

Diseño conceptual para la descontaminación y economía de agua en plantas de desamargado de quinua

Ronanth Zavaleta Mercado

Resumen:

Se plantea un diseño conceptual orientado a disminuir la cantidad de agua utilizada en la desaponificación de quinua en grano y una consecuente reducción en efluentes contaminantes de plantas de tratamiento de este pseudocereal andino. A este efecto se consideran modificaciones a procesos tradicionales, incluyendo una etapa de centrifugación como una alternativa para la disminución de costos asociados con el secado del grano húmedo, lo que permite a la vez separar eficientemente las soluciones acuosas de saponinas para su tratamiento de descontaminación mediante un proceso de reacción química que utiliza un sistema de reactor tubular asociado con un dosificador y un clarificador para el retiro de sólidos suspendidos.

El líquido descontaminado y clarificado es retornado al circuito de extracción de saponinas, reduciéndose de esta manera de forma drástica tanto el consumo de agua (solvente utilizado en el desamargado de quinua) cuanto la emisión de efluentes contaminantes. A efectos de analizar la viabilidad del concepto se plantea un modelo determinístico no estacionario basado en el principio de conservación de materia. Las soluciones numéricas son evaluadas para generar la inferencia correspondiente.

Palabras clave: desamargado, desaponificación, saponinas, saponinas, saponinas, agluconas, transporte de interfase, mecanismos moleculares, transporte convectivo/difusivo, efecto hemolítico, ecuaciones rígidas, clarificador, sedimentador, grupo adimensional de Sherwood, grupo adimensional de Reynolds, grupo adimensional de Schmidt.

Abstract:

A conceptual design is set up aimed at decreasing the amount of water used in the desaponification of quinoa grains and a consequent reduction in pollutants contained in treatment plants effluents of this Andean pseudo-cereal. To this end, process modifications are considered, including a stage of centrifugation as an alternative to lowering costs associated with wet grain drying, allowing at the same time the efficient separation of aqueous solutions of saponins and its decontamination by means of a system using a tubular reactor and a clarifier for the removal of suspended solids. The decontaminated and clarified liquid is returned to the desaponification process, reducing drastically both the water consumption and the emission of pollutant effluents. For the purposes of analyzing the feasibility of the concept, a deterministic unsteady state model is set up based on the principle of conservation of matter. Numerical solutions are evaluated to generate the appropriate inference.

Key words: sweetening, desaponificación, saponins, sapogenins, aglicones, transport interface, molecular mechanisms, convective/diffusive transport, hemolytic effect, rigid equations, clarifier, settler, dimensionless group of Sherwood, dimensionless Reynolds group dimensionless Schmidt group.

Introducción

La quinua (*Chenopodium Quinoa Willd*) es un pseudocereal de cultivo ancestral en las regiones alto andinas y constituye un alimento de calidad para el ser humano. Se encuentra en muy diversas variedades en la altiplanicie Perú-boliviana, presentando sin embargo, algunas características comunes, como ser cantidades variables de saponinas, que le confieren un característico sabor amargo. Gonnermann (1919) aisló a partir de quinua, un principio activo que denominó ácido quinoico.

Las saponinas son glucósidos que se hallan presentes en gran variedad de plantas. Se caracterizan por su sabor amargo, su capacidad de formar espumas persistentes en soluciones acuosas y por su poder hemolítico. Constituyen compuestos sumamente tóxicos para animales de sangre fría y respiración branquial.

Aunque el término saponinas incluye a compuestos de diversa composición química, se agrupa a estos por sus propiedades comunes y especialmente por su capacidad espumante, semejante a la del jabón, del cual derivan su nombre.

Las saponinas son extraídas de los vegetales con agua o alcoholes inferiores, o mezclas de ambos, seguida de evaporación del solvente o precipitación. Por hidrólisis completa se obtiene las sapogeninas (agluconas de saponinas), azúcares y otros compuestos que forman las cadenas laterales (Birk, 1980).

