaciones paralelas de los autores Alharbi et al. (2018), Huang et al. (2019), Irfan et al. (2018) y Zhang et al., (2018) los cuales utilizan modelos matemáticos para predecir la liberación controlada. En este sentido se contrastó los datos experimentales utilizados por los autores mencionados frente a los resultados de la simulación del modelo matemático propuesto en esta investigación.

En base a los estudios realizados por los autores Alharbi et al. (2018), Huang et al. (2019), Irfan et al. (2018) y Zhang et al. (2018) se ha considerado como factores influyentes a los parámetros fisicoquímicos tales como pH, conductividad y humedad; sin embargo, no se encontró más casos de estudios de liberación que involucren variaciones en el pH, la conductividad y la humedad. Por tanto, no se logró establecer una relación directa para medir su influencia debido a que los datos obtenidos de la literatura solamente consideran para la liberación del potasio a pH = 6, nitrógeno a pH = 5.78 y fósforo a pH = 5, a temperatura ambiente T=25°C.

Las curvas de concentración obtenidas por la simulación del modelo matemático frente a los datos experimentales referenciados de los autores Alharbi et al. (2018), Huang et al. (2019), Irfan et al. (2018) y Zhang et al. (2018), fue realizada

obteniendo el valor mínimo de MSE para cada uno de ellos, con lo cual , mediante la simulación se logró la estimación de los coeficientes de difusión efectiva que representa las características de cada situación experimental tratada por los autores de contraste. Haciendo uso del  $D_{eff}$  se logra reproducir las situaciones experimentales de los distintos autores.

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

Para el contraste de la investigación se utilizó el estadístico error cuadro medio ( $MSE$ ) para lograr el ajuste del modelo matemático a los datos experimentales de los autores referentes.

Zhang et al., (2018) propuso el estudio experimental de la liberación de potasio a partir de las cenizas de biomasa, en esta investigación contrastamos los datos de la investigación referida y se obtuvieron los perfiles de liberación que se muestran en la Figura 36, Figura 37, Figura 38 y Figura 39, que muestran un adecuado grado de ajuste con un valor de MSE entre 0.0697 hasta 0.1291, donde el mejor ajuste se logró para la liberación de potasio en tableta 15 x5 mm.

En el caso del autor Irfan et al., (2018), él realizó la investigación referido a la liberación controlada de nitrógeno ( $N-NO_3^-$ ) a partir de un fertilizante de liberación controlada (CRF's), el contraste puede visualizarse en la Figura 40, donde se refleja un ajuste de MSE de 0.1241.

Huang et al. (2019) propusieron el estudio de la liberación controlada de nitrógeno a partir de una partícula recubierta de urea para las plantaciones de arroz, el contraste se puede observar en la Figura 41 y Figura 42. Para este autor se consiguió el mejor grado de ajuste, el cual se refleja en el menor valor obtenido de MSE de 0.0125.

Alharbi et al. (2018) propusieron el estudio de la liberación controlada de fosforo a partir de dos tipos de monoésteres de fosfato de almidón, el monoamonio (MAP) y diamónico (DAP), el contraste se puede observar en la Figura 43 y Figura 44, donde se muestra el ajuste que oscila entre los valores de MSE de 0.2023 hasta 0.3383.

Del tratamiento de los datos experimentales frente al modelo matemático propuesto, se obtuvieron los siguientes resultados referidos a la contrastación en la Tabla 11:

**Tabla 11**

*Coefficientes de difusión efectiva obtenidos por simulación a partir de datos experimentales de los autores indicados*

<b><i>Autores indicados</i></b>	<b><i>Compuesto liberado</i></b>	<b><i>Dimensiones de la partícula</i></b>	<b><i>Coefficiente de difusión efectiva (m<sup>2</sup>/s)</i></b>	<b><i>Error cuadrado medio</i></b>
Zhang 2018	Potasio	Ø= 6 x2 mm	D <sub>eff</sub> = 3.0 x 10 <sup>-09</sup>	MSE= 0.1291
		Ø= 9 x3 mm	D <sub>eff</sub> = 1.4 x 10 <sup>-09</sup>	MSE= 0.0899
		Ø= 12 x4 mm	D <sub>eff</sub> = 9.3 x 10 <sup>-10</sup>	MSE= 0.0833
		Ø= 15 x5 mm	D <sub>eff</sub> = 7.2 x 10 <sup>-10</sup>	MSE= 0.0697
Irfan 2018	Nitrógeno urea	No indica	D <sub>eff</sub> = 1.3 x 10 <sup>-12</sup>	MSE= 0.1241
Huang 2019	Nitrógeno nitrato <sup>(a)</sup>	No indica	D <sub>eff</sub> = 1.3 x 10 <sup>-11</sup>	MSE= 0.0125
	Nitrógeno nitrato <sup>(b)</sup>	No indica	D <sub>eff</sub> = 3.1 x 10 <sup>-11</sup>	MSE= 0.0980
Alharbi 2018	Fósforo fosfato <sup>(c)</sup>	No indica	D <sub>eff</sub> = 5.8 x 10 <sup>-12</sup>	MSE= 0.2023
	Fosforo fosfato <sup>(d)</sup>	No indica	D <sub>eff</sub> = 5.9 x 10 <sup>-12</sup>	MSE= 0.3383

Nota: (a)liberación parabólica, (b)liberación sigmoidal, (c)monoamónico,(d)diamónico tetrahidratado.

El modelo matemático se ajusta adecuadamente a los datos experimentales del autor Huang 2019, en el caso de la liberación de nitrógeno nitrato parabólico, con un MSE = 0.0125, lo cual puede observarse en la Figura 41. Respecto de los demás autores, la correlación se logra con resultados aproximados a los valores reales de experimentación, en donde el modelo logra ajustarse con valores de MSE relativamente elevados.

### **6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes**

En concordancia con el código de ética de la Universidad Nacional del Callao (UNAC), doy fe de que los resultados presentados en este documento son verídicos y propios del desarrollo de la investigación.



## CONCLUSIONES

A partir de la ecuación de conservación de materia en coordenadas esféricas  $\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eff} \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{dC}{dr} \right)$  y las ecuaciones empíricas que relacionan los números adimensionales de Sherwood  $[Sh = K_m(V_p/A_p)/D_p = 2.0 + 0.6Re^{0.5}Sc^{0.33}]$ , Schmidt  $[Sc = \nu/D]$  y Reynolds  $[Re = v(V_p/A_p)/\nu]$ , se logró el modelo matemático que describe la liberación controlada de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula/ hidrogel de uso agrícola.

El modelo describe el mecanismo de liberación considerando partículas esféricas de fertilizantes que contienen nitrógeno, fosforo y potasio (N, P, K), de tamaños nanométricos, quienes logran atravesar la barrera que las recubre por difusión molecular, mientras que el agua retenida en el hidrogel ingresa al interior de la partícula. Los resultados indican un mejor ajuste para la liberación controlada de nitrógeno nitrato con un coeficiente de difusión efectiva  $D_{eff} = 1.3 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ , mientras que para potasio el coeficiente obtenido fue  $D_{eff} = 7.2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  y para el fósforo fue  $D_{eff} = 5.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

En base a los trabajos realizados por los autores Zhang, Huang, Irfan y Alharbi, se consideran como los factores influyentes en la liberación controlada a los factores fisicoquímicos tales como pH, conductividad y humedad; sin embargo, no se logró establecer una relación directa para medir la influencia de cada uno, debido a que los datos reportados en la literatura no consideran un estudio más profundo de dichos factores.

La validación del modelo matemático fue realizada partiendo de las curvas de concentración y tiempo para cada nutriente y comparadas con las obtenidas de la simulación de los datos experimentales de los autores Zhang, Huang, Irfan y Alharbi haciendo uso del estadístico error cuadrado medio (MSE), donde en la contrastación se obtuvo resultados satisfactorios con valores de MSE en el rango de [0.0125 - 0.1241] para el nutriente nitrógeno nitrato, mientras que para potasio el rango fue [0.0697 – 0.1291] y para el fósforo fue [0.2023 - 0.3383].

## RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar nuevos indicadores para el ajuste de los modelos matemáticos basados en la conservación de materia, a fin de lograr un nivel de correlación más alto.

El mecanismo de liberación controlada de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula / hidrogel de uso agrícola, contempla etapas de elevada complejidad. En este sentido, los modelos de conservación de materia pueden ser complementados y contrastados con correlaciones de *machine learning* donde se incluyan las mediciones de pH, conductividad y humedad, haciendo uso de datos en tiempo real para probar la efectividad de las predicciones del modelo de conservación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, L. G., Iwakura, D. C., Semeano, A. T. S., Li, R. W. C., Souza, E. F., Gruber, J., & Giudici, R. (2018). Controlled release of an optically active compound by hydrogels of acrylic acid and its online detection. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 96(5), 1221–1227. <https://doi.org/10.1002/cjce.23038>
- Alharbi, K., Ghoneim, A., Ebid, A., El-Hamshary, H., & El-Newehy, M. H. (2018). Controlled release of phosphorous fertilizer bound to carboxymethyl starch-g-polyacrylamide and maintaining a hydration level for the plant. *International Journal of Biological Macromolecules*, 116, 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.182>
- Arredondo Peñaranda, A., & Londoño López, M. E. (2009). Hidrogeles. Potenciales biomateriales para la liberación controlada de medicamentos. *Revista de Ingeniería Biomédica*, 3(5), 83–94.
- Cabrel Rengifo, S. D. P. (2018). *Influencia del pH en la liberación del factor de crecimiento derivado de plaquetas (PDGF-BB) a partir de un hidrogel a base de B-Quitosano* [Tesis de pregrado].
- Castañeda Tarrillo, C. J. (2018). *Recuperación aparente del nitrógeno en fertilizantes convencionales, liberación controlada y lenta usando cultivo indicador arroz (Oryza sativa L.) en invernadero* [Tesis de grado].
- Díaz Laupa, A. (2018). *Efecto de tres dosis de hidrogel (Poliacrilamida) en la producción del cultivo de papa (Solanum tuberosum) var. única en dos tipos, de suelo en el distrito de San Jerónimo-Andahuaylas Región Apurímac* [Tesis de pregrado].
- FAO. (2016). *World fertilizer trends and outlook to 2019*. [www.fao.org/publications](http://www.fao.org/publications)
- Gonzales Hernandez, O. (2007). *Hidrogeles Mejoradores de Cultivos Agrícolas* [Especialización en Química Aplicada]. Centro de Investigación en Química Aplicada.

- González Hurtado, M., Hernández Díaz, M., Dupeyrón Martell, D., Rieumont Briones, J., Rodríguez Acosta, C., Cuesta, E., & Sardiña, C. (2007). Síntesis y comportamiento de un material polimérico aplicado como recubrimiento en un fertilizante de liberación controlada. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 8(4).
- Granados Orosco, D. (2013). *Implementación de hidrogel bajo sistema de agricultura de conservación en parcelas de temporal en el ejido Ignacio Zaragoza*.
- Guaya, D., Valderrama, C., Farran, A., Sauras, T., & Cortina, J. L. (2018). Valorisation of N and P from waste water by using natural reactive hybrid sorbents: Nutrients (N,P,K) release evaluation in amended soils by dynamic experiments. *Science of the Total Environment*, 612, 728–738. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.248>
- Hidrogel: Ahorro de agua*. (2020). [www.hidrogel.es](http://www.hidrogel.es)
- Huang, Q., Fan, X., Tang, S., Zhang, M., Huang, X., Yi, Q., Pang, Y., & Huang, J. (2019). Seasonal differences in N release dynamic of controlled-released urea in paddy field and its impact on the growth of rice under double rice cropping system. *Soil and Tillage Research*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104371>
- Irfan, S. A., Razali, R., KuShaari, K. Z., Mansor, N., Azeem, B., & Ford Versypt, A. N. (2018). A review of mathematical modeling and simulation of controlled-release fertilizers. In *Journal of Controlled Release* (Vol. 271, pp. 45–54). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2017.12.017>
- Jiménez Gutiérrez, A. (2003). *Diseño de procesos en ingeniería química*. Editorial Reverté S.A.
- Katime, I. A., Katime, O., & Katime, D. (2005). Materiales Inteligentes: Hidrogeles macromoleculares. Algunas aplicaciones biomédicas. *Anales de La Real Sociedad Española de Química*.
- Lin, C. C., & Metters, A. T. (2006). Hydrogels in controlled release formulations:

- Network design and mathematical modeling. In *Advanced Drug Delivery Reviews* (Vol. 58, Issues 12–13, pp. 1379–1408). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2006.09.004>
- Liu, C.-H., Wu, J.-Y., & Chang, J.-S. (2008). Diffusion characteristics and controlled release of bacterial fertilizers from modified calcium alginate capsules. *Bioresource Technology*, 99(6), 1904–1910. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.03.029>
- Mansi P., B., Sandesh V., J., & Arun V., G. (2017). Copper Nanoparticles using Onion (*Allium cepa*) Extract and their Application in Plant Growth. *International Journal of Life Sciences*, 5(4), 661–666.
- Medina M., M. E., Galván R., L. E., & Reyes G., R. E. (2015). Las nanopartículas y el medio ambiente. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 19(74), 47–56.
- Murru, C. (2017). *Nanopartículas de proteína de soja: preparación, caracterización y aplicación a la encapsulación de  $\beta$ -caroteno* [Tesis de maestría].
- Pinzón, N., Espinosa, A., Perilla, J., Hernáez, E., & Katime, I. (2002). Modelamiento del hinchamiento y difusión de solutos en hidrogeles. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 3(2).
- Raymundi, V. C., Aguiar, L. G., Souza, E. F., Sato, A. C., & Giudici, R. (2016). Controlled release of insulin through hydrogels of (acrylic acid)/trimethylolpropane triacrylate. *Heat and Mass Transfer*, 52(10), 2193–2201. <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1732-y>
- Rengifo Maravi, J. C. (2018). *Síntesis de hidrogeles interpenetrados sensibles al pH y a la temperatura basados en N-isopropilacrilamida y 2-Oxazolinas* [Tesis de maestría].
- Rocha Salvarrieta, P. J. (2015). Nano-Biotecnología y sus potenciales en agricultura. *Nanotecnología: Fundamentos y Aplicaciones*, 223–244.
- Santillán Espinoza, F. A. (2019). *Síntesis de nuevos hidrogeles pH- y termo-sensitivos a base de N,N-dimetilacrilamida, N isopropilacrilamida y*

*macromonomero de 2- oxazolína* [Tesis de maestría].

- Shaviv, A., Raban, S., & Zaidel, E. (2003). Modeling controlled nutrient release from polymer coated fertilizers: Diffusion release from single granules. *Environmental Science and Technology*, 37(10), 2251–2256. <https://doi.org/10.1021/es011462v>
- Trinh, T. H., Kushaari, K., Shuib, A. S., Ismail, L., & Azeem, B. (2015). Modelling the release of nitrogen from controlled release fertiliser: Constant and decay release. *Biosystems Engineering*, 130, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.12.004>
- Urquía Moraleda, A., & Martín Villalba, C. (2016). *Métodos de simulación y modelado*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Wu, N., Wang, L. S., Tan, D. C. W., Moochhala, S. M., & Yang, Y. Y. (2005). Mathematical modeling and in vitro study of controlled drug release via a highly swellable and dissoluble polymer matrix: Polyethylene oxide with high molecular weights. *Journal of Controlled Release*, 102(3), 569–581. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2004.11.002>
- Zhang, Z., He, F., Zhang, Y., Yu, R., Li, Y., Zheng, Z., & Gao, Z. (2018). Experiments and modelling of potassium release behavior from tablet biomass ash for better recycling of ash as eco-friendly fertilizer. *Journal of Cleaner Production*, 170, 379–387. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.150>

