



# Resolución de operaciones de extracción sólido-líquido por contacto múltiple y circulación en contracorriente.

<b>Apellidos, nombre</b>	Castelló Gómez, Marisa (mcasgo@upv.es) Fito Suñer, Pedro (pedfisu@tal.upv.es) Betoret Valls, Noelia (noebeval@tal.upv.es) Seguí Gil, Lucía (lusegil@upvnet.upv.es)
<b>Departamento</b>	Departamento de Tecnología de Alimentos
<b>Centro</b>	Universitat Politècnica de València



## 1 Resumen

En este artículo vamos a aprender a **resolver procesos de extracción sólido-líquido por contacto múltiple y circulación en condiciones de contracorriente**. En este tipo de operaciones puede darse que, dado un número de etapas de extracción y un rendimiento determinado, se desee **calcular la cantidad de disolvente necesario para realizar la extracción** y la composición de todas las corrientes que implicadas en el sistema. O bien que, fijado el rendimiento y la relación de caudales entre las corrientes, se pretenda **calcular el número de etapas** necesarias para llevar a cabo el proceso. Introduciremos además el concepto de **cantidad de disolvente mínima** para llevar a cabo una extracción determinada.

## 2 Introducción

En las operaciones de extracción sólido-líquido en la industria agroalimentaria, el rendimiento de extracción está determinado fundamentalmente por dos de las variables de proceso:

- El número de etapas en las que refinado y extracto se ponen en contacto
- La cantidad de disolvente empleada por cada kilogramo de refinado

**Ambas variables actúan en el sentido de favorecer el proceso de extracción**, es decir, cuanto mayor sea el número de etapas y mayor el caudal de la corriente de extracto, mayor será el porcentaje de extracción.

El efecto de estas variables **sobre los costes fijos y los costes variables** de la operación es muy diferente. Dado un porcentaje de extracción determinado, un aumento en el número de etapas aumentará los costes fijos y reducirá los costes variables al disminuir la cantidad de disolvente necesaria. Por el contrario, un aumento en la cantidad de disolvente incrementará los costes variables o de funcionamiento y reducirá los costes fijos al disminuir el número de etapas necesarias. El efecto sobre los costes es tal que, en el diseño de cualquier instalación, existe una **combinación número de etapas-cantidad de disolvente que minimiza los costes totales y que debe ser considerada como óptima** desde el punto de vista económico.

Sin embargo, en muchas ocasiones, aspectos técnicos de diseño o de disponibilidad de materias primas pueden obligar a establecer como predeterminada una de las variables consideradas. En estos casos será necesario afrontar el cálculo de la otra variable.

En el caso en que el número de etapas esté establecido y sea necesario determinar la cantidad requerida de disolvente, puede resultar conveniente establecerla a partir de **la cantidad de disolvente mínima**. Esta situación resulta particularmente importante en aquellos casos en los que el soluto presenta una **solubilidad baja** en el disolvente considerado o cuando la naturaleza del refinado confiera a éste una **alta capacidad para retener fase líquida**.

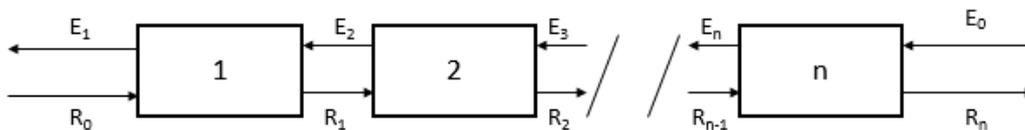
### 3 Objetivos

Una vez que leas con detenimiento este objeto de aprendizaje podrás:

- Conocer las particularidades que presenta la operación de extracción sólido-líquido por contacto múltiple en condiciones de contracorriente con respecto a la extracción múltiple utilizando disolvente nuevo en cada etapa.
- Resolver una operación de extracción sólido-líquido por contacto múltiple y circulación en condiciones de contracorriente.
- Calcular la cantidad mínima de disolvente requerida en cualquier proceso de extracción sólido-líquido.