A causa de las características mencionadas anteriormente, la quinua debe ser desprovista de las saponinas que contiene, a efectos de hacerla apta para el consumo humano. Las operaciones inherentes a este proceso reciben globalmente el nombre de “desaponificación” de la quinua e

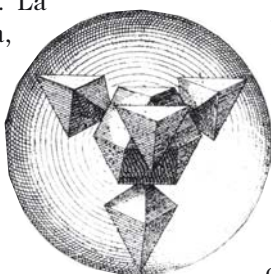
incluyen la “vía seca”, un escarificado de la quinua en grano, y la “vía húmeda” que consiste en un proceso de extracción solido-liquido utilizando agua como solvente. Se dispone también de un proceso combinado, denominado “vía combinada”, que incluye a ambas.

La vía húmeda puede consumir cantidades importantes de agua, no siendo inusual una relación de 7:1 en masa (7 toneladas de agua por tonelada de quinua lavada). La mayor parte de esta agua, que contiene cantidades variables de saponinas en solución, es expulsada de la planta como efluente, sin someterla a ningún tratamiento de descontaminación.

Si se considera que el contenido de saponinas en algunas variedades de quinua (Quinua Real), bordea el 3% en masa, y que el límite de percepción sensorial se sitúa alrededor del 0.1%, se debe por lo tanto eliminar más del 2% de saponinas en las plantas de tratamiento de quinua. De este porcentaje alrededor de 1% es extraída en el tratamiento de extracción utilizando agua como solvente de extracción. De esta manera, alrededor de 10 kg de saponinas son eliminadas en algo más de 6 metros cúbicos de agua (por tonelada de quinua tratada), dando una concentración de alrededor de 1.5 kg/m³. Esto equivale a 1500 ppm¹. El aumentar la eficiencia en el uso de agua eleva proporcionalmente la concentración, la que resulta inaceptable para su disposición directa al medio ambiente.

Se plantea una modificación del proceso de “desamargado” tradicional,

que permitiría en principio reducir drásticamente la emisión de efluentes líquidos contaminados por separación de las saponinas en solución y recirculación de solvente, así como por separación más eficiente de la humedad no ligada presente en los granos de quinua. El problema es abordado desde una perspectiva teórico-conceptual y se realiza el modelado correspondiente con miras a su validación experimental futura.



1. Conceptuación

En principio se puede concebir que si se lograra de alguna manera eliminar una cantidad sustancial de saponinas de los efluentes líquidos provenientes de la etapa de extracción sólido/líquido (desamargado)

podría pensarse en reutilizar esta agua para nuevas extracciones, recirculándola al circuito de extracción. Más aun, podría pensarse en retirar la totalidad de la humedad no ligada del grano de quinua refinado para reducir las pérdidas de agua, concebida ésta no ya como un efluente contaminado, sino más bien como una corriente a recuperarse. El retiro de la humedad no ligada abarataría ciertamente el secado de la quinua.

Tomando en cuenta lo anterior, parecería posible, al menos en principio, tener que añadir solamente agua de reposición al circuito, para compensar por las inevitables pérdidas de solvente asociadas, tanto en la humedad ligada de los granos de quinua cuanto en la etapa de purificación de las soluciones cargadas de saponinas y otras menores, tales como la eva-

1 Comunicación verbal de operadores de planta al autor.

poración. Esto permitiría reducir de una manera importante la emisión de efluentes líquidos contaminados de las plantas de tratamiento del pseudocereales andino.