## **ANEXOS**

# ANEXO 1

## MATRIZ DE CONSISTENCIA

**Título: MODELAMIENTO DE LA LIBERACIÓN CONTROLADA DE NUTRIENTES ENCAPSULADOS POR NANOPARTICULAS EN HIDROGELES DE USO AGRÍCOLA**

Problemas	Objetivos	Hipótesis	VARIABLES	Dimensiones	Indicadores	Método
<p><b>Problema general</b></p> <p>¿Cómo se debe realizar el modelado matemático de la liberación controlada de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola?</p>	<p><b>Objetivo general</b></p> <p>Obtener el modelo matemático que describa la liberación controlada de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola a partir de las ecuaciones de conservación de masa, difusividad y las dimensiones de la partícula.</p>	<p><b>Hipótesis general</b></p> <p>La ecuación de conservación de materia y el conocimiento de los parámetros como la difusividad efectiva, radio de la partícula, así como la concentración inicial del micronutriente permite el desarrollo del modelado matemático de la liberación controlada de los nutrientes nitrógeno-fósforo-potasio (N-P-K) encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola.</p>	<p><b>VARIABLE DEPENDIENTE</b></p> <p>Y= Modelado de la liberación controlada</p>	<p>Modelo matemático que describe el proceso de liberación controlada</p>	<p>Perfil de concentración de nutrientes en el sistema nanopartícula/hidrogel</p>	<p>Formulación y programación de modelos matemáticos en el software Polymath®</p>
<p><b>Problemas específicos</b></p> <p>a. ¿Cómo es el mecanismo de liberación controlada de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola?</p> <p>b. ¿Cuáles son los factores influyentes en la liberación controlada de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola?</p> <p>c. ¿Cómo debe validarse el modelo matemático propuesto?</p>	<p><b>Objetivos específicos</b></p> <p>a. Describir el mecanismo de liberación controlada de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola utilizando las ecuaciones básicas de conservación de materia y difusividad.</p> <p>b. Identificar los factores fisicoquímicos influyentes en la liberación controlada de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola.</p> <p>c. Validar el modelo matemático propuesto con datos obtenidos de la literatura mediante el cálculo estadístico del error y varianzas</p>	<p><b>Hipótesis específicas</b></p> <p>a. El conocimiento de la ecuación de conservación de materia y de los parámetros como la difusividad efectiva, radio de partícula y la concentración inicial del sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola, permite la descripción del mecanismo de la liberación controlada de nutrientes encapsulados.</p> <p>b. Los factores fisicoquímicos influyentes, tales como: pH [7-8], conductividad eléctrica [700-1000] <math>\mu\text{S}/\text{cm}</math> y humedad [90-100]%, condicionan la transferencia efectiva de liberación controlada de nutrientes encapsulados N-P-K en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola.</p> <p>c. Los perfiles de concentración del modelo matemático propuesto son concordantes con los datos experimentales reportados de la literatura; por tanto, permiten la validación de dicho modelo al estar en concordancia estadística con los datos experimentales</p>	<p><b>VARIABLES INDEPENDIENTES</b></p> <p>X1= Mecanismo de liberación controlada de nutrientes encapsulados en el sistema nanopartícula/hidrogel de uso agrícola</p> <p>X2= Factores influyentes en la liberación controlada de nutrientes</p> <p>X3= Validación del modelo matemático propuesto</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nutriente</li> <li>Nanopartícula</li> <li>Hidrogel</li> <li>Mecanismos de transferencia de masa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>[N]-[P]-[K]</li> <li>nm</li> <li>g/g</li> <li>Variación de concentración en el sistema en función al tiempo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Contrastación con datos de referencias bibliográficas.</li> </ul>



## ANEXO 2

### INSTRUMENTOS VALIDADOS - PROGRAMACIÓN EN MATLAB

```
% Algoritmo de simulación del modelo matemático
Este programa resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias

time=cat(2,0:1:800);           %t en horas, de 0 a 800 en intervalos de 1
D=1.9*1E-10;                  % (m2/s) coef. de difusión K en agua ,N, P
V=0.1;                        % (m/s) velocidad del agua
U=1.15*10^-6;                 % (m2/s) viscosidad del agua (a T=20 oC)
R=0.0001;                     % (m) radio de la partícula
C0=0.17;                      % (Kg/Kg) conc. inicial - saturación T=20oC
VP=4/3*pi*R^3;                % volumen de la partícula
AP=4*pi*R^2;                  % área de superficie de la partícula
SC=U/D;                       % número de Schmidt
RE=V*(VP/AP)/U;               % número de Reynolds
SH=2+0.6*RE^0.5*SC^0.33;      % número de Sherwood
Hm=SH*D/(VP/AP);              % coeficiente de transferencia de masa

                                % condicion inicial
y0=C0.*[1.; 1.; 1.; 1.; 1.; 1.; 1.; 1.; 1.; 1.];
dR=R/10;
Deff=0.9*1e-11;               % coeficiente de difusión efectiva
[t,y]=ode15s(@(t,y) ode_funDE(t,y,Deff,Hm,dR),time,y0);
plot(t,y)                      % perfil de concentraciones
xlabel('Tiempo (h)')
ylabel('Concentración')
figure

k=length(time);
sol1=ones(k,1);
for j=1:k
    sol1(j)=mean(y(j,:));
end
YCALC1=(C0-sol1)./C0;
plot(time,YCALC1)
%la solución aceptada es y10
legend('Fracción liberada','location','best')
xlabel('Tiempo (h)')
ylabel('Fraccion liberada')
```

## ALGORITMO DE AJUSTE

% En este programa se realiza el ajuste de la simulación a los datos experimentales, obteniendo como resultado los perfiles de liberación y el coeficiente de difusión efectiva Deff cuando se encuentra el menor valor para el estadístico MSE

```
TARGET=zhang2017a;           %variable en forma XY en el espacio de tr
time=TARGET(:,1)';          % tiempo (h)
Mt=TARGET(:,2)';           % fraccion liberada M/Minf(t)
D=1.9*1E-9;                % (m2/s) coef. de difusión del ion K en agua
,N, P
V=0.1;                     % (m/s) velocidad del agua
U=1.15*10^-6;              % (m2/s) viscosidad del agua (a T=20 oC)
R=0.0001;                  % (m) radio de la partícula
C0=0.17;                   % (Kg/Kg) conc. inicial - saturación T=20oC
VP=4/3*pi*R^3;             % volumen de la partícula
AP=4*pi*R^2;               % area de superficie de la partícula
SC=U/D;                    % número de Schmidt
RE=V*(VP/AP)/U;           % número de Reynolds
SH=2+0.6*RE^0.5*SC^0.33;   % numero de Sherwood
Hm=SH*D/(VP/AP);          % coeficiente de transferencia de masa

value=1:0.1:9.9;
[~,n]=size(value);
xvalue=[1E-9, 1E-10, 1E-11, 1E-12, 1E-13, 1E-14, 1E-15, 1E-16, 1E-17, 1E-18];
[~,xn]=size(xvalue);
y0=C0.*[1.; 1.; 1.; 1.; 1.; 1.; 1.; 1.; 1.; 1.];
dR=R/10;
ZZ=ones(900,4);

for p=1:xn
    for q=1:n
        Deff=value(q)*xvalue(p);           % coeficiente de difusion
efectiva
        [t,y]=ode15s(@(t,y) ode_funDE(t,y,Deff,Hm,dR),time,y0);
        domR=0:dR:R;
        k=length(Mt);
        sol1=y(:,end);
        sol2=ones(k,1);
        sol3=ones(k,1);
        for j=1:k
            sol2(j)=mean(y(j,:));
            sol3(j)=1/R*trapz(domR,y(j,:));
        end
        YCALC1=(C0-sol1)./C0;
        YCALC2=(C0-sol2)./C0;
        YCALC3=(C0-sol3)./C0;
        SS2=sum((YCALC2-Mt').^2);
        SS3=sum((YCALC3-Mt').^2);
```

```

        ZZ((p-1)*90+q,1)=(p-1)*90+q;
        ZZ((p-1)*90+q,2)=Deff;
        ZZ((p-1)*90+q,3)=SS2;
        ZZ((p-1)*90+q,4)=SS3;
    end

end

SS2opt=min(ZZ(1:end,3))
SS3opt=min(ZZ(1:end,4))
opt2=find(ZZ(1:end,3)==SS2opt,1)
opt3=find(ZZ(1:end,4)==SS3opt,1)
DEFF_opt2=ZZ(opt2,2)
DEFF_opt3=ZZ(opt3,2)

[t,y]=ode15s(@(t,y) ode_funDE(t,y,DEFF_opt2,Hm,dR),time,y0);
figure
box on
plot(t,y)
xlabel('Tiempo (h)')
ylabel('Concentración')
domR=0:dR:R;
k=length(Mt);
sol1=y(:,end);
sol2=ones(k,1);
sol3=ones(k,1);
for j=1:k
    sol2(j)=mean(y(j,:));
    sol3(j)=1/R*trapz(domR,y(j,:));
end
YCALC1=(C0-sol1)./C0;
YCALC2=(C0-sol2)./C0;
YCALC3=(C0-sol3)./C0;
SS2=sum((YCALC2-Mt).^2);
SS3=sum((YCALC3-Mt).^2);

figure
hold on
box on
plot(time,YCALC2,'color','b')
plot(time,Mt,'r*')
legend('Modelo matemático', 'Experimental','location','best')
xlabel('Tiempo (h)')
ylabel('Fraccion liberada')

