

## Propuesta para el aprovechamiento industrial del lactosuero.

## Proposal for taking advantage of whey.

Solís Oba, A.<sup>1</sup> , Solís Oba, M.M.<sup>2\*</sup> , Teniza García, O.<sup>3</sup>, Martínez Casares, R.M.<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, Delegación Coyoacán, Ciudad de México, México, C.P. 04960, México

<sup>2</sup> Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, Carretera Estatal Santa Ines Tecuexcomac-Tepetitla Km. 1.5, Tepetitla de Lardizábal, C.P. 90700, Tlaxcala, México.

<sup>3</sup> Universidad Tecnológica de Hujotzingo, Camino, Real San Mateo S/N, C.P.74169 Santa Ana Xalmimilulco, Puebla, México.



Please cite this article as/Como citar este artículo: Solís Oba, A., Solís Oba, M.M., Teniza García, O., Martínez Casares, R.M. (2023). Proposal for taking advantage of whey. *Revista Bio Ciencias*, 10 e1392. <https://doi.org/10.15741/revbio.10.e1392>

### Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: August 10<sup>th</sup> 2022.

Accepted/Aceptado: January 01<sup>h</sup> 2023.

Available on line/Publicado: January 23<sup>th</sup> 2023.

### RESUMEN

Por cada 10 litros de leche se obtiene aproximadamente un kilo de queso, el resto es lactosuero; éste último es rico en proteínas, carbohidratos y minerales y usualmente se desecha, ocasionando problemas de contaminación por su alto contenido de materia orgánica. El lactosuero de un fabricante de quesos en Tlaxcala se ultrafiltró, se obtuvo un lactosuero concentrado con 7.79 % de proteínas; este último se secó por aspersion obteniéndose el lactosuero concentrado en polvo con 47 % de proteínas; ambos productos cumplen con el mínimo de proteína indicado en la norma CXS 289-1995 (11 %), por lo que se pueden comercializar directamente o ser utilizado para reprocesamiento. Al agregar máximo 8 % de lactosuero concentrado para la elaboración de queso Oaxaca, se obtuvo un rendimiento promedio de 11.33 %, sin lactosuero el rendimiento fue de 11.46 %; en ambos casos la consistencia del queso obtenido fue similar entre ellos. También se encontró que al agregar 0.5 % de lactosuero concentrado en polvo al proceso de elaboración del queso, el rendimiento subió 4.16 % comparado con el uso de 1 % de leche en polvo. Al ultrafiltrar el lactosuero y secar las fracciones resultantes se obtienen productos que puede comercializar la empresa, además que se pueden emplear en la elaboración de queso Oaxaca, lo que implica un beneficio económico a la empresa. Además de las ventajas ambientales por la disminución en la contaminación por el desechado del lactosuero.

**PALABRAS CLAVE:** Lactosuero, proteínas, ultrafiltración, queso Oaxaca.

### \*Corresponding Author:

M. Myrna Solís Oba. Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, Carretera Estatal Santa Ines Tecuexcomac-Tepetitla Km. 1.5, Tepetitla de Lardizábal, C.P. 90700, Tlaxcala, México E- mail: [myrnasolis\\_ipn@yahoo.com](mailto:myrnasolis_ipn@yahoo.com)

---

## ABSTRACT

---

For every 10 liters of milk, approximately one kilogram of cheese is obtained, and the rest is whey; the whey is rich in proteins, carbohydrates, and minerals and is usually discarded, causing contamination problems due to its high content of organic matter. Whey from a cheese manufacturer in Tlaxcala was ultra-filtered, obtaining a concentrated whey with 7.79 % proteins; the latter was then spray-dried, obtaining concentrated whey powder with 47 % protein; both products comply with the minimum protein indicated in the CXS 289-1995 standard (11 %), so they can be directly marketed or used for reprocessing. The average yield of Oaxaca cheese adding between 5 and 8 % of concentrated whey was 11.33 %, and with no concentrated whey was 11.41 %; in both cases, the consistency of the cheese was similar between them. It was also found that by adding 0.5 % concentrated whey powder to the cheese-making process, the yield increased by 4.16 % compared to the use of 1 % milk powder. By ultra-filtering the whey and drying the resulting fractions, products obtained that can be marketed by the company, in addition to being used in the production of Oaxaca cheese, which implies an economic benefit for the company. In addition to the environmental advantages due to the decrease in contamination due to the disposal of whey.

---

**KEY WORDS:** Whey milk, proteins, ultrafiltration, Oaxaca cheese.

---

## Introducción

El queso es uno de los alimentos más antiguos y populares en el mundo, se obtiene por la coagulación de la leche con algunos coagulantes como el cuajo. Existen alrededor de 2000 diferentes tipos de queso en todo el mundo (García-Muñoz *et al.*, 2021), cuyas características, propiedades nutricionales, funcionales y sensoriales son típicas de cada uno. En general se clasifican en quesos maduros, semi-maduros y quesos frescos; los más consumidos en México son los quesos frescos (Ramírez-López & Vélez-Ruiz, 2012).

Durante la elaboración del queso, por cada 10 litros de leche se obtiene aproximadamente un kilogramo de queso, y el resto es lactosuero. En la industria láctea, el suero de leche ha sido considerado un desecho (Arce-Méndez *et al.*, 2016; Asas *et al.*, 2021), por ello ha sido poco aprovechado y es vertido al ambiente, con las consiguientes consecuencias ecológicas por su alta carga orgánica (alto contenido en lactosa y proteínas difícilmente biodegradables). Por lo anterior, el lactosuero es considerado el contaminante más importante de la industria láctea (Asas *et al.*, 2021). Específicamente, la Demanda Química de Oxígeno (COD) del lactosuero oscila entre 50,000 y 80,000 mg/L y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD) es de alrededor de 40,000 a 60,000 mg/L (Lappa *et al.*, 2019) por lo cual su disposición en plantas de tratamiento de agua es muy costosa.