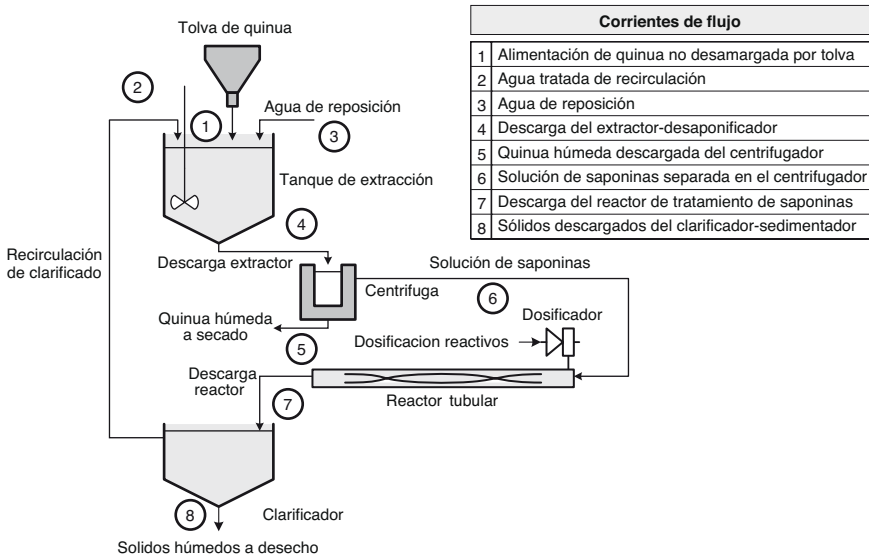
Un diagrama de flujo simplificado que recoge estas ideas se presenta en el Gráfico 1, y se refiere al circuito modificado para economizar agua y reducir efluentes contaminantes de plantas de tratamiento de quinua. Se proporciona identificación a las corrientes con miras al modelado requerido.

En el proceso tradicional, las soluciones de saponinas del extractor son descartadas directamente, aunque la etapa de centrifugación tendente a reducir el trabajo del secador, que se plantea en el diagrama modificado, habría sido introducida en alguna planta de tratamiento². Esta modificación no significa, sin embargo, una

reducción de los efluentes líquidos contaminados con saponina, existiendo la posibilidad de que fuese concebida con una orientación de ahorro energético exclusivamente (etapa de secado).

La corriente líquida separada de los sólidos, proveniente de la centrifuga, con una posible etapa de filtrado grueso intermedio, dispuesta para separar material sólido arrastrado, es conducida a un reactor tubular provisto de un dosificador de reactivos que permita transformar una porción mayoritaria de las saponinas en productos sólidos fácilmente separables en el clarificador dispuesto a la descarga. Esta etapa, estudiada por el autor hace ya algún tiempo, no es discutida en detalle, ya que aún no se encuentra protegida la propiedad intelectual inherente. Baste decir que en pree-

Gráfico 1: Diagrama de flujo del circuito modificado de extracción de saponinas, incluyendo la recuperación y recirculación de solvente



² Se habría introducido esta modificación de proceso en las instalaciones de *Andean Valley*, un procesador y exportador tradicional de quinua en grano y productos derivados, instalado en el área próxima a la ciudad de La Paz.

bas preliminares de escala reducida permitió reducir el contenido de saponinas en solución en más de un 90%, con modestos tiempos de contacto. Las saponinas son eliminadas como sólidos de baja solubilidad que precipitan en el clarificador bajo ciertas circunstancias. Estos sólidos son retirados y secados al ambiente. Se contempla su utilización como materia prima para la obtención de insumos orgánicos de uso farmacéutico³. El clarificado obtenido como sobrenadante del sedimentador se recircula al extractor sólido/líquido, previa una etapa intermedia de filtrado rápido, destinada a retener partículas sólidas superiores a 10 μ que pudieran haber sido arrastradas mecánicamente del clarificador.

Resulta evidente que se hace necesario introducir al extractor sólido/líquido agua de reposición para restituir aquella arrastrada tanto por el grano húmedo, a la salida de la centrifuga, como la que se pierde conjuntamente con los sólidos precipitados y evacuados en la clarificadora, amén de aquella perdida por evaporación y otras mermas menores.

2. Modelado

Extractor

El modelado se basa en aplicaciones reiteradas del Principio de Conservación de la Materia. Para este caso se acepta una aproximación macroscópica. Si se denota con el subíndice A al solvente de extracción agua, y S a las saponinas, consideradas en su conjunto como una especie única, un balance de masa de éstas contenidas

en los granos de quinua en el extractor conduce a la siguiente ecuación diferencial ordinaria (EDO),

$$\frac{dm_S}{dt} = \dot{m}_{S,1} + \dot{m}_{S,2} - \dot{m}_{S,4}$$

donde, \dot{m}_i es la velocidad másica de la corriente i, $\dot{m}_{i,j}$ es la velocidad másica de flujo de la especie i en la corriente jm y mS la masa de saponinas contenidas en el tanque. En este caso

$$\frac{dm_S}{dt} = \frac{dm_{S,l}}{dt} + \frac{dm_{S,s}}{dt}$$

donde los subíndices l y s se refieren a las fases líquida y sólida dentro del extractor, respectivamente.