```

### ANEXO 3

#### DATOS DE LA SIMULACION

Liberación de potasio en tableta Ø= 6 x2 mm

<i>t(h)</i>	<i>c0</i>	<i>c1</i>	<i>c2</i>	<i>c3</i>	<i>c4</i>	<i>c5</i>	<i>c6</i>	<i>c7</i>	<i>c8</i>	<i>c9</i>	<i>c10</i>
0.0000	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700
0.0530	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1698	0.1692	0.1670	0.1596	0.1398	0.0983	0.0338
0.0910	0.1700	0.1699	0.1698	0.1694	0.1681	0.1648	0.1571	0.1411	0.1130	0.0717	0.0228
0.1410	0.1693	0.1690	0.1680	0.1659	0.1615	0.1533	0.1393	0.1178	0.0884	0.0531	0.0163
0.1820	0.1672	0.1664	0.1642	0.1601	0.1529	0.1415	0.1247	0.1021	0.0743	0.0436	0.0133
0.2180	0.1636	0.1622	0.1588	0.1530	0.1439	0.1307	0.1129	0.0905	0.0647	0.0375	0.0113
0.2610	0.1569	0.1548	0.1503	0.1431	0.1325	0.1182	0.1002	0.0790	0.0557	0.0319	0.0096
0.3060	0.1476	0.1451	0.1398	0.1317	0.1204	0.1059	0.0885	0.0689	0.0480	0.0273	0.0082
0.5030	0.0994	0.0968	0.0918	0.0845	0.0752	0.0643	0.0523	0.0397	0.0271	0.0152	0.0045
0.6710	0.0660	0.0642	0.0606	0.0555	0.0491	0.0417	0.0337	0.0254	0.0173	0.0096	0.0029
0.8230	0.0449	0.0436	0.0412	0.0376	0.0332	0.0282	0.0227	0.0171	0.0116	0.0065	0.0019
0.9890	0.0293	0.0284	0.0268	0.0245	0.0216	0.0183	0.0148	0.0111	0.0075	0.0042	0.0012
1.3410	0.0118	0.0114	0.0108	0.0099	0.0087	0.0074	0.0059	0.0045	0.0030	0.0017	0.0005
1.6300	0.0056	0.0054	0.0051	0.0047	0.0041	0.0035	0.0028	0.0021	0.0014	0.0008	0.0002
1.9920	0.0022	0.0021	0.0020	0.0018	0.0016	0.0014	0.0011	0.0008	0.0006	0.0003	0.0001
2.4870	0.0006	0.0006	0.0006	0.0005	0.0004	0.0004	0.0003	0.0002	0.0002	0.0001	0.0000
2.9960	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
3.4940	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.9840	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Nota: c0 – c10 , (mg/L) concentración de potasio desde el centro (c0) hacia el exterior (c10)

Liberación de potasio en tableta Ø= 9 x3 mm

<i>t(h)</i>	<i>c0</i>	<i>c1</i>	<i>c2</i>	<i>c3</i>	<i>c4</i>	<i>c5</i>	<i>c6</i>	<i>c7</i>	<i>c8</i>	<i>c9</i>	<i>c10</i>
0.0000	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700
0.0513	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1697	0.1679	0.1582	0.1202	0.0250
0.0874	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1699	0.1696	0.1680	0.1617	0.1417	0.0940	0.0167
0.1349	0.1700	0.1700	0.1700	0.1699	0.1694	0.1678	0.1629	0.1499	0.1217	0.0736	0.0125
0.1706	0.1700	0.1700	0.1699	0.1695	0.1684	0.1653	0.1575	0.1404	0.1093	0.0635	0.0107
0.2120	0.1699	0.1698	0.1695	0.1687	0.1665	0.1613	0.1502	0.1298	0.0975	0.0550	0.0091
0.2667	0.1696	0.1693	0.1685	0.1667	0.1626	0.1545	0.1400	0.1171	0.0851	0.0467	0.0077
0.2890	0.1693	0.1689	0.1679	0.1655	0.1606	0.1514	0.1359	0.1123	0.0808	0.0440	0.0072
0.3246	0.1686	0.1681	0.1665	0.1632	0.1570	0.1463	0.1294	0.1053	0.0747	0.0403	0.0066
0.4936	0.1600	0.1582	0.1539	0.1468	0.1361	0.1213	0.1022	0.0793	0.0540	0.0283	0.0046
0.6578	0.1437	0.1409	0.1352	0.1265	0.1145	0.0994	0.0816	0.0619	0.0413	0.0214	0.0035
0.8280	0.1230	0.1200	0.1141	0.1054	0.0941	0.0804	0.0651	0.0487	0.0322	0.0165	0.0027
0.9924	0.1031	0.1004	0.0950	0.0872	0.0772	0.0654	0.0525	0.0390	0.0256	0.0131	0.0021
1.3317	0.0690	0.0670	0.0631	0.0576	0.0506	0.0426	0.0339	0.0250	0.0164	0.0084	0.0013
1.6587	0.0460	0.0446	0.0420	0.0382	0.0335	0.0281	0.0223	0.0164	0.0107	0.0055	0.0009
1.9944	0.0301	0.0292	0.0275	0.0250	0.0219	0.0184	0.0146	0.0107	0.0070	0.0036	0.0006
2.4945	0.0160	0.0155	0.0146	0.0132	0.0116	0.0097	0.0077	0.0057	0.0037	0.0019	0.0003
2.9953	0.0085	0.0082	0.0077	0.0070	0.0061	0.0051	0.0041	0.0030	0.0020	0.0010	0.0002
3.4977	0.0045	0.0043	0.0041	0.0037	0.0032	0.0027	0.0022	0.0016	0.0010	0.0005	0.0001
3.9890	0.0024	0.0023	0.0022	0.0020	0.0017	0.0015	0.0012	0.0009	0.0006	0.0003	0.0000

Nota: c0 – c10 , (mg/L) concentración de potasio desde el centro (c0) hacia el exterior (c10)