La composición del lactosuero depende de su origen y forma de procesado, según el proceso este se ha clasificado en ácido y dulce; el primero se obtiene por adición de ácido y su pH promedio es  $>5$ ; mientras que el lactosuero dulce se obtiene por adición de enzimas y su pH promedio es de 5.8-6.6 (Mehra *et al.*, 2021). El lactosuero es rico en proteínas, grasas, lactosa y sales; debido a estas propiedades, el lactosuero se ha utilizado en otras industrias. Sus proteínas son muy valiosas para la industria farmacéutica, por sus efectos biológicos, anticancerígenos, antimicrobianos, antivirales, antioxidantes, retardantes de la osteoporosis, antiinflamatorios, antihipertensivos, antitrombóticos y reductores del colesterol (Królczyk *et al.*, 2016; Sultan *et al.*, 2016; Nabuco *et al.*, 2019; Rascon *et al.*, 2021). Varios estudios han demostrado que la hidrólisis enzimática de las proteínas del suero libera péptidos que presentan actividad biológica (Tovar *et al.*, 2017). En la industria alimentaria existen reportes sobre los beneficios del uso del lactosuero en el procesamiento de alimentos, como contribución a la cremosidad, textura, capacidad de retención de agua, la opacidad y la adhesión (Jeewanthi *et al.*, 2015). Además, el lactosuero tiene excelentes cualidades nutricionales y es fácil de digerir (Chatterjee *et al.*, 2015), por lo que lactosuero procesado se puede encontrar en el mercado en forma de polvo o como aislado proteico, que se utiliza en formulaciones de leche reconstituida, bebidas proteicas, en panadería, dulces, productos lácteos, diluyentes cárnicos y alimentación animal, entre otros (Arce-Méndez, *et al.*, 2016).

Para obtener un lactosuero rico en proteínas y lactosa se han aplicado diferentes tecnologías de tratamiento como: la microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y la osmosis inversa (Bejarano-Toro *et al.*, 2022). Otra técnica muy utilizada en la industria de alimentos, farmacéutica y la química es el secado por aspersion, donde un producto líquido, como el lactosuero, se atomiza y se hace pasar una corriente gaseosa caliente, puede ser a contraflujo, en paralelo o mixto, con lo cual se logra la eliminación rápida del agua y la formación de partículas sólidas (Ziaee *et al.*, 2019; Rios-Aguirre *et al.*, 2021). El tiempo de contacto es corto, y la evaporación del agua permite que el material no incremente de manera importante su temperatura, por lo que el daño al material es mínimo. Además, el secado por aspersion permite conservar productos y metabolitos de interés, ya que su reducido contenido de agua inhibe el crecimiento bacteriano (Fabela, 2017). Una de las aplicaciones importantes del secado por aspersion es la micro-encapsulación, esta consiste en atrapar una sustancia dentro de otra formando cápsulas de tamaño variable (desde 5000  $\mu\text{m}$  hasta 1  $\mu\text{m}$ ), el material de recubrimiento también es llamado material de pared. La finalidad del material de pared es proteger los compuestos que se encuentran dentro del núcleo, de factores como la humedad, pH o contacto con agentes químicos. Los materiales de pared generalmente son polímeros o co-polímeros, sintéticos o naturales, como los almidones, maltodextrinas y las gomas; (Esquivel-González *et al.*, 2015). Con éstas técnicas el lactosuero puede ser utilizado y dar un valor agregado a un producto que representa un desecho.

En Tlaxcala la mayoría de las empresas elaboradoras de queso desechan el lactosuero, ocasionando problemas ambientales por su inadecuada disposición; sin embargo, el lactosuero tiene un uso potencial y es un producto de valor agregado para las industrias productoras de quesos. El presente trabajo tuvo como objetivo reutilizar el lactosuero producido por una empresa

elaboradora de quesos en Tlaxcala como sustituto de leche para la elaboración de queso Oaxaca y para la fabricación de otros productos de la industria alimenticia.

## Material y Métodos

### Materiales

La leche y el lactosuero utilizados fueron obtenidos de una empresa elaboradora de quesos, ubicada en el municipio de Ixtacuixtla en Tlaxcala, México, sus quesos más comercializados son panela, Oaxaca y rancharo. Se recolectó la leche y el lactosuero de los tres tipos de queso, de tres lotes de producción.

Los quesos se elaboraron en la misma empresa con los insumos que utilizan comúnmente, dada la confidencialidad del proceso, estos no serán especificados. En el diagrama 1 se muestra el esquema general de la metodología que se siguió durante la investigación.

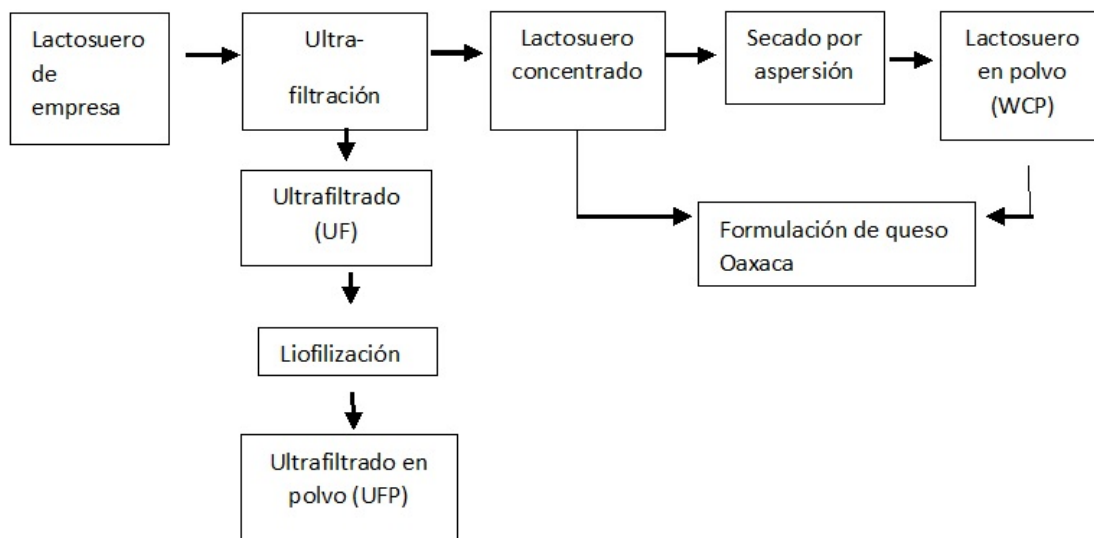


Figura 1. Metodología general para el aprovechamiento del lactosuero

### Caracterización fisicoquímica

Se hizo la caracterización fisicoquímica de: a) la leche, b) los lactosueros de la empresa, c) las fracciones de ultrafiltración, d) los lactosueros resultantes de la elaboración de quesos adicionado con el lactosuero concentrado (WC) y e) lactosuero en polvo (WCP). La caracterización se realizó con un equipo Milkoscan (S-54B, Foss Electric A/S, Hillerod). Los parámetros medidos

fueron: pH, % de grasa, % de proteína, % de lactosa, % de sales minerales, % de sólidos totales y % de humedad.

### **Ultrafiltración**

El lactosuero producido en la empresa se sometió a un proceso de ultrafiltración en un equipo NIRO Multietapa (RO, modelo R marca GEA), bajo las siguientes condiciones: tamaño de corte de membrana 10 KDa, presión de entrada 5.5 Kg cm<sup>-2</sup>, caudal 9.3 ls<sup>-1</sup>, temperatura 25 - 45 °C. De la ultrafiltración se obtuvieron dos fracciones, el lactosuero concentrado (WC) y el ultrafiltrado (UF). Este último se liofilizó a -40°C y una presión de 0.133 mBar durante 12 horas, para obtener el ultrafiltrado en polvo (UFP), el polvo resultante se almacenó a temperatura ambiente para su uso posterior.