Si se considera que $R_{l,s}$ es la relación de masas de líquido y sólido en el extractor y consiguientemente en la corriente 4 de salida (suposición de mezclado perfecto), entonces

$$R_{l,s} = \frac{M_l}{M_s}$$

y también, por definición

$$\dot{m}_{S,1} = \dot{m}_1 w_{S,1}$$

Al introducir las ecuaciones anteriores en un balance de materia para saponinas aplicado a la fase sólida

[1]

$$\frac{dm_{S,s}}{dt} = \dot{m}_1 w_{S,1} - \dot{m}_4 \left(\frac{1}{R_{l,s} + 1} \right) w_{S,4} - \dot{M}_T$$

donde \dot{M}_T es la velocidad de transferencia de materia de saponinas de la fase sólida a la líquida y $w_{S,4}$ la fracción másica de saponinas en los sólidos húmedos de la misma corriente. Para la velocidad de transferencia de materia se utiliza la siguiente expre-

3 Investigación paralela en curso de realización por el autor en el área de química fina.

sión resultante de la definición de la constante de transferencia de masa en procesos que incluyen mecanismos combinados convectivo/difusivos

$$\dot{M}_T = k_c a_m M_s (c_S^* - c)$$

siendo k_c la constante de transferencia de masa definida en términos de diferencias de concentración entre fases, a_m es el área específica de transferencia de masa de los granos de quinua, M_s , la masa total de sólidos (granos de quinua), c_S^* , la concentración de equilibrio de saponinas en la interfase y c , la concentración global de saponinas en la fase líquida. Esta definición, que incorpora, como se mencionó anteriormente, tanto mecanismos convectivos como difusivos en el transporte de materia, debe ser verificada en términos de su aplicación pertinente al proceso en estudio.

Por otra parte,

$$m_{S,S} = M_s w_S$$

Acá, M_s es la masa de sólidos en el extractor y w_S la fracción másica de saponinas en los sólidos en extracción. Si se define como M_l a la masa de líquido contenida en el tanque, resulta que, por definición

$$R_{l,s} = \frac{M_l}{M_s}$$

Si adicionalmente se acepta una distribución tipo Ley de Henry para el equilibrio de interfase sólido líquido, $c_S^* = k w_S$, siendo k la constante correspondiente, y se reemplazan las anteriores expresiones en la ecuación [1], se llega a la siguiente ecuación

$$\frac{dw_S}{dt} = \frac{1}{M_s} \left[\dot{m}_1 w_{S,1} - \dot{m}_4 \left(\frac{1}{R_{l,s} + 1} \right) w_S - k_c a_m M_s (k w_S - c) \right] \quad [2]$$

Para completar el modelado del extractor hace falta plantear una EDO que describa la variación de la concentración c de la fase líquida con el tiempo. La siguiente ecuación describe esta variación y resulta de una nueva aplicación del Principio de Conservación de Materia

$$\frac{dm_{S,l}}{dt} = \dot{m}_2 w_{S,2} - \dot{m}_4 \left(\frac{R_{l,s}}{R_{l,s} + 1} \right) \frac{c}{\rho} + \dot{M}_T$$

Por otra parte,

$$m_{S,l} = M_l \frac{c}{\rho}$$

que por reemplazo en la EDO anterior conduce a

$$\frac{dc}{dt} = \frac{\rho}{M_l} \left[\dot{m}_2 w_{S,2} - \dot{m}_4 \left(\frac{R_{l,s}}{R_{l,s} + 1} \right) \frac{c}{\rho} + k_c a_m M_s (k w_S - c) \right] \quad [4]$$

donde la densidad de líquido ρ y la masa del mismo contenida en el extractor, M_l , han sido consideradas constantes. Si se considera además que

