

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS



**“TÉCNICAS DE ENCAPSULACIÓN DE LACTASA CON
APLICACIONES EN INDUSTRIA DE ALIMENTOS”**

Por:

GERARDO TONATIUH GÓMEZ AGUILAR

MONOGRAFÍA

Presentado como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS



**"TÉCNICAS DE ENCAPSULACIÓN DE LACTASA CON
APLICACIONES EN LA INDUSTRIA DE ALIMENTOS"**

Por:

GERARDO TONATIUH GÓMEZ AGUILAR
MONOGRAFÍA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Aprobada por el Jurado Examinador:

Dr. Javier Israel Montalvo Arredondo
Presidente

Dra. Ana Verónica Charles Rodríguez
Vocal

Dr. Armando Robledo Olivo
Vocal

Dra. Sarahi Rangel Ortega
Vocal



M.C Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Diciembre, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS



**"TÉCNICAS DE ENCAPSULACIÓN DE LACTASA CON
APLICACIONES EN LA INDUSTRIA DE ALIMENTOS"**

Por:

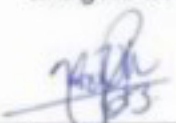

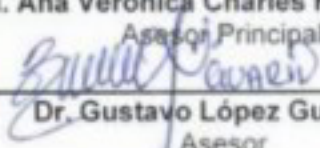

GERARDO TONATIUH GÓMEZ AGUILAR

MONOGRAFÍA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

El siguiente trabajo ha sido dirigido por el siguiente comité:

 _____ Dra. Ana Verónica Charles Rodríguez Asesor Principal	 _____ Dr. Armando Robledo Olivo Asesor
 _____ Dr. Gustavo López Guarín Asesor	 _____ Dra. Sarahi Rangel Ortega Asesor





M.C Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Diciembre, 2025

MANIFIESTO DE HONESTIDAD ACADÉMICA

El suscrito **Gerardo Tonatiuh Gómez Aguilar**, alumno del programa docente de Ingeniero en Biotecnología, con matrícula **41217054** y autor de la presente monografía manifiesta que:

1. Reconozco que el plagio académico constituye un delito que está penado en nuestro país.
2. Las ideas, opiniones, datos e información publicadas por otros autores y que han sido incluidas en este trabajo, han sido debidamente citadas, reconociendo la autoría de la fuente original.
3. Toda información consultada ha sido analizada e interpretada por el suscrito y redactada según su criterio y apreciación, de tal manera que no se ha incurrido en el “copiado y pegado” de dicha información.
4. Reconozco la responsabilidad sobre los derechos del autor de los materiales bibliográficos consultados por cualquier vía y manifiesto no haber hecho mal uso de ellos.
5. Entiendo la función y el alcance de mi comité de asesoría esta circunscrito a la orientación de guía respecto a la metodología de investigación realizada para el presente trabajo, así como el análisis e interpretación de los resultados obtenidos. Por lo tanto, eximo de toda responsabilidad relacionada al plagio académico a mi comité de asesoría y acepto que cualquier responsabilidad al respecto es únicamente mía.

ATENTAMENTE



Gerardo Tonatiuh Gómez Aguilar

Alumno

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL	i
INDICE DE FIGURAS	i
INDICE DE CUADROS	ii
2. RESUMEN	1
3. INTRODUCCIÓN	2
3.1 Justificación	2
3.2 Objetivo general	2
4. ANTECEDENTES.....	3
4.1 Lactosa	3
4.2 4.1.1 Funciones	4
4.1.2 Metabolismo de la lactasa.....	5
4.3 Intolerancia a la lactosa	9
4.3.1 Mala absorción de la lactosa	10
4.3.2 Deficiencia de lactasa	11
4.3.3 4.2.3 Digestión de la lactosa	12
4.4 Inmovilización de enzimas	13
4.4.1 Método de encapsulación	14
4.3.1.1Gelificación externa	14
4.3.1.2Gelificación interna	15
4.3.1.3Encapsulación por extrusión	16
4.3.1.4Encapsulación por emulsión	16
4.3.1.5Encapsulación mediante secado por atomización	17
4.3.2 Aplicaciones de encapsulación	17
4.3.2.1 Microorganismos probióticos	17
4.3.2.2 Compuestos activos de naturaleza no microbiana	18
4.3.2.3 Encapsulación de lactasa	19
5. CONCLUSIONES	21
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructuras químicas de sustratos de lactasa	5
Figura 2. Metabolismo de la lactosa	6
Figura 3. Ruta metabólica de la lactosa	7

Figura 4. Tipos de microcápsulas	13
Figura 5. Mecanismo de gelificación iónica	14
Figura 6. Tipos de dispositivos de extrusores	15

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Prevalencia de digestión deficiente y síntomas de intolerancia a la lactosa en México	9
---	---

2. RESUMEN

La presente monografía aborda las técnicas de encapsulación de la enzima lactasa, destacando su aplicación en la industria alimentaria, especialmente en productos destinados a personas con intolerancia a la lactosa. La lactosa, un disacárido presente en la leche, requiere ser hidrolizada por la lactasa para su correcta absorción. La deficiencia de esta enzima genera malestares digestivos, situación común en gran parte de la población mundial.

Se analizan los métodos de inmovilización enzimática, siendo la encapsulación una técnica efectiva para proteger la enzima lactasa de condiciones adversas como cambios de pH, temperatura o presencia de proteasas, facilitando su liberación controlada en el intestino delgado. Se explican distintos métodos de encapsulación, entre ellos: Gelificación externa e interna, extrusión, emulsión, secado por atomización

Además, se presentan aplicaciones prácticas en la industria, como la microencapsulación de lactasa para producir leche deslactosada y mejorar la digestibilidad de productos lácteos.