### **Secado por aspersión**

El lactosuero concentrado (WC), se secó en un secador por aspersión Marca Galaxi (Modelo 2520), temperatura del aire de entrada 200°C, temperatura del aire de salida 80 °C; tasa de evaporación 250 litros h<sup>-1</sup>, obteniéndose el lactosuero en polvo (WCP).

### **Análisis por espectrofotometría infrarroja FTIR**

La cantidad de proteína y lactosa en el lactosuero se determinó por FTIR, se compararon los espectros de: tres lactosueros en polvo, a) ProWinner, producto que se comercializa como concentrado de proteína de lactosuero sin lactosa, b) lactosuero donado por la Universidad Iberoamericana campus Puebla (Ibero) y c) Veyco un lactosuero comercial grado alimenticio; tres leches en polvo comerciales, Nido®, Novamil® y Nan II®, y los lactosueros obtenidos en este trabajo. Las curvas de calibración se prepararon con albúmina bovina y lactosa de Sigma-Aldrich, se determinó la absorbancia a longitudes de onda de 1800-800 cm<sup>-1</sup>, se utilizó un equipo FTIR Bruker modelo Vertex 70 con ATR, empleando un tiempo de integración de 300 segundos.

### **Elaboración de queso Oaxaca**

El queso se elaboró siguiendo el proceso establecido en la empresa (respetando la confidencialidad del proceso) se utilizaron diferentes cantidades de WC (0, 5, 8, 10, 12, 15 y 20 % volumen/volumen) y de WCP (0, 0.25 y 0.5 % peso/peso), calculo con base al volumen de leche utilizado. WC o WCP, según corresponda, se mezclaron con leche hasta completar 4 litros. Posteriormente se agregó el cuajo y se mantuvo a 35 °C por 2 h hasta la formación del coagulado, el cual se separó manualmente, luego se colocó en un recipiente con agua a 80 °C por 2 minutos, posteriormente se estiró manualmente para formar hebras, que es la principal característica del queso Oaxaca. Se observó cualitativamente la facilidad de procesamiento, así como la elasticidad de los quesos obtenidos, y se pesaron para obtener el rendimiento por litro de leche utilizada.

### **Análisis estadístico**

El análisis estadístico de los resultados se realizó mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA) y posteriormente un análisis de comparaciones de medias utilizando la prueba de Tukey-Kramer, con nivel de significancia de 0.05.

## Resultados y Discusión

### Análisis fisicoquímico de leche y lactosueros de la empresa

Inicialmente se evaluaron las características fisicoquímicas de la leche y de los lactosueros obtenidos después de la elaboración de los quesos panela, Oaxaca y rancharo en la empresa fabricante de quesos (Tabla 1). Se observa que la composición de los tres lactosueros fue muy similar; el pH del lactosuero del queso rancharo fue más ácido, en los lactosueros ácidos se ha reportado una menor cantidad de lactosa y proteína, que corresponde a los resultados obtenidos (Chandrapala *et al.*, 2015). El lactosuero de queso Oaxaca contenía una mayor cantidad de lípidos (0.29 %) y mayor a lo reportado en otras investigaciones (Bejarano-Toro *et al.*, 2022), se ha reportado que el 30 % de los lípidos de la leche son ácidos grasos insaturados, este grupo de ácidos merece especial atención debido a sus beneficios para la salud, en el sistema cardiovascular, la función inmunológica además de las propiedades anticancerígenas entre otras (Pereira, 2014). El lactosuero del queso panela tuvo mayor contenido de sólidos (7.57 %) y mayor a datos reportados en otras investigaciones (Iltchenco *et al.*, 2018). Comparando la composición de la leche con la de los lactosueros, se observa que la leche tenía entre 2.4 y 2.8 veces más proteína que los sueros y entre 11 y 36 veces más de lípidos, y por ende mayor contenido de sólidos totales. Esto se explica porque durante la elaboración del queso, la grasa y parte de las proteínas se coagularon para producir el queso; sin embargo, entre el 36 y el 40 % de las proteínas quedó en el lactosuero; casi la totalidad de la lactosa, así como parte de los minerales. Es decir, queda un residuo rico en nutrientes que puede ser aprovechado ya sea para la misma elaboración de queso o en las industrias alimentaria y farmacéutica, ya que su valor biológico (medida en que los nutrientes son absorbidos y utilizados por el cuerpo) es incluso mayor que el del huevo (Arce-Méndez *et al.*, 2016).

Por otro lado, los resultados de la Tabla 1 concuerdan con lo reportado por otros autores (Iltchenco *et al.*, 2018; Bejarano-Toro *et al.*, 2022), quienes han indicado que el suero contiene de 0.8 a 1.0 % de proteínas, 4.5-4.65 % de lactosa, 0.5 % de minerales, 0.5 % de grasa, 6.98 % de sólidos totales, 0.6-0.7 % de sales minerales y un pH de 6.49-6.52.

### Obtención del lactosuero concentrado (WC), ultrafiltrado (UF) y lactosuero concentrado en polvo (WCP)

Debido a que las proteínas son termolábiles, no es conveniente someter al lactosuero a operaciones que impliquen calentamiento para su concentración, ya que las proteínas se pueden desnaturalizar. Por lo que la concentración del suero se realizó por ultrafiltración ya que se trata de una separación mecánica por peso molecular, por lo que el daño a las proteínas es mínimo (Solís *et al.*, 2017). Como resultado del proceso de ultrafiltración se obtuvieron dos fracciones el retenido (WC) y el permeado (UF), cuyo contenido de proteínas fue de 7.79% y 1.15% respectivamente

(Tabla 2). Los resultados son mayores a otros reportes de sueros concentrados obtenidos por ultrafiltración, donde la proteína se cuantificó en 5.22 % y el pH de 5.79 para el retentado y 0.21 % de proteína y pH de 5.78 para el permeado (Kukucka & Kukucka, 2012; Proaño et al., 2021).