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_1$$

por reemplazo en las ecuaciones [2] y [4] se obtiene

$$\frac{dw_S}{dt} = \frac{1}{M_s} \left[\dot{m}_1 w_{S,1} - (\dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_1) \left(\frac{1}{R_{l,s} + 1} \right) w_S + k_c a_m M_s (k w_S - c) \right] \quad [5]$$

$$\frac{dc}{dt} = \frac{\rho}{M_l} \left[\dot{m}_2 w_{S,2} - (\dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_1) \left(\frac{R_{l,s}}{R_{l,s} + 1} \right) \frac{c}{\rho} + k_c a_m M_s (k w_S - c) \right] \quad [6]$$

Se definen las siguientes variables con la finalidad de expresar las ecuaciones [5] y [6] en forma adimensional,

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{w_S}{w_{S,1}} & ; & \quad 0 \leq \phi \leq 1 \\ \gamma &= \frac{c}{c^*} = \frac{c}{k w_S} & ; & \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \\ \theta &= \frac{t D a_m k}{d} & ; & \quad \theta \geq 0 \end{aligned}$$

donde ϕ es una fracción másica adimensional de saponinas en la quinua en grano; γ , la concentración adimensional de saponinas en solución; y θ , un tiempo adimensional relacionado con el transporte molecular de masa de interfase. Se define también un tiempo asociado con este transporte, haciendo referencia a un mecanismo difusivo de interfase

$$T_D = \frac{d}{D a_m k}$$

y de una manera similar, un tiempo medio de residencia de granos de quinua en el extractor,

$$T_A = \frac{M_s}{\dot{m}_1}$$

y un tiempo medio de residencia asociado con la recirculación de solvente en la corriente 2

$$T_C = \frac{M_l}{\dot{m}_2}$$

así como un tiempo medio de residencia asociado con la reposición de solvente

$$T_R = \frac{M_l}{\dot{m}_3}$$

Estos tiempos son puestos en forma adimensional, dividiéndolos entre el tiempo difusivo

$$\tau_A = \frac{T_A}{T_D} \quad ; \quad \tau_C = \frac{T_C}{T_D} \quad ; \quad \tau_R = \frac{T_R}{T_D}$$

Asimismo, se definen los siguientes parámetros,

$$K = \frac{\rho}{k} \quad ; \quad W = \frac{w_{S,2}}{w_{S,1}}$$

y se introduce el grupo adimensional de Sherwood, Sh , que constituye el cociente adimensional del transporte por convección de masa a aquel de naturaleza molecular, en base a gradientes de concentración

$$Sh = \frac{k_c d}{D}$$

donde k_c es la constante de velocidad de transferencia de materia; d , el diámetro medio equivalente de los granos de quinua; y D , la difusividad de saponinas en solución acuosa.

Por reemplazo de las anteriores expresiones en las ecuaciones [5] y [6] se obtiene

Este conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias simultáneas no lineales constituye el modelo del extractor de saponinas de quinua en grano, sometido a recirculación de solvente regenerado. Como se puede apreciar, incluye los parámetros relevantes de diseño tanto del extractor **como sí**, cuanto de otras corrientes del sistema de proceso. Su solución requiere de algoritmos numéricos, como se verá más adelante.

[7]

$$\begin{aligned} \frac{d\phi}{d\theta} &= \frac{1}{\tau_A} - \left(\frac{1}{\tau_A} + \frac{R_{l,s}}{\tau_C} + \frac{R_{l,s}}{\tau_R} \right) \\ &\left(\frac{1}{R_{l,s} + 1} \right) \phi - Sh(1 - \gamma) \phi \quad ; \quad \phi(0) = 1 \end{aligned}$$

[8]

$$\begin{aligned} \frac{d\gamma}{d\theta} &= KW \tau_C \frac{1}{\phi} - \left(\frac{1}{\tau_A} + \frac{R_{l,s}}{\tau_C} + \frac{R_{l,s}}{\tau_R} \right) \\ &\left(\frac{1}{R_{l,s} + 1} \right) \gamma - KSh(1 - \gamma) \quad ; \quad \gamma(0) = 0 \end{aligned}$$