Liberación de potasio en tableta Ø= 12 x4 mm

<i>t(h)</i>	<i>c0</i>	<i>c1</i>	<i>c2</i>	<i>c3</i>	<i>c4</i>	<i>c5</i>	<i>c6</i>	<i>c7</i>	<i>c8</i>	<i>c9</i>	<i>c10</i>
0.0000	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700
0.0576	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1699	0.1689	0.1618	0.1266	0.0185
0.0952	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1699	0.1692	0.1655	0.1501	0.1033	0.0127
0.1359	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1699	0.1694	0.1674	0.1597	0.1369	0.0864	0.0103
0.1737	0.1700	0.1700	0.1700	0.1699	0.1697	0.1686	0.1647	0.1532	0.1258	0.0753	0.0088
0.2109	0.1700	0.1700	0.1700	0.1698	0.1692	0.1672	0.1613	0.1464	0.1161	0.0670	0.0078
0.2564	0.1700	0.1700	0.1698	0.1695	0.1682	0.1648	0.1563	0.1381	0.1058	0.0592	0.0068
0.2942	0.1699	0.1699	0.1697	0.1690	0.1671	0.1623	0.1517	0.1315	0.0984	0.0540	0.0062
0.3509	0.1698	0.1696	0.1691	0.1678	0.1647	0.1578	0.1446	0.1221	0.0890	0.0479	0.0055
0.5054	0.1682	0.1675	0.1656	0.1618	0.1548	0.1432	0.1253	0.1007	0.0701	0.0364	0.0041
0.6715	0.1629	0.1613	0.1576	0.1511	0.1410	0.1264	0.1070	0.0832	0.0563	0.0288	0.0033
0.8325	0.1539	0.1516	0.1464	0.1382	0.1265	0.1111	0.0920	0.0701	0.0467	0.0236	0.0027
0.9936	0.1422	0.1393	0.1335	0.1246	0.1124	0.0972	0.0793	0.0597	0.0393	0.0197	0.0022
1.3316	0.1143	0.1113	0.1056	0.0971	0.0861	0.0731	0.0586	0.0434	0.0283	0.0141	0.0016
1.6614	0.0890	0.0864	0.0816	0.0745	0.0656	0.0552	0.0439	0.0323	0.0209	0.0104	0.0012
1.9977	0.0677	0.0657	0.0619	0.0563	0.0494	0.0414	0.0328	0.0241	0.0155	0.0077	0.0009
2.4929	0.0447	0.0434	0.0408	0.0370	0.0324	0.0271	0.0214	0.0157	0.0101	0.0050	0.0006
2.9950	0.0292	0.0283	0.0266	0.0241	0.0211	0.0176	0.0139	0.0102	0.0066	0.0033	0.0004
3.5012	0.0189	0.0184	0.0172	0.0157	0.0137	0.0114	0.0090	0.0066	0.0043	0.0021	0.0002
3.9917	0.0124	0.0121	0.0113	0.0103	0.0090	0.0075	0.0059	0.0043	0.0028	0.0014	0.0002

Nota: c0 – c10 , (mg/L) concentración de potasio desde el centro (c0) hacia el exterior (c10)

Liberación de potasio en tableta Ø= 15 x5 mm

<i>t(h)</i>	<i>c0</i>	<i>c1</i>	<i>c2</i>	<i>c3</i>	<i>c4</i>	<i>c5</i>	<i>c6</i>	<i>c7</i>	<i>c8</i>	<i>c9</i>	<i>c10</i>
0.0000	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700
0.0583	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1699	0.1694	0.1644	0.1330	0.0161
0.0968	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1696	0.1673	0.1554	0.1112	0.0108
0.1365	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1698	0.1687	0.1637	0.1451	0.0952	0.0089
0.1838	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1699	0.1693	0.1667	0.1579	0.1332	0.0815	0.0076
0.2218	0.1700	0.1700	0.1700	0.1699	0.1696	0.1685	0.1645	0.1527	0.1246	0.0733	0.0067
0.2618	0.1700	0.1700	0.1700	0.1698	0.1693	0.1674	0.1616	0.1469	0.1163	0.0664	0.0061
0.3257	0.1700	0.1700	0.1698	0.1695	0.1682	0.1648	0.1562	0.1378	0.1050	0.0579	0.0053
0.5034	0.1696	0.1693	0.1685	0.1666	0.1623	0.1539	0.1388	0.1149	0.0820	0.0429	0.0039
0.6710	0.1678	0.1670	0.1649	0.1607	0.1532	0.1410	0.1227	0.0978	0.0674	0.0345	0.0031
0.8293	0.1639	0.1625	0.1589	0.1527	0.1429	0.1285	0.1091	0.0849	0.0573	0.0289	0.0026
0.9987	0.1573	0.1551	0.1503	0.1425	0.1311	0.1157	0.0963	0.0736	0.0490	0.0244	0.0022
1.3301	0.1387	0.1357	0.1298	0.1207	0.1085	0.0934	0.0759	0.0567	0.0371	0.0183	0.0016
1.6659	0.1170	0.1140	0.1081	0.0994	0.0882	0.0749	0.0600	0.0444	0.0288	0.0141	0.0013
1.9932	0.0968	0.0941	0.0888	0.0812	0.0716	0.0603	0.0480	0.0352	0.0227	0.0111	0.0010
2.4956	0.0707	0.0686	0.0646	0.0588	0.0515	0.0432	0.0342	0.0250	0.0160	0.0078	0.0007
3.0180	0.0503	0.0488	0.0459	0.0417	0.0365	0.0305	0.0241	0.0176	0.0113	0.0055	0.0005
3.4996	0.0366	0.0355	0.0334	0.0303	0.0265	0.0221	0.0174	0.0127	0.0082	0.0040	0.0004
3.9947	0.0264	0.0256	0.0240	0.0218	0.0190	0.0159	0.0125	0.0091	0.0059	0.0029	0.0003

Nota: c0 – c10 , (mg/L) concentración de potasio desde el centro (c0) hacia el exterior (c10)

Liberación de nitrógeno - urea

<i>t(h)</i>	<i>c0</i>	<i>c1</i>	<i>c2</i>	<i>c3</i>	<i>c4</i>	<i>c5</i>	<i>c6</i>	<i>c7</i>	<i>c8</i>	<i>c9</i>	<i>c10</i>
0.0000	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700
33.7254	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1698	0.1686	0.1600	0.1170	0.0000
139.7276	0.1700	0.1700	0.1699	0.1698	0.1692	0.1670	0.1606	0.1445	0.1119	0.0603	0.0000
192.6874	0.1699	0.1699	0.1697	0.1691	0.1672	0.1624	0.1516	0.1304	0.0957	0.0492	0.0000
227.5598	0.1698	0.1697	0.1693	0.1681	0.1652	0.1585	0.1451	0.1219	0.0872	0.0440	0.0000
285.3292	0.1694	0.1690	0.1680	0.1656	0.1605	0.1509	0.1344	0.1093	0.0758	0.0374	0.0000
334.6443	0.1684	0.1678	0.1660	0.1624	0.1555	0.1438	0.1255	0.0999	0.0680	0.0331	0.0000
382.7738	0.1669	0.1660	0.1634	0.1585	0.1501	0.1367	0.1174	0.0919	0.0617	0.0298	0.0000
433.3171	0.1646	0.1632	0.1598	0.1537	0.1439	0.1293	0.1094	0.0845	0.0561	0.0268	0.0000
481.4590	0.1616	0.1598	0.1556	0.1486	0.1377	0.1224	0.1024	0.0782	0.0515	0.0245	0.0000
594.5759	0.1520	0.1494	0.1440	0.1354	0.1231	0.1072	0.0878	0.0658	0.0427	0.0201	0.0000
712.5644	0.1392	0.1362	0.1302	0.1209	0.1085	0.0930	0.0751	0.0556	0.0357	0.0167	0.0000
837.7915	0.1243	0.1213	0.1151	0.1060	0.0942	0.0799	0.0639	0.0468	0.0298	0.0139	0.0000
961.8137	0.1096	0.1067	0.1009	0.0924	0.0815	0.0687	0.0545	0.0398	0.0252	0.0117	0.0000
1084.6683	0.0960	0.0932	0.0879	0.0802	0.0704	0.0591	0.0467	0.0339	0.0215	0.0100	0.0000
1201.5002	0.0841	0.0816	0.0768	0.0699	0.0612	0.0512	0.0403	0.0292	0.0184	0.0085	0.0000
1318.3417	0.0734	0.0712	0.0669	0.0608	0.0531	0.0443	0.0349	0.0252	0.0159	0.0074	0.0000
1442.4176	0.0633	0.0614	0.0577	0.0523	0.0457	0.0381	0.0299	0.0216	0.0136	0.0063	0.0000
1561.6798	0.0549	0.0532	0.0499	0.0453	0.0395	0.0329	0.0258	0.0186	0.0117	0.0054	0.0000