### 4 Desarrollo

En las operaciones de extracción sólido-líquido por contacto múltiple y con circulación en condiciones de contracorriente suelen obtenerse **rendimientos más elevados** que en las operaciones que se realizan por contacto múltiple utilizando disolvente nuevo en cada etapa. Este mayor rendimiento se debe a que la corriente de extracto inicial, que tiene una mayor capacidad extractiva por presentar una concentración de soluto menor o incluso nula, se pone en contacto con la corriente de refinado que se introduce en la última etapa de extracción, que está más agotada y tiene un menor contenido en soluto (Figura 1). De esta forma, se maximiza el gradiente responsable del transporte del soluto desde la corriente sólida o de refinado hasta la corriente líquida o de extracto, favoreciéndose el proceso de extracción y en consecuencia aumentando el rendimiento.



**Figura 1.** Diagrama de flujo de un proceso de extracción sólido-líquido por contacto múltiple con circulación en contracorriente.

#### 4.1 Particularidades en la aplicación del método gráfico de resolución.

La utilización del diagrama triangular-rectangular para la resolución de las operaciones de extracción por contacto múltiple y circulación en contracorriente requiere de la definición teórica de dos corrientes auxiliares diferentes a las corrientes de refinado y extracto que intervienen directamente en el proceso de extracción. Estas dos corrientes son:

1. **La corriente mezcla (M).** La corriente mezcla imaginaria se obtiene como suma de las corrientes de refinado y extracto que entran al proceso, y a su vez de las corrientes de refinado y extracto que abandonan el proceso. Se trata de una mezcla imaginaria porque dichas corrientes no se ponen directamente en contacto y no se mezclan realmente. Resulta de aplicar un balance de masa a la totalidad del proceso de extracción múltiple representado en la Figura 1 (ecuación 1).

$$R_0 + E_0 = R_n + E_1 = M \quad (1)$$



2. **La corriente polo ( $\Delta$ ).** Es la corriente que resulta de la diferencia entre las corrientes de refinado y extracto comprendidas entre dos etapas de extracción consecutivas. Resulta de aplicar balances de masa a las sucesivas etapas de extracción (ecuaciones 2-5).

$$\text{En la etapa 1: } R_0 + E_2 = R_1 + E_1; R_0 - E_1 = R_1 - E_2 \quad (2)$$

$$\text{En la etapa 2: } R_1 + E_3 = R_2 + E_2; R_1 - E_2 = R_2 - E_3 \quad (3)$$

$$\text{En la etapa n: } R_{n-1} + E_0 = R_n + E_n; R_{n-1} - E_n = R_n - E_0 \quad (4)$$

$$\text{y por tanto: } R_0 - E_1 = R_1 - E_2 = R_2 - E_3 = \dots = R_{n-1} - E_n = R_n - E_0 \equiv \Delta \quad (5)$$

Adicionalmente, la resolución gráfica de este tipo de procesos de extracción, al igual que la extracción por contacto simple y la extracción por contacto múltiple con disolvente nuevo en cada etapa, requieren de la representación en el diagrama triangular-rectangular de **la curva de retención y de las rectas de reparto**. La curva de retención es una curva experimental que proporciona información de cómo las corrientes de refinado retienen fase líquida, y las rectas de reparto establecen la condición de equilibrio (ecuación 6) entre las corrientes de refinado y extracto que salen de una misma etapa de extracción ideal.

$$\frac{x_s}{y_s} = \frac{x_d}{y_d} \quad (6)$$

## 4.2 Procedimiento gráfico de resolución de un proceso de extracción múltiple con circulación en contracorriente

Supongamos un proceso de extracción sólido-líquido como el representado en la Figura 1. Consideremos que se ha fijado un rendimiento de extracción determinado, así como los caudales y composiciones de las corrientes de refinado y extracto iniciales. A continuación, se indican los pasos a seguir para calcular el número de etapas necesarias y las composiciones y caudales de todas las corrientes implicadas en el proceso.