3. Conjunto de descontaminación de soluciones de saponinas

Como se puede apreciar en la Figura 1, este conjunto consta de un reactor tubular y un clarificador/sedimentador. El modelado correspondiente no se incluye de momento porque aún se está trabajando en el aumento de escala del proceso, y por lo tanto el “*know how*” generado no se encuentra protegido por la propiedad intelectual correspondiente. A efectos del presente trabajo baste decir que las pruebas iniciales permiten eliminar más del 90% de saponinas contenidas en soluciones acuosas diluidas, separándolas de una manera eficiente bajo ciertas condiciones operativas.

Simulación

La simulación del proceso se refiere a la investigación paramétrica del proceso utilizando información inicialmente disponible. Requiere de soluciones reiteradas del modelo y permite ahorrar mucho tiempo de desarrollo y uso de recursos de I+D. Acá no se utilizarán parámetros derivados de la investigación aplicada realizada sino de una manera aproximada, en razón de no haberse concluido aún el trabajo correspondiente.

Para la solución del modelo se utilizan paquetes de álgebra por computadoras, en este caso Mathcad® 14m de la firma PTC. El siguiente es un ejemplo de la sencilla solución para un típico conjunto de parámetros, utilizando un algoritmo Runge-Kutta adaptativo de 5° orden. En algún caso el sistema se comporta de una manera rígida (“*stiff*”) y se requiere de algoritmos

adecuados para estas circunstancias, habiéndose en esos casos utilizado métodos implícitos de Runge-Kutta y otro debido a Bulirsch y Stör.

La hermenéutica de solución diseñada por Mathcad es muy simple, como se aprecia a continuación

$$R_{1s} := 3 \quad \tau_A := 6 \quad \tau_C := 0.04$$

$$\tau_R := 0.4 \quad K := 2 \quad W := 0.01 \quad Sh := 4$$

Giver:

$$\gamma(\theta) = \frac{K \cdot W \cdot \tau_C}{\phi(\theta)} - \left(\frac{1}{\tau_A} + \frac{R_{1s}}{\tau_C} + \frac{R_{1s}}{\tau_R} \right) \cdot \left(\frac{1}{R_{1s} + 1} \right) \cdot \gamma(\theta) + K \cdot Sh \cdot (1 - \gamma(\theta))$$

$$\phi(\theta) = \frac{1}{\tau_A} - \left(\frac{1}{\tau_A} + \frac{R_{1s}}{\tau_C} + \frac{R_{1s}}{\tau_R} \right) \cdot \left(\frac{1}{R_{1s} + 1} \right) \cdot \phi(\theta) - Sh \cdot (1 - \gamma(\theta)) \cdot \phi(\theta)$$

$$\phi(0) = 1$$

$$\gamma(0) = 0$$

$$\begin{pmatrix} \phi \\ \gamma \end{pmatrix} := \text{Odesolve} \left[\begin{pmatrix} \phi \\ \gamma \end{pmatrix}, \theta, 0, 25 \right]$$

Las funciones generadas $\phi(\theta)$ y $\gamma(\theta)$ aparecen graficadas en la Figura 2 para el conjunto de parámetros especificado.

Con la finalidad de verificar en principio el desempeño del modelo se investigará el efecto introducido al variar dos parámetros operativos clave: el grado de agitación, recogido en el grupo adimensional de Reynolds (Re) y de esta manera en aquel de Sherwood (Sh), y la relación Solvente/Alimentación, R_{1s} .

Al incrementar el grupo adimensional Sh, el tiempo de extracción disminu-

ye, como cabría esperar, aunque la eliminación de cantidades residuales marginales de saponinas sigue presentando rendimientos decrecientes (Gráfico 3). Se incrementa también la concentración de la solución de extracción.