Nota: c0 – c10 , (mg/L) concentración de potasio desde el centro (c0) hacia el exterior (c10)



Liberación de nitrógeno nitrato – parabólica

<b>t(h)</b>	<b>c0</b>	<b>c1</b>	<b>c2</b>	<b>c3</b>	<b>c4</b>	<b>c5</b>	<b>c6</b>	<b>c7</b>	<b>c8</b>	<b>c9</b>	<b>c10</b>
0.0000	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700
118.5977	0.1700	0.1700	0.1699	0.1697	0.1690	0.1666	0.1596	0.1428	0.1098	0.0588	0.0000
239.6027	0.1692	0.1688	0.1677	0.1650	0.1596	0.1495	0.1326	0.1074	0.0742	0.0365	0.0000
476.6406	0.1528	0.1503	0.1449	0.1363	0.1242	0.1082	0.0888	0.0666	0.0432	0.0204	0.0000
713.4993	0.1195	0.1164	0.1104	0.1015	0.0899	0.0761	0.0606	0.0444	0.0282	0.0131	0.0000
938.0779	0.0887	0.0861	0.0811	0.0739	0.0648	0.0542	0.0428	0.0310	0.0196	0.0091	0.0000
1177.6241	0.0628	0.0609	0.0572	0.0519	0.0453	0.0377	0.0296	0.0214	0.0135	0.0062	0.0000
1417.4068	0.0440	0.0426	0.0400	0.0362	0.0316	0.0263	0.0206	0.0149	0.0093	0.0043	0.0000
1657.3215	0.0307	0.0297	0.0279	0.0252	0.0220	0.0183	0.0143	0.0103	0.0065	0.0030	0.0000
1897.2923	0.0213	0.0207	0.0194	0.0176	0.0153	0.0127	0.0100	0.0072	0.0045	0.0021	0.0000
2137.3192	0.0149	0.0144	0.0135	0.0122	0.0106	0.0088	0.0069	0.0050	0.0031	0.0014	0.0000
2377.4312	0.0103	0.0100	0.0094	0.0085	0.0074	0.0061	0.0048	0.0035	0.0022	0.0010	0.0000
2617.6393	0.0072	0.0070	0.0065	0.0059	0.0051	0.0043	0.0033	0.0024	0.0015	0.0007	0.0000
2857.1905	0.0050	0.0048	0.0045	0.0041	0.0036	0.0030	0.0023	0.0017	0.0011	0.0005	0.0000

Nota: c0 – c10 , (mg/L) concentración de potasio desde el centro (c0) hacia el exterior (c10)

Liberación de nitrógeno nitrato – sigmoïdal

<i>t(h)</i>	<i>c0</i>	<i>c1</i>	<i>c2</i>	<i>c3</i>	<i>c4</i>	<i>c5</i>	<i>c6</i>	<i>c7</i>	<i>c8</i>	<i>c9</i>	<i>c10</i>
0.0000	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700
5.2915	0.1700	0.1700	0.1700	0.1699	0.1695	0.1678	0.1626	0.1484	0.1172	0.0645	0.0003
10.2413	0.1698	0.1696	0.1690	0.1675	0.1640	0.1565	0.1421	0.1182	0.0838	0.0421	0.0002
19.8118	0.1623	0.1606	0.1565	0.1497	0.1390	0.1238	0.1038	0.0795	0.0524	0.0250	0.0001
29.8380	0.1394	0.1365	0.1304	0.1212	0.1087	0.0933	0.0753	0.0558	0.0358	0.0168	0.0001
40.0921	0.1104	0.1075	0.1016	0.0931	0.0822	0.0693	0.0550	0.0402	0.0255	0.0119	0.0000
49.7385	0.0857	0.0832	0.0783	0.0713	0.0625	0.0523	0.0412	0.0299	0.0189	0.0088	0.0000
59.6128	0.0650	0.0630	0.0592	0.0538	0.0470	0.0391	0.0308	0.0222	0.0140	0.0065	0.0000
69.6390	0.0488	0.0473	0.0444	0.0402	0.0351	0.0292	0.0229	0.0165	0.0104	0.0048	0.0000
79.6652	0.0365	0.0353	0.0332	0.0300	0.0262	0.0218	0.0171	0.0123	0.0077	0.0036	0.0000
89.6915	0.0272	0.0264	0.0247	0.0224	0.0195	0.0162	0.0127	0.0092	0.0058	0.0027	0.0000
99.7177	0.0203	0.0197	0.0185	0.0167	0.0145	0.0121	0.0095	0.0068	0.0043	0.0020	0.0000
109.7439	0.0151	0.0147	0.0138	0.0125	0.0108	0.0090	0.0071	0.0051	0.0032	0.0015	0.0000
119.7827	0.0113	0.0109	0.0103	0.0093	0.0081	0.0067	0.0053	0.0038	0.0024	0.0011	0.0000

Nota: c0 – c10 , (mg/L) concentración de potasio desde el centro (c0) hacia el exterior (c10)

Liberación de fosforo fosfato monoamonio

<b>t(h)</b>	<b>c0</b>	<b>c1</b>	<b>c2</b>	<b>c3</b>	<b>c4</b>	<b>c5</b>	<b>c6</b>	<b>c7</b>	<b>c8</b>	<b>c9</b>	<b>c10</b>
0.0000	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700
22.3213	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1699	0.1695	0.1674	0.1594	0.1349	0.0803	0.0001
45.5305	0.1700	0.1700	0.1698	0.1694	0.1682	0.1645	0.1553	0.1359	0.1016	0.0531	0.0000
116.4382	0.1643	0.1629	0.1593	0.1531	0.1432	0.1285	0.1086	0.0838	0.0555	0.0266	0.0000
143.3785	0.1570	0.1548	0.1499	0.1419	0.1301	0.1143	0.0945	0.0714	0.0466	0.0220	0.0000
165.9557	0.1488	0.1462	0.1405	0.1316	0.1192	0.1033	0.0843	0.0629	0.0407	0.0191	0.0000
190.6302	0.1385	0.1355	0.1294	0.1202	0.1078	0.0924	0.0745	0.0551	0.0354	0.0166	0.0000
213.7087	0.1282	0.1251	0.1190	0.1098	0.0977	0.0831	0.0666	0.0489	0.0312	0.0146	0.0000
284.2873	0.0974	0.0946	0.0892	0.0814	0.0716	0.0600	0.0475	0.0345	0.0218	0.0101	0.0000
309.5928	0.0875	0.0849	0.0800	0.0728	0.0638	0.0534	0.0421	0.0305	0.0193	0.0089	0.0000
333.1923	0.0789	0.0766	0.0721	0.0655	0.0573	0.0479	0.0377	0.0273	0.0172	0.0080	0.0000
381.1519	0.0638	0.0618	0.0581	0.0527	0.0460	0.0384	0.0301	0.0218	0.0137	0.0063	0.0000
477.9497	0.0410	0.0398	0.0373	0.0338	0.0294	0.0245	0.0192	0.0138	0.0087	0.0040	0.0000
501.1430	0.0369	0.0357	0.0335	0.0304	0.0265	0.0220	0.0172	0.0124	0.0078	0.0036	0.0000
549.1838	0.0296	0.0286	0.0269	0.0243	0.0212	0.0176	0.0138	0.0099	0.0063	0.0029	0.0000
623.0513	0.0210	0.0203	0.0191	0.0173	0.0150	0.0125	0.0098	0.0071	0.0044	0.0021	0.0000
646.6035	0.0188	0.0182	0.0171	0.0155	0.0135	0.0112	0.0088	0.0063	0.0040	0.0018	0.0000
693.6257	0.0152	0.0147	0.0138	0.0125	0.0108	0.0090	0.0071	0.0051	0.0032	0.0015	0.0000