1º. Situar en el diagrama triangular-rectangular los puntos que representan la composición de las corrientes  $R_0$  y  $E_0$ . Para ello, necesitaremos conocer las fracciones másicas de dos de los tres componentes que forman parte de cada una de las corrientes. Además, tendremos en cuenta que en el diagrama triangular-rectangular las fracciones másicas de disolvente y soluto se representan en los catetos correspondientes a los ejes de ordenadas y abscisas, respectivamente, y las fracciones másicas de inerte en una escala perpendicular a la hipotenusa que sitúa el 0 en ésta.

2º. Dibujar en el diagrama triangular-rectangular la curva de retención. Debe haberse obtenido experimentalmente y nos da información de la capacidad de retención de fase líquida por parte de la corriente sólida o refinado. Todos los puntos que representen la composición de corrientes de refinado en el proceso de extracción se encontrarán sobre la curva de retención.

3º. Situar sobre la curva de retención el punto que representa la corriente de refinado final ( $R_n$ ). Podemos conocer directamente la composición de esta corriente o bien obtenerla a partir del rendimiento. En caso de que conozcamos el rendimiento seguiremos el siguiente procedimiento:

Definimos una corriente  $R_n'$  (refinado desolventizado) que coincide con la corriente  $R_n$  pero sin disolvente. La relación entre las fracciones másicas de soluto e inertes en ambas corrientes es similar, por lo que cumplen la siguiente ecuación:

$$\frac{x_{sn}}{x_{in}} = \frac{x'_{sn}}{x'_{in}} \quad (7)$$



En el diagrama triangular-rectangular, el refinado sin disolvente  $R_n'$  se localiza sobre el cateto horizontal (eje de abscisas), mientras que el refinado final  $R_n$  se encuentra en la curva de retención. Para determinar el punto exacto, debe obtenerse la intersección de la recta que une  $R_n'$  con el vértice superior (disolvente puro,  $E_0'$ ) y la curva de retención, puesto que  $R_n$  se puede obtener a partir de la mezcla de  $R_n'$  con disolvente puro. Para calcular la composición de la corriente  $R_n'$  tendremos en cuenta las siguientes relaciones (8-10):

$$\eta = \frac{R_0 \cdot x_{s0} - R_n \cdot x_{sn}}{R_0 \cdot x_{s0}} = \frac{R_0 \cdot x_{s0} - R_n' \cdot x'_{sn}}{R_0 \cdot x_{s0}} \quad (8)$$

$$R_0 \cdot x_{i0} = R_n' \cdot x'_{in} \quad (9)$$

$$x'_{sn} + x'_{in} = 1 \quad (10)$$

una vez obtenido el valor de  $x'_{sn}$ , se sitúa  $R_n'$  en el diagrama, se une con el vértice superior del triángulo, y el corte con la curva de retención indicará el punto  $R_n$ .

4°. Situar en el diagrama el punto que representa la composición de la corriente mezcla (M). Para ello, tendremos en cuenta, de acuerdo con la ecuación del balance de masa total (ecuación 1), que este punto se encuentra sobre la recta que une las corrientes  $R_0$  y  $E_0$ , y calcularemos su fracción másica en soluto ( $z_s$ ) a partir de la ecuación de balance de soluto (ecuación 11).

$$R_0 \cdot x_s + E_0 \cdot y_s = M \cdot z_s \quad (11)$$

5°. Situar el punto que representa la composición de la corriente  $E_1$ . Para ello, y de acuerdo con la ecuación 1, tendremos en cuenta que el punto M está sobre la recta que une  $E_1$  con  $R_n$ . Además, la corriente  $E_1$  por ser una corriente de extracto, no contiene inerte y se encuentra sobre la hipotenusa del triángulo. Para el cálculo del caudal de la corriente  $E_1$  es necesaria la resolución analítica de las ecuaciones de balance de masa total y de soluto en la totalidad del proceso.