**Tabla 1. Análisis fisicoquímico de la leche y los lactosueros obtenidos en la empresa fabricante de queso.**

Propiedad	Leche	Suero de queso Panela	Suero de queso Oaxaca	Suero de queso Ranchero
pH	6.42 ± 0.17 <sup>a</sup>	6.36 ± 0.15 <sup>a</sup>	6.30 ± 0.12 <sup>a</sup>	5.41 ± 0.12 <sup>b</sup>
Lípidos (%)	3.25 ± 0.27 <sup>a</sup>	0.11 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.29 ± 0.06 <sup>b</sup>	0.09 ± 0.1 <sup>b</sup>
Proteínas (%)	3.12 ± 0.14 <sup>a</sup>	1.26 ± 0.12 <sup>b</sup>	1.25 ± 0.23 <sup>b</sup>	1.12 ± 0.17 <sup>b</sup>
Lactosa (%)	4.46 ± 0.35 <sup>a</sup>	4.28 ± 0.39 <sup>a</sup>	4.28 ± 0.25 <sup>a</sup>	4.04 ± 0.31 <sup>a</sup>
Sales minerales (%)	0.88 ± 0.05 <sup>a</sup>	0.72 ± 0.09 <sup>c</sup>	0.75 ± 0.1 <sup>c</sup>	0.78 ± 0.04 <sup>b</sup>
Sólidos Total (%)	11.51 ± 0.36 <sup>a</sup>	7.57 ± 0.27 <sup>b</sup>	6.76 ± 0.25 <sup>b</sup>	6.43 ± 0.23 <sup>b</sup>
Humedad (%)	88.49 ± 0.43 <sup>a</sup>	92.43 ± 0.57 <sup>a</sup>	93.24 ± 0.45 <sup>a</sup>	93.57 ± 0.63 <sup>a</sup>

Letras iguales en renglón indican que no hay diferencia estadística ( $\alpha < 0.05$ )

**Tabla 2. Análisis fisicoquímico de los lactosueros concentrados y especificaciones de la norma CXS 289-1995.**

Propiedad	WC	UF	WCP	Norma CXS 289-1995
<b>pH</b>	6 + 0.44 <sup>b</sup>	5.89 + 0.52 <sup>b</sup>	7.97 + 0.69 <sup>a</sup>	> 6
<b>Proteína (%)</b>	7.79 + 0.72 <sup>b</sup>	1.15 + 0.09 <sup>c</sup>	47.32 + 1.1 <sup>a</sup>	Min 11 %
<b>Lactosa (%)</b>	2.09 + 0.32 <sup>a</sup>	0.26 + 0.08 <sup>b</sup>	1.58 + 0.79 <sup>a</sup>	Max 2 %
<b>Lípidos (%)</b>	52.5 + 0.98 <sup>a</sup>	45 + 0.44 <sup>b</sup>	39.85 + 3.56 <sup>b</sup>	Max 61 %
<b>Humedad (%)</b>	83.75 + 0.93 <sup>b</sup>	93.36 + 0.39 <sup>a</sup>	5.14 + 0.78 <sup>c</sup>	Max 5 %
<b>Sólidos Totales (%)</b>	16.25 + 1.02 <sup>b</sup>	6.4 + 0.39 <sup>c</sup>	94.86 + 0.82 <sup>a</sup>	No lo especifica

Letras iguales en renglón significan que no hay diferencia estadística ( $\alpha < 0.05$ )

Utilizando una membrana de ultrafiltración de 10 kDa fue posible concentrar las proteínas, de allí el incremento que se observó en dicho parámetro en el lactosuero concentrado (WC), así como un incremento en los sólidos totales comparado con el permeado (UF). Esto se puede explicar porque entre el 70 y 80 % de las proteínas totales son la  $\alpha$ -lactoglobulina y la  $\beta$ -lactoglobulina, cuyo peso molecular es de 14.2 y 18.3 kDa respectivamente; el resto de las

proteínas son albúminas séricas cuyo peso molecular es de 69 kDa (Kukucka & Kukucka, 2012). En el caso de la lactosa, su peso molecular es de 342 g/mol, por lo que teóricamente no debería de encontrarse en el concentrado; sin embargo, en la Tabla 2 y Figura 1a se observa que si hubo presencia de lactosa en WC y WCP; esto puede explicarse porque en la superficie de la membrana de ultrafiltración se depositan componentes del suero dificultando la penetración de moléculas de bajo peso molecular como la lactosa; además Tarapata *et al.* (2022) explican que algunas propiedades fisicoquímicas como aumento de la fuerza iónica y el contenido de calcio en el lacto suero facilitan el ensuciamiento de la membrana.

De acuerdo con la Tabla 2, los parámetros medidos al WCP cumplen con los requerimientos de calidad establecidos en la Norma CXS 289-1995, a excepción del contenido de agua que fue ligeramente mayor a lo establecido en dicha Norma, por lo que se sugiere aumentar el tiempo de secado. Es importante destacar que para el lactosuero grado alimenticio se especifica que el contenido de proteína debe ser mínimo del 11 %, el WCP obtenido tiene un contenido de proteína del 47 %, supera en 4 veces el mínimo especificado; por lo que el producto que se puede obtener con el lactosuero de la empresa, después de una ultrafiltración y un secado por aspersión, tendrá un valor de venta mayor por ese alto contenido de proteína. El resultado obtenido es mayor al reportado por Bejarano-Toro *et al.* (2022) quienes obtuvieron 45 % de proteínas de un suero al someterlo al proceso de ultrafiltración con una membrana de 10 kDa.

### **Contenido de proteína y lactosa de los lactosueros WC, WCP y UFP**

En la empresa productora de queso, cuando la oferta de leche disminuye, emplean hasta 1 % de leche en polvo para la formulación de sus productos; por ello, una vez obtenido el lactosuero concentrado, se secó para obtener el lactosuero en polvo y determinar el uso tanto del lactosuero concentrado (WC), como del lactosuero en polvo (WCP) para la elaboración de queso y reducir la utilización de leche en polvo. Para la deshidratación del WC se eligió un secador por aspersión, ya que el uso de este equipo presenta varias ventajas: asegura la uniformidad en el tamaño de partícula del producto (el tamaño uniforme de gránulo es un parámetro de calidad muy importante); la alta velocidad de secado minimiza el tiempo de contacto con el aire caliente, esto evita que las proteínas se desnaturalicen, mejorando la calidad del producto y con ello su competitividad en el mercado (Sosnik & Seremeta, 2015). Las características del WCP así obtenido se muestran en la tabla 2 y se compararon con la Norma CXS 289-1995, que establece las especificaciones para el suero en polvo grado alimenticio.