Nota: c0 – c10 , (mg/L) concentración de potasio desde el centro (c0) hacia el exterior (c10)

Liberación de fosforo fosfato diamonio tetrahidratado

<i>t(h)</i>	<i>c0</i>	<i>c1</i>	<i>c2</i>	<i>c3</i>	<i>c4</i>	<i>c5</i>	<i>c6</i>	<i>c7</i>	<i>c8</i>	<i>c9</i>	<i>c10</i>
0.0000	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700
21.2544	0.1700	0.1700	0.1700	0.1700	0.1699	0.1695	0.1676	0.1599	0.1360	0.0815	0.0001
44.7940	0.1700	0.1700	0.1698	0.1694	0.1681	0.1644	0.1552	0.1357	0.1014	0.0530	0.0000
116.2918	0.1638	0.1623	0.1586	0.1523	0.1421	0.1273	0.1074	0.0826	0.0547	0.0261	0.0000
141.2012	0.1568	0.1546	0.1496	0.1415	0.1298	0.1140	0.0942	0.0711	0.0464	0.0219	0.0000
164.8538	0.1479	0.1452	0.1395	0.1305	0.1181	0.1023	0.0833	0.0622	0.0401	0.0189	0.0000
191.2640	0.1365	0.1335	0.1274	0.1181	0.1057	0.0905	0.0729	0.0539	0.0345	0.0161	0.0000
212.6696	0.1267	0.1236	0.1175	0.1083	0.0963	0.0819	0.0655	0.0481	0.0307	0.0143	0.0000
284.1716	0.0951	0.0924	0.0871	0.0794	0.0698	0.0585	0.0462	0.0336	0.0212	0.0099	0.0000
309.5524	0.0851	0.0826	0.0778	0.0708	0.0620	0.0519	0.0409	0.0296	0.0187	0.0087	0.0000
332.9098	0.0767	0.0744	0.0700	0.0636	0.0556	0.0465	0.0366	0.0265	0.0167	0.0077	0.0000
380.8800	0.0617	0.0598	0.0561	0.0509	0.0445	0.0370	0.0291	0.0210	0.0132	0.0061	0.0000
477.9753	0.0392	0.0380	0.0357	0.0323	0.0281	0.0234	0.0183	0.0132	0.0083	0.0038	0.0000
501.6196	0.0351	0.0340	0.0319	0.0289	0.0252	0.0209	0.0164	0.0118	0.0074	0.0034	0.0000
548.7849	0.0281	0.0272	0.0256	0.0231	0.0201	0.0167	0.0131	0.0095	0.0059	0.0028	0.0000
622.4292	0.0199	0.0192	0.0180	0.0163	0.0142	0.0118	0.0093	0.0067	0.0042	0.0019	0.0000
646.7060	0.0177	0.0172	0.0161	0.0146	0.0127	0.0105	0.0083	0.0060	0.0037	0.0017	0.0000
694.3468	0.0141	0.0137	0.0128	0.0116	0.0101	0.0084	0.0066	0.0047	0.0030	0.0014	0.0000

Nota: c0 – c10 , (mg/L) concentración de potasio desde el centro (c0) hacia el exterior (c10)

## ANEXO 4

### DATOS ESTADISTICOS

Contrastación de potasio en tableta  $\varnothing= 6 \times 2$  mm

<i>t(h)</i>	<i>Mt</i>	<i>Ycalc</i>	<i>Ycalc-Mt</i>	<i>(Ycalc-Mt)<sup>2</sup></i>
0.0000	0.0000	0.0000	0.00000	0.00000
0.0530	0.1750	0.1350	-0.03998	0.00160
0.0910	0.2720	0.1884	-0.08358	0.00699
0.1410	0.3500	0.2503	-0.09972	0.00994
0.1820	0.4010	0.2994	-0.10162	0.01033
0.2180	0.4530	0.3427	-0.11031	0.01217
0.2610	0.4950	0.3947	-0.10035	0.01007
0.3060	0.5430	0.4484	-0.09460	0.00895
0.5030	0.6400	0.6520	0.01197	0.00014
0.6710	0.6860	0.7721	0.08613	0.00742
0.8230	0.7510	0.8458	0.09476	0.00898
0.9890	0.7960	0.8995	0.10353	0.01072
1.3410	0.8340	0.9596	0.12560	0.01577
1.6300	0.8690	0.9809	0.11188	0.01252
1.9920	0.8950	0.9925	0.09752	0.00951
2.4870	0.9410	0.9979	0.05693	0.00324
2.9960	0.9770	0.9994	0.02245	0.00050
3.4940	0.9840	0.9998	0.01585	0.00025
3.9840	0.9990	1.0000	0.00096	0.00000

Contrastación de potasio en tableta Ø= 9 x3 mm

<i>t(h)</i>	<i>Mt</i>	<i>Ycalc</i>	<i>Ycalc-Mt</i>	<i>(Ycalc-Mt)<sup>2</sup></i>
0.0000	0.0000	0.0000	0.00000	0.00000
0.0513	0.0943	0.1118	0.01753	0.00031
0.0874	0.1557	0.1436	-0.01210	0.00015
0.1349	0.2052	0.1777	-0.02750	0.00076
0.1706	0.2562	0.2008	-0.05536	0.00306
0.2120	0.2864	0.2260	-0.06039	0.00365
0.2667	0.3294	0.2579	-0.07145	0.00511
0.2890	0.3473	0.2707	-0.07662	0.00587
0.3246	0.3703	0.2910	-0.07929	0.00629
0.4936	0.4539	0.3878	-0.06607	0.00437
0.6578	0.5388	0.4813	-0.05753	0.00331
0.8280	0.6104	0.5710	-0.03938	0.00155
0.9924	0.6701	0.6468	-0.02332	0.00054
1.3317	0.7298	0.7674	0.03762	0.00142
1.6587	0.7808	0.8459	0.06505	0.00423
1.9944	0.7960	0.8992	0.10323	0.01066
2.4945	0.8416	0.9466	0.10499	0.01102
2.9953	0.8799	0.9717	0.09186	0.00844
3.4977	0.8875	0.9851	0.09751	0.00951
3.9890	0.8935	0.9920	0.09844	0.00969

Contrastación de potasio en tableta Ø= 12 x4 mm

<i>t(h)</i>	<i>Mt</i>	<i>Ycalc</i>	<i>Ycalc-Mt</i>	<i>(Ycalc-Mt)<sup>2</sup></i>
0.0000	0.0000	0.0000	0.00000	0.00000
0.0576	0.0779	0.1093	0.03143	0.00099
0.0952	0.1227	0.1334	0.01077	0.00012
0.1359	0.1628	0.1551	-0.00771	0.00006
0.1737	0.1973	0.1733	-0.02404	0.00058
0.2109	0.2344	0.1900	-0.04436	0.00197
0.2564	0.2650	0.2093	-0.05566	0.00310
0.2942	0.2930	0.2248	-0.06821	0.00465
0.3509	0.3157	0.2471	-0.06865	0.00471
0.5054	0.3688	0.3061	-0.06265	0.00392
0.6715	0.4530	0.3696	-0.08336	0.00695
0.8325	0.5097	0.4316	-0.07810	0.00610
0.9936	0.5600	0.4922	-0.06778	0.00459
1.3316	0.6256	0.6078	-0.01781	0.00032
1.6614	0.6805	0.7001	0.01954	0.00038
1.9977	0.7291	0.7736	0.04448	0.00198
2.4929	0.7646	0.8512	0.08659	0.00750
2.9950	0.7959	0.9031	0.10720	0.01149
3.5012	0.8175	0.9371	0.11966	0.01432
3.9917	0.8610	0.9587	0.09762	0.00953