6°. Situar el punto que representa la composición de la corriente  $R_1$ . Tendremos en cuenta que como  $E_1$  y  $R_1$  son corrientes que salen de una misma etapa de contacto que se considera ideal, por lo que cumplen la relación de equilibrio (ecuación 6) y en el diagrama triangular-rectangular se encuentran sobre una recta que une el origen de coordenadas con un punto de la hipotenusa (en este caso  $E_1$ ). Además,  $R_1$  estará sobre la curva de retención.

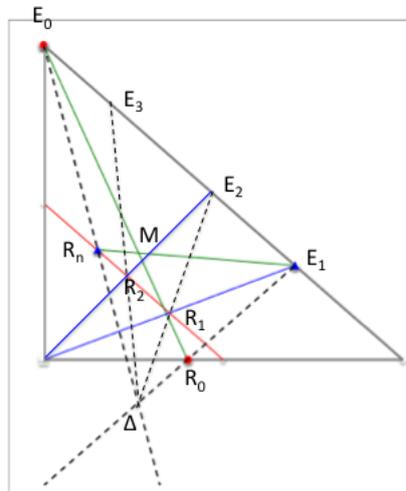
7°. Definir el punto que representa la corriente polo ( $\Delta$ ). De acuerdo con la ecuación 5, este punto se encuentra sobre la recta que une los puntos  $E_0$  y  $R_n$  y también sobre la recta que une  $R_0$  con  $E_1$ . Trazamos las rectas correspondientes ( $\overline{E_0 R_n}$  y  $\overline{R_0 E_1}$ ) y la intersección entre ambas representará la corriente  $\Delta$ . Puede ocurrir que el punto de intersección se encuentre fuera del área del triángulo o incluso que las rectas sean casi paralelas y el punto de intersección no pueda situarse en el área de trabajo. En este último caso, cuando sea necesario utilizar el  $\Delta$  para poder definir un punto que representa a otra corriente, se trabajará manteniendo la proporcionalidad geométrica entre las dos líneas extremas del polo, es decir  $\overline{E_0 R_n}$  y  $\overline{R_0 E_1}$ .

8°. Situar el punto que representa la composición de la corriente  $E_2$ . Unimos el  $\Delta$  con  $R_1$  y prolongamos la recta hasta la hipotenusa. El corte con ésta corresponde al punto que representa la composición de la corriente  $E_2$ .

9°. Cálculo de los caudales de las corrientes  $R_1$  y  $E_2$ . Será necesaria la resolución analítica de las ecuaciones de balance de masa total y de soluto en la etapa 1 (ecuación 2).

10°. Repetir los pasos 6°, 8° y 9° hasta que obtengamos una corriente de refinado con una fracción másica de soluto igual o menor a la de  $R_n$ .

Para ilustrar el procedimiento descrito, se resume gráficamente en la Figura 2, donde se han ubicado las corrientes implicadas en el diagrama triangular.



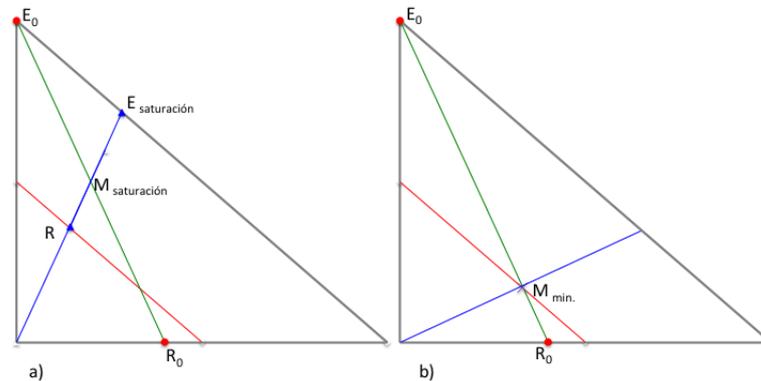
**Figura 2.** Representación en el diagrama triangular-rectangular de la corriente mezcla imaginaria  $M$  (intersección de las rectas en color verde), las corrientes de refinado (intersección de las rectas de reparto (en azul) con la curva de retención (en rojo)) y de las corrientes de extracto (intersección de las rectas discontinuas que salen del polo  $\Delta$  con la hipotenusa del triángulo).