Lo anterior tiene una explicación razonable, ya que en este caso el incremento del grupo adimensional de Sherwood (Sh) se asocia principalmente a aquella del grupo adimensional de Reynolds (Re), debido a que el grupo adimensional de Schmidt (Sc), del cual es también función Sh, y que depende fundamentalmente de las propiedades fisicoquímicas de las soluciones de extracción, no varía grandemente. Recuérdese que $Sh = Sh(Re, Sc)$.

En el Gráfico 4 se consigna el efecto del incremento de la relación Solvente/Alimentación $R_{l,s}$. En este caso se utilizó una relación $R_{l,s} = 7$, utilizada con frecuencia en la práctica industrial.

Nótese la reducción observada en los tiempos de extracción, así como la disminución de la concentración de las soluciones de extracción, coincidentes con la experiencia operativa.

Conclusiones

En general el modelo parece reflejar de una manera razonable y cualitativa el comportamiento de la extracción de saponinas de quinua observado en la práctica experimental. Las tendencias esperadas son reproducidas adecuadamente y no resienten la lógica. En principio parecería posible reducir el consumo de agua a una décima parte del actual, objetivo éste que debería probarse de forma experimental en planta piloto.

El buen comportamiento del modelo invitaría a tentar su validación experimental. Sin embargo, algunas suposiciones aceptadas en la derivación del modelo pueden resultar discutibles, en especial aquella asociada con el transporte molecular de interfase, reconocido por su inercia considerable, que parecería no concordar con los cortos tiempos de contacto a elevados valores del grupo de Reynolds observados experimentalmente, y que permiten una transferencia de masa adecuada. Probablemente una primera etapa de extracción consiste más bien en un mecanismo próximo al de disolución de especies puras,

Gráfico 2: Extracción con grupo adimensional $Sh=4$ y $R_{l,s}=3$

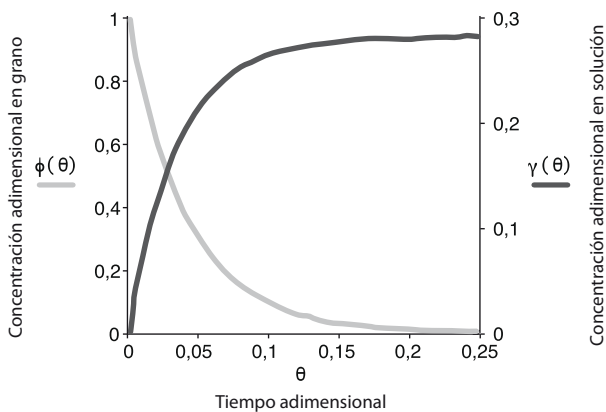


Gráfico 3: Extracción con grupo adimensional $Sh=10$ y $R_{1,s}=3$

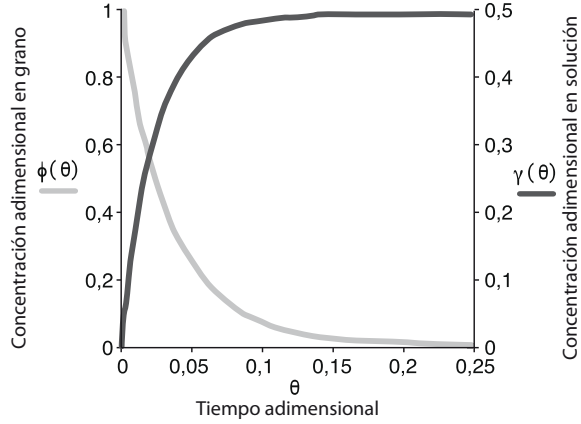
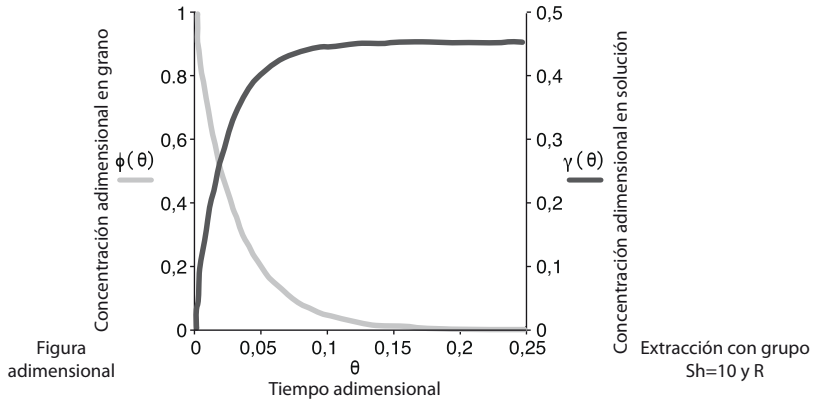