Adicionalmente, el contenido de proteína y lactosa de WCP se comparó con el de los lactosueros en polvo comercialmente disponibles Ibero, Veyco y ProWinner 100 % suero de leche, este último es un producto de consumo popular entre los deportistas, dicha comparación se llevó a cabo mediante el análisis por espectroscopia FTIR. Debido a que la espectroscopia de IR es una técnica no destructiva, que prácticamente no requiere preparación de la muestra, además de su sensibilidad y selectividad, se ha convertido en una herramienta de elección para el análisis cualitativo y cuantitativo en la industria láctea, substituyendo métodos como el de Kjeldahl (Pereira *et al.*, 2020). En el análisis solo se consideraron las regiones del espectro donde se encuentran las señales características de las proteínas y la lactosa, ya que son los compuestos del lactosuero de mayor interés económico y nutricional. Las señales características de los grupos



funcionales de lactosa se registran en la región de 900-1300  $\text{cm}^{-1}$ , y las bandas correspondientes a los grupos amida I de las proteínas están entre 1500-1400  $\text{cm}^{-1}$ , amida II entre 1300-1400  $\text{cm}^{-1}$  interacciones lípido proteína de 1600-1700  $\text{cm}^{-1}$  y lípidos de 1700 a 1800  $\text{cm}^{-1}$  (Solís-Oba et al., 2011; Pereira et al., 2020; Hong et al., 2021).

En el espectro de IR (Figura 1a) se observa que el área de las señales correspondientes a las proteínas fue substancialmente mayor para el WCP que las de los lactosueros en polvo Ibero y Veyco, lo cual indica un mayor contenido de proteína en WCP (47 %); en el mismo espectro se observa que el contenido de lactosa fue mucho menor en WCP que en los otros dos productos. Lo anterior demuestra que el WCP es un producto con un mayor contenido de proteína con una baja concentración de lactosa, características que lo hacen más atractivo, nutricional y económicamente, que los lactosueros Ibero y Veyco, los cuales contienen 12 % de proteína. En cuanto al ProWinner, en la Figura 1a se observa que el contenido de proteína es mayor en este (79 %), mientras que el de lactosa es mayor en WCP.

En la Tabla 3 se muestra un comparativo del contenido de proteína de varios lactosueros en polvo altamente comerciales, así como el precio al consumidor; de esta información se puede observar claramente que el valor comercial del lactosuero en polvo es muy atractivo, sobre todo considerando que es un subproducto que normalmente es considerado como un desecho, además, su obtención es relativamente sencilla ya que con los procesos de ultrafiltración y secado por aspersion se recupera una alta proporción de las proteínas de la leche que no se quedaron en el queso, con un bajo contenido de lactosa. Por lo que, si la empresa invierte un poco más en investigación y desarrollo, podrá tener un producto con mayor cantidad de proteína y sin lactosa, tendrá ganancias extra por la comercialización del WCP, previa su caracterización para evaluar su estabilidad, capacidad de hinchamiento, solubilidad, distribución de tamaño, potencial Z, etc.

Asimismo, se comparó el WCP con las leches en polvo comerciales Nido, Novamil y Nan II, en la Figura 1b muestra los espectros FTIR correspondientes. En la Figura 1b se observa que WCP tiene un mayor contenido de proteína con respecto a las leches comerciales, por lo que WCP obtenido puede ser aprovechado en la empresa, ya que se obtiene un producto de mayor calidad nutricional que algunas leches en polvo comerciales. El contenido de lactosa de WCP fue igual que las leches Nido® y Novamil®; la mayor cantidad de lactosa se registró en la leche Nan II®. La lactosa es un disacárido que se encuentra en la leche y es el carbohidrato más importante en la nutrición infantil (Vandenplas, 2015).

De lo anterior se desprende que otro posible uso del lactosuero es la venta del WCP a empresas que fabrican fórmulas lácteas, estos productos están elaborados con proteína, lactosa y minerales de la leche de vaca, aceites vegetales y vitaminas. Como se observa en la Tabla 3, las posibles ganancias para la empresa son muy atractivas para promover su producto en otras áreas de la industria láctea.

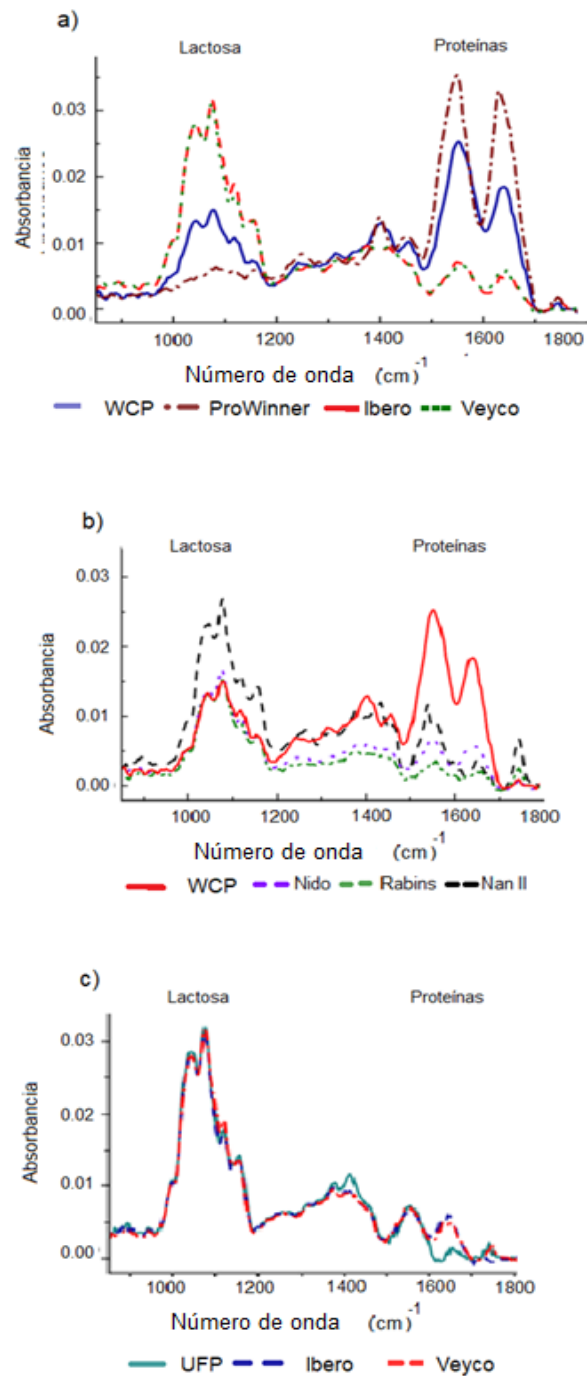


Figura 1. a) Espectro FTIR de los lactosueros WCP, ProWinner®, Ibero® y Veyco®; b) Espectro FTIR de WCP y leches en polvo Nido®, Rabins® y Nan II®; c) Espectro FTIR de los lactosueros UFP, ProWinner®, Ibero® y Veyco®.