### 4.3 Cálculo de la cantidad de disolvente mínima para llevar a cabo un proceso de extracción sólido-líquido

En el apartado de introducción se ha indicado que, en ocasiones, puede resultar conveniente establecer el caudal de disolvente ( $E_0$ ) a partir de **la cantidad de disolvente mínima** necesaria para llevar a cabo el proceso de extracción. Esta cantidad de disolvente mínima puede determinarse atendiendo a dos criterios diferentes:

1. La solubilidad del soluto en el disolvente. Cuando **la solubilidad del soluto en el disolvente no es muy alta**, es necesario asegurar que el caudal de disolvente empleado es suficiente para disolver todo el soluto. De este modo, podrá asumirse en la resolución de cualquier etapa ideal, que las corrientes de refinado y extracto que salen de la etapa cumplen la relación de equilibrio. La cantidad mínima de disolvente necesaria para llevar a cabo el proceso se calcula teniendo en cuenta la **concentración de saturación del soluto en la fase líquida** (Figura 3a).
2. La capacidad de la corriente sólida o refinado para retener fase líquida o extracto. Cuando **la corriente sólida tiene una gran capacidad para retener fase líquida**, puede ocurrir que todo el disolvente quede retenido en la misma de forma que, tras realizar la mezcla de las corrientes que entran a una etapa de extracción, no sea posible realizar la separación de fases y por tanto la extracción de soluto. En este caso, la cantidad mínima de disolvente necesaria para llevar a cabo el proceso se calcula **situando la corriente mezcla ( $M$ ) sobre la curva de retención**. En estas condiciones, el punto que representa la composición de la corriente de refinado coincidiría con  $M$ , siendo imposible separar una corriente líquida (Figura 3b).

En aquellos procesos en los que confluyan los dos criterios será necesario calcular la cantidad de disolvente mínima necesaria teniendo en cuenta cada uno de ellos por separado. El mayor valor de los dos obtenidos definirá el caudal mínimo necesario.



**Figura 3.** Representación en el diagrama triangular-rectangular del procedimiento para el cálculo de la cantidad de disolvente mínima necesaria atendiendo a criterios de solubilidad **a)** o a la capacidad del sólido para retener fase líquida **b)**.

## 4.4 Caso práctico de aplicación

### Veamos un ejemplo de aplicación.

En una fábrica de extracción de aceite de semillas se trabaja con semillas que tienen un contenido medio en aceite del 23,6%. Diariamente se procesan 47694 kg de semillas y la jornada laboral total es de 15 horas.

Se desea extraer el 90% del aceite contenido en las semillas y que la concentración de salida del aceite en el disolvente sea un 90% de la concentración de saturación.

Si el equipo de extracción funciona por etapas en contracorriente, **¿qué cantidad de disolvente habrá que utilizar? ¿cuántas etapas serán necesarias?**

Datos y notas:

- concentración de saturación: 44 kg aceite/100 kg extracto
- las semillas retienen 30 kg disolvente por 30 kg inerte
- el disolvente contiene inicialmente un 3% en aceite vegetal

### Resolución:

En primer lugar, es necesario identificar las corrientes que intervienen y dibujar el diagrama de flujo de la operación.