Gráfico 4: Extracción con grupo adimensional $Sh=10$ y $R_{1,s}=7$



proporcional al área de contacto de interfase, y que corresponde a concentraciones de equilibrio locales de interfase muy superiores a aquellos definidos con base en concentraciones medias en el grano de quinua. Téngase en mente que las saponinas de quinua se disponen principalmente en forma externa al perisperma, con una parte menor por debajo de esta membrana. La fracción exterior podría retirarse mediante mecanismos más efectivos que aquél debido

simplemente a gradientes de concentración.

Un mecanismo de arrastre/disolución externa de transferencia de masa eliminaría la inercia difusiva y podría concordar mejor con las observaciones experimentales. Su derivación y tratamiento sigue, sin embargo, etapas análogas a las empleadas en la deducción del modelo y constituye una variante menor, que merecería, empero, considerarse.

Notación

a_m = superficie específica de transferencia de masa
 c = concentración de saponinas en fase acuosa en el extractor
 c_S^* = concentración de saponinas en solución y en equilibrio en la interfase sólido/líquido
 k = constante de equilibrio tipo Ley de Henry para saponinas en interfase sólido/líquido
 K = parámetro adimensional de la densidad de solución y constante de equilibrio de interfase
 k_c = constante de transferencia de masa en base a diferencias de concentración
 m_S = masa de saponinas en el extractor
 $m_{S,s}$ = masa de saponinas en fase sólida en el extractor
 $m_{S,l}$ = masa de saponinas en fase líquida en el extractor
 \dot{m}_i = flujo másico de la corriente i
 $\dot{m}_{S,1}$ = flujo másico de la especie i en la corriente j
 M_l = masa de solución en el tanque extractor
 M_s = masa de sólidos en el tanque extractor
 \dot{M}_T = velocidad de transferencia de saponinas
 Re = grupo adimensional de Reynolds
 $R_{l,s}$ = relación másica de líquidos a sólidos en el extractor
 Sc = grupo adimensional de Schmidt
 Sh = grupo adimensional de Sherwood
 T_A = tiempo medio de residencia de sólidos en el extractor

T_C = tiempo medio de residencia de solvente recuperado de recirculación
 T_D = tiempo asociado con transporte difusivo de interfase
 W = relación adimensional de fracciones de masa de saponinas en corriente de recirculación y alimentación

Letras griegas

γ = concentración adimensional de soluciones de saponinas en el extractor
 ρ = densidad del solvente en el extractor
 φ = fracción adimensional de saponinas en granos de quinua en el extractor
 θ = tiempo adimensional de extracción
 τ_A = tiempo adimensional medio de residencia de granos de quinua en el extractor
 τ_C = tiempo adimensional medio de residencia de solvente de recirculación
 τ_R = tiempo adimensional medio de residencia de solvente de reposición

Subíndices

A = relativo a la fase sólida (granos de quinua)
 C = relativo al solvente de recirculación
 l = fase líquida
 s = relativo a la fase sólida
 S = relativo a las saponinas
 R = relativo al solvente de reposición.

Referencias bibliográficas

Birk, Y. 1980. "Saponins". En: I. E. Liener, "Toxic Constituents of Plant Foodstuffs", pp. 179, 186-188, Second Edition, New York and London: Academic Press.

Gonnermann, M. 1919. "Die Saponine von *Chenopodium Quinoa* (Reismelde), *Euphorbia* (*Tithymalus Helioscopius*), *helioscopia*, *Euphorbia Peplus*, *Mercurialis Perennis*". *Biochemische Zeitschrift*, Mayo , pp. 25-27.