**Tabla 3. Comparación entre lactosueros y leches en polvo con el WCP**

Producto	% proteína	Precio*	\$ /g proteína
WCP	47.32	----	-----
ProWinner	72.5	\$1700/2000g	\$0.85
Evolution WP 100	80	\$1128/1400 g	\$0.80
Forza Whey Pro	75.7	\$1375/2270g	\$0.61
Nan II	10	\$361/1200g	
Nido	9	\$123/720g	

\*Precios consultados en Amazon México, septiembre del 2022

Por lo general se utiliza en mayor proporción el concentrado de proteína en polvo, debido a que contiene un mayor contenido de proteína que el filtrado, pero también se podría aprovechar este último en la industria láctea. El UF se liofilizó (UFP) para determinar si también puede ser aprovechado en la industria láctea, su espectro de FTIR se comparó con el de los sueros en polvo Veyco e Ibero, dichos espectros se muestran en la figura 1c. Se observa que el espectro del UFP es prácticamente igual que los otros lactosueros en polvo, y si se compara con el contenido de proteína y lactosa de las leches de la figura 1b se aprecia que son similares entre ellos. Esto indica que ambas fracciones que se obtienen de la ultrafiltración del lactosuero se pueden aprovechar, obteniéndose dos productos, el WCP que es un producto rico en proteína (47 %) y el UFP con un contenido de proteína del 12 %, ambos productos superan el requerimiento mínimo de 11 % de proteína establecido en la norma CXS 289-1995.

En 2018, el precio en Europa de la leche en polvo fue de 3018 dólares/tonelada y el de suero en polvo de 802 dólares/tonelada (<https://www.canilec.org.mx/estadisticas%20lacteas%202019.pdf>) De acuerdo con esta información, la empresa podría obtener un ingreso extra mediante la comercialización de ambos productos (WCP y UFP).

### Formulación de queso Oaxaca con adición de WC o WCP

De acuerdo con los resultados obtenidos, el uso más inmediato que la empresa puede dar al lactosuero es integrarlo en la misma producción de queso; se evaluó el uso tanto del lactosuero concentrado líquido (WC) en diferentes cantidades, como del lactosuero en polvo (WCP), éste último para determinar si es posible que el uso de la leche en polvo, que ocasionalmente se emplea en la empresa cuando baja la oferta de leche, se pueda sustituir por lactosuero en polvo. Se hicieron varios preparados con diferentes cantidades de ambos lactosueros, WC y WCP.

En la Tabla 4 se muestra el rendimiento que se obtuvo al elaborar el queso tipo Oaxaca con las diferentes cantidades del WC, así como la consistencia y facilidad de procesamiento que se observó. Se encontró que el rendimiento de queso obtenido usando WC fue menor al rendimiento obtenido sin utilizar WC (0 %), y disminuyó al aumentar la cantidad de WC. El queso obtenido utilizando el 5 y 8 % de WC mostró una buena consistencia (elástica) y un buen

procesamiento. Sin embargo, al aumentar la cantidad de WC por encima del 8 %, el producto obtenido fue cremoso y no permitió la formación de hebras, que es la característica principal del queso Oaxaca. Es importante mencionar que el lactosuero presenta una menor cantidad de proteínas y grasa que la leche, en este sentido las proteínas son las responsables de la alineación espacial de las hebras del queso, cuando la cantidad de proteínas disminuye dificulta el hilado del queso. Además, se ha reportado que la grasa también ayuda al hilado, ésta se distribuye siguiendo la orientación de las fibras de proteína, por lo que si baja la cantidad de estas grasas el hilado es deficiente (Ramírez-López & Vélez-Ruiz, 2012). Debido a que el lactosuero tiene 55 % menor contenido de grasa que la leche, al hacer formulaciones incrementando el porcentaje de lactosuero, se va reduciendo la cantidad de lípidos en la masa, por ello cambia la consistencia y no es posible hacer el hilado característico del queso tipo Oaxaca. Esto explica porque al aumentar la cantidad adicionada de WC se obtuvo menor rendimiento de queso y su procesamiento fue malo; sin embargo, estadísticamente se obtuvo el mismo rendimiento al adicionar hasta el 12 % de WC; pero se recomienda usarlo máximo en 8 %, ya que es la máxima cantidad evaluada que permite obtener una buena consistencia elástica

**Tabla 4. Rendimiento de queso Oaxaca preparado usando WC**

WC (%)	Queso (g)	Rendimiento (%) (Queso/Leche)	Consistencia	Procesado del queso
0	458.5 <sup>a</sup>	11.46 <sup>a</sup>	Elástica	Bueno
5	428 <sup>ab</sup>	11.26 <sup>a</sup>	Elástica	Bueno
8	420 <sup>ab</sup>	11.41 <sup>a</sup>	Elástica	Bueno
10	398.5 <sup>b</sup>	11.07 <sup>ab</sup>	Cremosa	Regular
12	393.5 <sup>b</sup>	11.18 <sup>ab</sup>	Cremosa	Regular
15	359.5 <sup>bc</sup>	10.57 <sup>b</sup>	Muy cremosa	Malo
20	326 <sup>c</sup>	10.19 <sup>b</sup>	Muy cremosa	Malo

Letras iguales en las columnas significa que no hay diferencia significativa ( $\alpha < 0.05$ )

También se evaluó el uso del WCP para formular queso Oaxaca y se comparó con una formulación usando el 1 % de la leche en polvo que utilizan en la empresa, los resultados se encuentran en la tabla 5.

Se observó que usando el WCP el procesamiento y consistencia del queso fue igual que usando leche en polvo, pero el rendimiento de queso fue 4.1 % mayor usando 0.5 % de WCP comparado con el uso de 1 % de leche en polvo, probablemente debido a que WCP tiene un mayor contenido de proteínas en comparación con la leche en polvo. Usando 0.25 % de WCP se obtuvo el mismo rendimiento que usando 1 % de leche en polvo, sin diferencia estadística entre ellos.

**Tabla 5. Rendimiento de queso Oaxaca preparado usando WCP y leche en polvo**

Leche en polvo(%)	WCP (%)	Queso (g)	Rendimiento (%) (Queso/leche)
1	0	480 <sup>b</sup>	12.0 <sup>b</sup>
0	0.25	492 <sup>ab</sup>	12.3 <sup>ab</sup>
0	0.5	501 <sup>a</sup>	12.5 <sup>a</sup>

Letras iguales en las columnas significa que no hay diferencia significativa ( $\alpha < 0.05$ ).

En la elaboración de queso Oaxaca con 0.25 o 0.5 % de WCP la empresa tendría las siguientes ventajas: a) el producto presenta una buena incorporación de los componentes del lactosuero (grasa, proteínas, lactosa, minerales), b) permitió un buen procesamiento desde el punto de vista de formación de hebras, elasticidad y textura, c) hubo aumento del rendimiento, que a gran escala se traduce en mayores ganancias y d) pueden tener un ahorro económico por la reducción en la compra de leche en polvo. Dependiendo de la época del año, es la oferta y la demanda de leche, así como los precios, por ejemplo, en época de sequía o invierno la producción de leche es baja y los precios suben. Los resultados obtenidos indican se puede aprovechar el lactosuero en polvo para la producción de queso Oaxaca, cuando la oferta de la leche baja o los precios de esta suben.