Corriente de refinado: semillas

Soluto: aceite

Disolvente: no especificado

Inerte: todos aquellos componentes de las semillas que no se disuelven en el disolvente

Los datos numéricos resultantes del enunciado se incluyen en la siguiente tabla:

	REFINADO: semillas	EXTRACTO
<b>CAUDAL</b>	$R_0 = 3179.6 \text{ kg/h}$	$E_0$
<b>COMPOSICIÓN:</b>	$x_{s0} = 0.236 \text{ kg aceite/kg}$	$y_{s0} = 0.03 \text{ kg aceite/kg}$
<b>Soluto</b>	$x_{d0} = 0 \text{ kg disolvente/kg}$	$y_{d0} = 1 - 0.03 = 0.97 \text{ kg disolvente/kg}$
<b>Disolvente</b>	$x_{i0} = 0.764 \text{ kg inerte/kg}$	$y_{s1} = 0.9 \cdot 0.44 = 0.396 \text{ kg aceite/kg}$
<b>inerte</b>		
<b>RENDIMIENTO</b>		90%
<b>CURVA DE</b>		$\frac{x_d}{x_i} = 1$
<b>RETENCIÓN</b>		



Para calcular la cantidad de disolvente y el número de etapas, seguimos los pasos indicados en el apartado 4.2.

1. Situar los puntos que representan la composición de las corrientes  $R_0$  y  $E_0$ .

Las composiciones de las dos corrientes son conocidas y las podemos representar directamente en el diagrama.

2. Dibujar la curva de retención

La parte del enunciado que da información sobre la curva de retención es: "las semillas retienen 30 kg disolvente por 30 kg inerte". Se trata de una recta que une un punto del eje de ordenadas con el vértice inferior derecho y viene representada por la siguiente ecuación:  $\frac{x_d}{x_i} = 1$ . Determinamos el punto de corte de esta recta con el eje de ordenadas y obtenemos:  $x_d = 0.5$

3. Situar el punto que representa la composición de la corriente  $R_n$ .

No conocemos directamente la composición de la corriente  $R_n$  pero conocemos el rendimiento. Para calcular la composición en soluto de  $R_n$  a partir del rendimiento:

Definimos  $R_n'$  como una corriente igual a  $R_n$  pero sin disolvente. De acuerdo con lo especificado en el apartado 4.2, calcularemos la composición en soluto de la corriente  $R_n'$ , situaremos en el diagrama el punto que representa esta corriente, lo uniremos con el vértice superior y el corte con la curva de retención nos dará la corriente  $R_n$ .

- Cálculo de la composición de la corriente  $R_n'$ :

$$\eta = \frac{R_0 \cdot x_{s0} - R_n \cdot x_{sn}}{R_0 \cdot x_{s0}} = \frac{R_0 \cdot x_{s0} - R_n' \cdot x'_{sn}}{R_0 \cdot x_{s0}} = \frac{3179.6 \cdot 0.236 - R_n' \cdot x'_{sn}}{3179.6 \cdot 0.236} = 0.9$$

$$R_0 \cdot x_{i0} = 3179.6 \cdot (1 - 0.236) = R_n' \cdot x'_{in}$$

$$x'_{sn} + x'_{in} = 1$$

Con este sistema de tres ecuaciones y tres incógnitas obtenemos  $x'_{sn} = 0.03$  kg soluto/kg

Ya podemos situar  $R_n'$  en el diagrama, lo unimos con el vértice superior y el corte con la curva de retención nos dará  $R_n$ .

Obtenemos:

$$R_n: x_{sn} = 0.015 \text{ y } x_{dn} = 0.49$$

4. Situamos  $E_1$  y  $R_1$

De  $E_1$  conocemos su fracción másica en soluto y sabemos que esta sobre la hipotenusa.

$R_1$  y  $E_1$  están en equilibrio y por tanto sobre una recta que pasa por el origen de coordenadas. Además,  $R_1$  está sobre la curva de retención.

5. Situar el punto que representa la composición de la corriente  $M$

Situar  $M$  nos servirá para calcular el caudal de disolvente  $E_0$ .

La corriente  $M$  resulta de plantear balances en todo el proceso. Se encuentra sobre la recta que une  $\overline{E_0 R_0}$  y  $\overline{E_1 R_n}$ .

$$\text{Obtenemos } z_s = 0.125$$

Podemos calcular el caudal  $E_0$  mediante las ecuaciones del balance de materia total y del balance de soluto:

$$R_0 + E_0 = M$$

$$R_0 \cdot x_{s0} + E_0 \cdot y_{s0} = M \cdot z_s$$

obtenemos:  $E_0 = 3711.04$  kg disolvente/h

Ya podemos calcular el número de etapas necesarias para llegar a  $R_n$ .