Contrastación de potasio en tableta Ø= 15 x5 mm

<i>t(h)</i>	<i>Mt</i>	<i>Ycalc</i>	<i>Ycalc-Mt</i>	<i>(Ycalc-Mt)<sup>2</sup></i>
0.0000	0.0000	0.0000	0.00000	0.00000
0.0583	0.0611	0.1055	0.04434	0.00197
0.0968	0.1058	0.1261	0.02028	0.00041
0.1365	0.1432	0.1437	0.00055	0.00000
0.1838	0.1775	0.1625	-0.01500	0.00023
0.2218	0.2050	0.1765	-0.02844	0.00081
0.2618	0.2311	0.1905	-0.04061	0.00165
0.3257	0.2680	0.2116	-0.05644	0.00319
0.5034	0.3150	0.2660	-0.04898	0.00240
0.6710	0.4065	0.3155	-0.09103	0.00829
0.8293	0.4536	0.3625	-0.09112	0.00830
0.9987	0.4959	0.4131	-0.08275	0.00685
1.3301	0.5609	0.5099	-0.05107	0.00261
1.6659	0.6238	0.5989	-0.02498	0.00062
1.9932	0.6563	0.6734	0.01712	0.00029
2.4956	0.7032	0.7641	0.06094	0.00371
3.0180	0.7591	0.8329	0.07374	0.00544
3.4996	0.7735	0.8786	0.10507	0.01104
3.9947	0.8035	0.9127	0.10922	0.01193



Contrastación de nitrógeno - urea

<i>t(h)</i>	<i>Mt</i>	<i>Ycalc</i>	<i>Ycalc-Mt</i>	<i>(Ycalc-Mt)<sup>2</sup></i>
0.0000	0.0000	0.0000	0.00000	0.00000
33.7254	0.0057	0.1254	0.11975	0.01434
139.7276	0.0238	0.2015	0.17769	0.03157
192.6874	0.0672	0.2326	0.16541	0.02736
227.5598	0.1231	0.2520	0.12891	0.01662
285.3292	0.1744	0.2834	0.10891	0.01186
334.6443	0.2429	0.3098	0.06684	0.00447
382.7738	0.2955	0.3356	0.04017	0.00161
433.3171	0.3445	0.3629	0.01841	0.00034
481.4590	0.3867	0.3891	0.00235	0.00001
594.5759	0.4997	0.4505	-0.04921	0.00242
712.5644	0.5693	0.5128	-0.05648	0.00319
837.7915	0.6308	0.5747	-0.05608	0.00315
961.8137	0.6923	0.6305	-0.06183	0.00382
1084.6683	0.7230	0.6798	-0.04322	0.00187
1201.5002	0.7526	0.7212	-0.03133	0.00098
1318.3417	0.7741	0.7577	-0.01639	0.00027
1442.4176	0.7911	0.7915	0.00043	0.00000
1561.6798	0.8035	0.8197	0.01619	0.00026

Contrastación de nitrógeno nitrato – parabólica

<i>t(h)</i>	<i>Mt</i>	<i>Ycalc</i>	<i>Ycalc-Mt</i>	<i>(Ycalc-Mt)<sup>2</sup></i>
0.0000	0.0000	0.0000	0.00000	0.00000
118.5977	0.0954	0.2053	0.10986	0.01207
239.6027	0.2451	0.2885	0.04334	0.00188
476.6406	0.4351	0.4462	0.01113	0.00012
713.4993	0.6083	0.5935	-0.01481	0.00022
938.0779	0.7308	0.7052	-0.02556	0.00065
1177.6241	0.8084	0.7933	-0.01511	0.00023
1417.4068	0.8599	0.8558	-0.00413	0.00002
1657.3215	0.8969	0.8996	0.00271	0.00001
1897.2923	0.9276	0.9301	0.00247	0.00001
2137.3192	0.9523	0.9514	-0.00087	0.00000
2377.4312	0.9675	0.9662	-0.00127	0.00000
2617.6393	0.9721	0.9765	0.00440	0.00002
2857.1905	0.9783	0.9836	0.00532	0.00003

Contrastación de nitrógeno nitrato – sigmoideal

<i>t(h)</i>	<i>Mt</i>	<i>Ycalc</i>	<i>Ycalc-Mt</i>	<i>(Ycalc-Mt)<sup>2</sup></i>
0.0000	0.0000	0.0000	0.00000	0.00000
5.2915	0.0563	0.1925	0.13614	0.01853
10.2413	0.1164	0.2605	0.14416	0.02078
19.8118	0.2386	0.3836	0.14496	0.02101
29.8380	0.3766	0.5116	0.13502	0.01823
40.0921	0.6149	0.6274	0.01250	0.00016
49.7385	0.7604	0.7155	-0.04485	0.00201
59.6128	0.8547	0.7857	-0.06903	0.00477
69.6390	0.8996	0.8398	-0.05976	0.00357
79.6652	0.9340	0.8804	-0.05356	0.00287
89.6915	0.9643	0.9108	-0.05354	0.00287
99.7177	0.9746	0.9335	-0.04117	0.00169
109.7439	0.9797	0.9504	-0.02931	0.00086
119.7827	0.9875	0.9630	-0.02443	0.00060

Contrastación de fosforo fosfato monoamonio

<i>t(h)</i>	<i>Mt</i>	<i>Ycalc</i>	<i>Ycalc-Mt</i>	<i>(Ycalc-Mt)^2</i>
0.0000	0.0000	0.0000	0.00000	0.00000
22.3213	0.2702	0.1651	-0.10517	0.01106
45.5305	0.3631	0.2204	-0.14268	0.02036
116.4382	0.4299	0.3659	-0.06399	0.00409
143.3785	0.5164	0.4211	-0.09527	0.00908
165.9557	0.5439	0.4670	-0.07689	0.00591
190.6302	0.5696	0.5158	-0.05382	0.00290
213.7087	0.6096	0.5592	-0.05044	0.00254
284.2873	0.6521	0.6747	0.02269	0.00051
309.5928	0.7269	0.7094	-0.01743	0.00030
333.1923	0.7524	0.7388	-0.01361	0.00019
381.1519	0.7490	0.7900	0.04095	0.00168
477.9497	0.7653	0.8654	0.10013	0.01003
501.1430	0.7977	0.8791	0.08145	0.00663
549.1838	0.8265	0.9032	0.07671	0.00588
623.0513	0.8551	0.9312	0.07610	0.00579
646.6035	0.8671	0.9383	0.07127	0.00508
693.6257	0.8721	0.9504	0.07832	0.00613

Contrastación de fosforo fosfato diamonio tetrahidratado

<i>t(h)</i>	<i>Mt</i>	<i>Ycalc</i>	<i>Ycalc-Mt</i>	<i>(Ycalc-Mt)<sup>2</sup></i>
0.0000	0.0000	0.0000	0.00000	0.00000
21.2544	0.3025	0.1634	-0.13914	0.01936
44.7940	0.3883	0.2208	-0.16751	0.02806
116.2918	0.4742	0.3704	-0.10381	0.01078
141.2012	0.5568	0.4226	-0.13422	0.01801
164.8538	0.5904	0.4716	-0.11879	0.01411
191.2640	0.6108	0.5245	-0.08629	0.00745
212.6696	0.6204	0.5652	-0.05524	0.00305
284.1716	0.6851	0.6828	-0.00227	0.00001
309.5524	0.7282	0.7175	-0.01067	0.00011
332.9098	0.7351	0.7463	0.01120	0.00013
380.8800	0.7496	0.7971	0.04745	0.00225
477.9753	0.7643	0.8714	0.10709	0.01147
501.6196	0.7789	0.8849	0.10609	0.01126
548.7849	0.7844	0.9079	0.12350	0.01525
622.4292	0.7843	0.9350	0.15070	0.02271
646.7060	0.7879	0.9420	0.15410	0.02375
694.3468	0.7997	0.9537	0.15399	0.02371