### **Análisis fisicoquímico del lactosuero resultante del queso obtenido adicionando WC o WCP**

De acuerdo con los resultados obtenidos, se recomienda que la empresa utilice hasta el 8 % de lactosuero concentrado (WC) y 0.5 % de lactosuero en polvo (WCP), ya que con estas cantidades el rendimiento, el procesado y la apariencia son similares a los obtenidos empleando únicamente la leche. Para determinar si los lactosueros que se vayan obteniendo de estas formulaciones se pueden seguir empleando en subsecuentes ciclos de producción, se analizó el lactosuero que se obtuvo después de la elaboración de queso Oaxaca con la adición de 8 % WC o 0.5 % WCP, sus propiedades fisicoquímicas se encuentran en la Tabla 6. Se observa que las características del lactosuero obtenido tras la adición de WC y WCP son muy similares a las del lactosuero resultante sin la adición de éstos. Lo cual indica que, sería importante que se llevara a cabo la elaboración del queso Oaxaca reutilizando los lactosueros resultantes, y analizar las características del queso resultante, de tal forma que se logre determinar que tantas veces se puede reciclar el suero. Esta posibilidad ofrecería a la empresa otra oportunidad de economizar y aumentar sus ganancias en cuanto a la fabricación del queso.

**Tabla 6. Análisis del lactosuero resultante de la producción del queso usando 8 % WC y 0.5 % WCP**

Parámetro	Lactosuero obtenido con 8% WC	Lactosuero obtenido con 0.5% WCP	Lactosuero obtenido solo con leche
pH	5.89 ± 0.35 <sup>ab</sup>	5.57 ± 0.26 <sup>b</sup>	6.30 ± 0.22 <sup>a</sup>
Lípidos (%)	0.25 ± 0.07 <sup>c</sup>	0.37 ± 0.09 <sup>a</sup>	0.29 ± 0.06 <sup>b</sup>
Proteínas (%)	1.44 ± 0.06 <sup>b</sup>	1.78 ± 0.12 <sup>a</sup>	1.25 ± 0.23 <sup>b</sup>
Lactosa (%)	4.53 ± 0.62 <sup>a</sup>	4.55 ± 0.45 <sup>a</sup>	4.48 ± 0.55 <sup>a</sup>
Sales mineral (%)	0.76 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.77 ± 0.06 <sup>a</sup>	0.75 ± 0.1 <sup>a</sup>
Sólidos totales (%)	6.98 ± 0.69 <sup>a</sup>	7.47 ± 0.58 <sup>a</sup>	6.76 ± 0.65 <sup>a</sup>
Humedad (%)	93.02 ± 0.91 <sup>a</sup>	92.53 ± 0.61 <sup>a</sup>	93.24 ± 0.85 <sup>a</sup>

Promedio de tres mediciones, ± desviación estándar

## Conclusiones

El lactosuero por ser un subproducto rico en proteínas, lactosa y otros componentes nutricionales, se puede aprovechar, evitando así ser desechado y afectar al medio ambiente. En Tlaxcala la mayoría de las empresas fabricantes de quesos desechan su lactosuero y debido a su alta carga orgánica es complicado y caro su tratamiento en las plantas de tratamiento de agua del estado. Mediante la ultrafiltración y el secado por aspersion se obtuvieron un lacto suero concentrado (WC) y un lacto suero en polvo (WCP) con 7.76 y 47 % de proteínas respectivamente; se demostró que ambos productos pueden emplearse para la elaboración de queso. El aprovechamiento del lactosuero traerá ventajas económicas a la empresa, ya que durante la elaboración del queso puede reducir el uso de leche líquida sustituyéndola con el uso de hasta 8 % WC o la reducción del requerimiento de leche en polvo al emplear 0.5 % de WCP, ello sin detrimento del rendimiento del queso. Además, previos análisis posteriores, podría comercializar los lactosueros obtenidos, ya que estos tienen un mercado atractivo en diferentes industrias.

## Contribución de los autores

Conceptualización del trabajo, ASO, MMSO; desarrollo de la metodología y validación experimental, OTG; análisis de resultados, ASO, MMSO, RMMC; Manejo de datos, RMMC; escritura y preparación del manuscrito, MMSO; redacción, revisión y edición, AASO; administrador de proyectos y adquisición de fondos, MMSO.

Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo.”

## Financiamiento

Esta investigación fue financiada por la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional.

## Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada a Ogilver Teniza.

## Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

## Referencias

- Asas, C., Llanos, C., Matavaca, J., & Verdezoto, D. (2021). El lactosuero: impacto ambiental, usos y aplicaciones vía mecanismos de la biotecnología. *Agroindustrial science*, 11(1), 105-116.
- Arce-Méndez, J. E., Thompson-Vicente, E., & Calderón-Villaplana, S. (2016). Incorporación de la proteína del suero lácteo en un queso fresco. *Agronomía Mesoamericana*, 27(1), 61-71.
- Bejarano-Toro, E., Sepúlveda-Valencia, J. U., & Rodríguez-Sandoval, E. (2022). Use of ultrafiltration technology to concentrate whey proteins after White cheese manufacturing. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 75(2), 9961-9969.
- Chandrapala, J., Duke, M. C., Gray, S. R., Zisu, B., Weeks, M., Palmer, M., & Vasiljevic, T. (2015). Properties of acid whey as a function of pH and temperature. *Journal of dairy science*, 98(7), 4352–4363. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9435>
- Chatterjee, G., De Neve, J., Dutta, A., & Das, S. (2015). Formulation and statistical evaluation of a ready-to-drink whey based orange beverage and its storage stability. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14(2), 253-264. <http://www.rmiq.org/ojs311/index.php/rmiq/article/view/1192>
- CXS 289-1995 Norma para los sueros en polvo, anteriormente CODEX STAN A-15. (2018). [http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/shproxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXS%2B289-1995%252FCXS\\_289s.pdf](http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/shproxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXS%2B289-1995%252FCXS_289s.pdf).
- Esquivel-González, B. E., Ochoa Martínez, L. A., & Rutiaga-Quiñones, O. M. (2015). Microencapsulación mediante secado por aspersión de compuestos bioactivos. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 16(2), 180-192. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81343176006>
- Fabela, M. M. F. Secado por aspersión, Capítulo 14 del libro Tecnologías de nano-microencapsulación de compuestos bioactivos, Ed. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A. C., 189-199.
- García-Muñoz, M.A., Cruz-Velazco, N., Chávez-Martínez, A., Nolasco-Hipólito, C., & Abad-Zavaleta, J. (2021). Genetic characterization of the microbiota of artisan fresh cheese from the Papaloapan región. *Mexican Journal of Biotechnology*, 6(2), 61-85. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2021.6.2.61>.