6. Definimos la corriente  $\Delta$

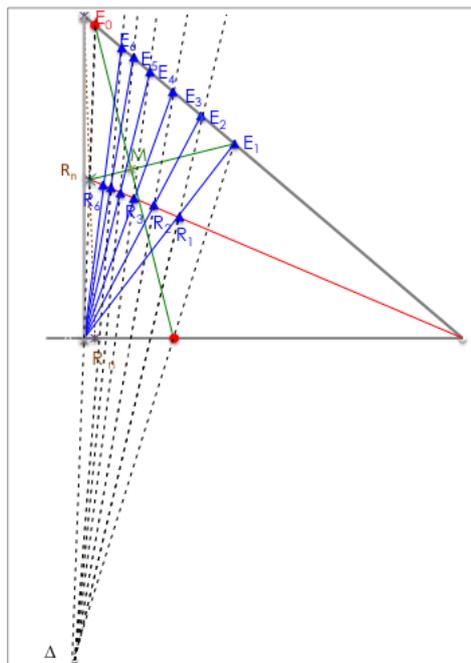
Planteando balances de materia total en cada una de las etapas:

$$R_0 - E_1 = R_1 - E_2 = R_2 - E_3 = \dots = R_{n-1} - E_n = R_n - E_0 \equiv \Delta$$

Este punto se encuentra sobre la recta que une los puntos  $E_0$  y  $R_n$  y también sobre la recta que une  $R_0$  con  $E_1$ . Trazamos las rectas correspondientes ( $\overline{E_0 R_n}$  y  $\overline{R_0 E_1}$ ) y la intersección entre ambas representará la corriente  $\Delta$ .

7. Situar el punto que representa la composición de la corriente  $E_2$ . Unimos el  $\Delta$  con  $R_1$  y prolongamos la recta hasta la hipotenusa. El corte con esta corresponde al punto que representa la composición de la corriente  $E_2$ .
8. Cálculo de los caudales de las corrientes  $R_1$  y  $E_2$ . Será necesaria la resolución analítica de las ecuaciones de balance de masa total y de soluto en la etapa 1. En este caso para calcular el número de etapas no necesitamos ir calculando los caudales, bastará con seguir el método gráfico de resolución.
9. Repetir los pasos 6, 9 y 10 hasta que obtengamos una corriente de refinado con una fracción másica de soluto igual o menor a la de  $R_n$ .

La ubicación de las corrientes involucradas en este caso de extracción sólido-líquida se representan en la Figura 4.



**Figura 4.** Representación en el diagrama- triangular del procedimiento gráfico de resolución seguido en el ejemplo de aplicación.



## 5 Cierre

A lo largo de este objeto de aprendizaje hemos aprendido el procedimiento gráfico de resolución de operaciones de extracción por contacto múltiple y con circulación en condiciones de contracorriente. Además, hemos podido conocer los criterios a tener en cuenta y la forma de calcular la cantidad de disolvente mínima necesaria en un proceso de extracción. Con estas directrices, ya estáis listos para el diseño de este tipo de operaciones. ¡¡Ánimo!!

## 6 Bibliografía

**Aguado, J., Calles, J., Cañizares, P., López, B., Santos, A., Serrano, D., & Rodríguez, F. (2010).** Ingeniería de la Industria Alimentaria Volumen II. Ed. Síntesis

**Ibarz, A., & Barbosa-Cánovas (2005).** Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. Ed. Mundi-Prensa Libros.

**Seguí, L. (2014).** Aplicación del Diagrama Triangular Rectangular a la Resolución de Problemas de Extracción Sólido-Líquido. Polimedia.  
<http://www.upv.es/visor/media/20b553b8-bcc6-494e-9907-99b2b386f9b0/v>