- Hong, B. A. T., Cozzolino, D., Zisu, B., & Chandrapala, J. (2021). Infrared analysis of ultrasound treated milk systems with different levels of caseins, whey proteins and fat. *International Dairy Journal*, 117, 104983, <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.104983>
- Itchenco, S., Preci, D., Bonifacino, C., Franco, F.E., Steffens, C., Panizzolo, L.A., Colet, R., Fernandes, I.A., Abirached C., Valduga E., & Steffens, J. (2018). Whey protein concentration by ultrafiltration and study of functional properties. *Ciência Rural*, 48(5), 1-11.
- Jeewanthi, R. K., Lee, N. K., & Paik, H. D. (2015). Improved functional characteristics of whey protein hydrolysates in food industry korean. *Journal of Food Science of Animal Resources*, 35(3), 350-359. <http://dx.doi.org/10.5851/kosfa.2015.35.3.350>.
- Królczyk, J. B., Dawidziuk, T., Janiszewska-Turak, E., & Sołowiej, B. (2016). Use of whey and whey preparations in the food industry – a review. *Polish Journal of Food Nutrition Science*, 66(3), 157-165. <https://doi.org/10.1515/pjfn-2015-0052>
- Kukucka, M., & Kukucka, N. (2012). Whey Protein Concentration by Ultrafiltration Elements Designed for Water Treatment - Pilot Plant Scale Study. *Procedia Engineering*, 44, 1913-1915.
- Lappa, I. K., Papadaki, A., Kachrimanidou, V., Terpou, A., Koulougliotis, D., Eriotou, E., & Kopsahelis, N. (2019). Cheese whey processing: integrated biorefinery concepts and emerging food applications. *Foods*, 8(8), 347. <https://doi.org/10.3390/foods8080347>
- Mehra, R., Kumar, H., Kumar, N., Ranvir, S., Jana, A., Buttar, H. S., Telessy, I.G., Awuchi, C. G., Okpala, R., Korzeniowska, M., & Guiné, R. P. F. (2021). Whey proteins processing and emergent derivatives: An insight perspective from constituents, bioactivities, functionalities to therapeutic applications. *Journal of Functional Foods*, 87, 104760, <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104760>
- Nabuco, H. C., Tomeleri, C. M., Fernandes, R. R., Sugihara Junior, P., Venturini, D., Barbosa, D. S., Deminice, R., Sardinha, L. B., & Cyrino, E.S. (2019). Effects of pre- or post-exercise whey protein supplementation on oxidative stress and antioxidant enzymes in older women. *The Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 29 (8), 1101–1108.
- Pereira, P.C. Milk nutritional composition and its role in human health. (2014). *Nutrition*. 30(6), 619-27. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nut.2013.10.011>
- Pereria, C. G., Luiz, L. C., Bell, M. J. V., & Anjow, V. (2020). Near and mid infrared spectroscopy to assess milk products quality a review of recent applications. *Journal of Dairy Research and Technology*, 3(1), 100014. <https://doi.org/10.24966/DRT-9315/100014>
- Proaño, C. M., González, G. C., Brito, M. G., Beltrán, S. E., & Coronel, F. M. (2021). Ultrafiltración tangencial de lactosuero de queso fresco pasteurizado. *Journal of Science and Research*, 6(2). <https://revistas.utb.edu.ec/index.php/sr/article/view/1188>
- Ramírez-López, C., & Vélez-Ruiz, J. F. (2012). Quesos frescos: propiedades, métodos de determinación y factores que afectan su calidad. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 6(2), 131-148.
- Rascón-Cruz, Q., Espinoza-Sánchez, E. A., Siqueiros-Cendón, T. S., Nakamura-Bencomo, S. I., Arévalo-Gallegos, S., & Iglesias-Figueroa, B. F. (2021). Lactoferrin: a glycoprotein involved in immunomodulation, anticancer, and antimicrobial processes. *Molecules*, 26 (1), 205 <https://doi.org/10.3390/MOLECULES26010205>
- Rios-Aguirre, S., & Gil-Garzón, M.A. (2021). Microencapsulación por secado por aspersión de compuestos bioactivos en diversas matrices: una revisión. *TecnoLógicas*, 24(51), 1836. <https://doi.org/10.22430/22565337.1836>
- Solís, C.A., Vélez, C.A., & Ramírez-Navas, J. S. (2017). Tecnología de membranas: Ultrafiltración. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 11(22), 26-36. <https://doi.org/10.31908/19098367.3546>
- Solís-Oba, M., Teniza-García, O., Rojas-López, M., Delgado-Macuil, R., Díaz-Reyes, J., & Ruiz,



- R. (2011). Application of infrared spectroscopy to the monitoring of lactose and protein from whey after ultra and nano filtration process. *Journal of Mexican Chemical Society*, 55(3), 190-193.
- Sosnik, A., & Seremeta, K. (2015). Advantages and challenges of the spray-drying technology for the production of pure drug particles and drug-loaded polymeric carriers. *Advances in Colloid and Interface Science*, 223, 40-54. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.05.003>
- Sultan, S., Huma, N., Sadiq, B. M., Aleem, M., & Abbas, M. (2016). Therapeutic potential of dairy bioactive peptides: A Contemporary Perspectives. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(1), 105-115. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1136590>
- Tarapata, J., Dybowska, B. E. & Zulewska, J. (2022). Evaluation of fouling during ultrafiltration process of acid and sweet whey. *Journal of Food Engineering*, 328, 111059. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111059>
- Tovar, J. X., Muro, U. C. R, Tellez, J. A., Mercado, F. Y., Abreu-Corona, A. C., & Arana, C. A. (2017). Hydrolysate antimicrobial activity released from bovine whey protein concentrate by the aspartyl protease Eap1 of *Sporisorium reilianum*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(1), 11-18. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio693>
- Vandenplas, Y. (2015). Lactose intolerance. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 24, 9-13. <https://doi.org/10.6133/apjcn.2015.24.s1.02>
- Ziaee, A., Albadarin, A. B., Padrela, L., Femmer, T., O'Reilly, E., & Walker, G. (2019). Spray drying of pharmaceuticals and biopharmaceuticals: Critical parameters and experimental process optimization approaches. *European Journal of Pharmaceutical Sciences: official Journal of the European Federation for Pharmaceutical Sciences*, 127, 300-318. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2018.10.026>