3. INTRODUCCIÓN

3.1 Justificación

La intolerancia a la lactosa se define como una alteración digestiva frecuente que afecta a una parte considerable de la población global. Se calcula que entre el 65% y el 70% de los adultos a nivel mundial experimentan algún nivel de intolerancia.

Este fenómeno se debe principalmente a que la actividad de la enzima lactasa disminuye en el intestino delgado (Misselwitz et al., 2013). La presencia de esta condición limita la capacidad de consumir lácteos, lo que potencialmente puede dificultar la obtención de las cantidades necesarias de calcio y otros nutrientes esenciales.

Para reducir los síntomas asociados a esta alteración, una estrategia eficaz consiste en añadir lactasa (o β -galactosidasa) directamente a los productos lácteos. Esta enzima tiene la función de descomponer la lactosa en dos azúcares más simples y de fácil absorción: glucosa y galactosa. No obstante, la lactasa en su forma libre muestra una baja estabilidad ante factores externos como las variaciones en el pH, los cambios de temperatura o el contacto con otros ingredientes presentes en los alimentos. Por esta razón, ha aumentado el interés y la implementación de métodos de encapsulación. Estos métodos están diseñados para resguardar la enzima, incrementar su resistencia y permitir que se libere de manera gradual en el tracto digestivo o durante los procesos de fabricación.

Diversas metodologías de encapsulación, como la gelificación iónica, el empleo de sustancias poliméricas (por ejemplo, quitosano o alginato de sodio), la liofilización o la microencapsulación, han demostrado su eficiencia para preservar la funcionalidad de la lactasa y optimizar su integración en diferentes matrices alimentarias (Shukla & Jain, 2020).

El uso de lactasa encapsulada facilita la producción de productos lácteos sin lactosa que conservan fielmente sus características sensoriales originales. De esta forma, no solo se expande el catálogo de opciones para los consumidores

intolerantes, sino que también se abren nuevas y significativas oportunidades comerciales dentro del sector alimentario.

3.2 Objetivo general

Recopilar información sobre las técnicas de encapsulación de lactasa con aplicación en la industria de alimentos

4. ANTECEDENTES

4.1 Lactosa

La lactosa es el principal disacárido que se encuentra en la leche de los mamíferos y se forma por la unión de dos monosacáridos: glucosa y galactosa, conectados mediante un enlace glucosídico β 1-4 (Mattar, de Campos Mazo y Carrilho, 2012). Este azúcar se clasifica como extrínseco en los productos lácteos, lo que implica que no está unido a la estructura celular del alimento. Se distingue de los azúcares intrínsecos, como la glucosa del almidón en las verduras, y se halla en estado libre en los alimentos que lo contienen ((Estada, Edgar, 1993)2007).

Los productos lácteos, que se derivan de la leche y contienen distintas concentraciones de lactosa, han sido un componente esencial de la dieta humana por aproximadamente 8.000 años. Hoy en día, son un elemento central en las guías nutricionales de la mayoría de las naciones (Rozenberg et al., 2016). Las pautas dietéticas emitidas por los gobiernos de la mayoría de los países promueven el consumo de lácteos en individuos sanos, en gran parte debido a su elevado aporte de calcio y otros micronutrientes vitales (USDHHS y USDA, 2015; Wang, Lay, Yu y Shen, 2016). Esto subraya la alta demanda de leche y sus derivados.

Sin embargo, gracias a los exhaustivos estudios realizados en las últimas dos décadas sobre la microbiota intestinal y los microorganismos comensales, se han descubierto numerosos beneficios asociados al consumo de lactosa y sus derivados (como la lactulosa). Estos compuestos ejercen un efecto prebiótico en el microbioma intestinal. Además, la lactosa que permanece sin digerir ha sido reconocida por funcionar como una fibra dietética. La fibra dietética se define como un componente alimenticio que no se digiere en el intestino delgado humano y puede describirse,

según sus propiedades químicas, como carbohidratos, análogos de carbohidratos, lignina y compuestos lignina-similares (Callaghan, 2019).

4.1.1 Funciones

La β -lactosa, presente en la leche materna, se digiere más lentamente, lo cual es ventajoso para optimizar la absorción de minerales. Además, la lactosa exhibe un efecto prebiótico: una porción significativa puede alcanzar el colon, sirviendo como sustrato que estimula el crecimiento de bacterias bífidas. Entre otras funciones, la lactosa potencia la asimilación de calcio y fósforo y contribuye a la disminución del pH intestinal, lo que a su vez minimiza la proliferación de posibles bacterias dañinas (Díaz-Argüelles, 2005).

La leche también contiene oligosacáridos, que incluyen compuestos como fucosa, galactosamina, glucosamina e inositol. Estos compuestos cumplen un papel clave en los mecanismos de defensa del organismo: promueven el desarrollo de la flora lactobacilar y brindan apoyo en los tractos gastrointestinal, respiratorio y genitourinario al impedir que gérmenes patógenos se adhieran a las superficies epiteliales. Adicionalmente, son componentes de moléculas de mayor complejidad, como el ácido siálico, el cual se halla en las glucoproteínas y gangliósidos cerebrales (Bueno, Sarría & Pérez-González, 2007).

La lactosa es el hidrato de carbono predominante en la leche, y es fundamental en la elaboración de glucolípidos cerebrósidos (esenciales en las primeras etapas del desarrollo neurológico) y de glicoproteínas. Como se mencionó, también facilita la absorción de calcio. La leche contiene otros carbohidratos no absorbibles, conocidos como oligosacáridos, que favorecen una flora bifidógena en el intestino. Estos azúcares constituyen lo que se conoce como la “fibra soluble” de la leche. Más allá de actuar como fuente de energía para las bacterias intestinales, estos compuestos funcionan como receptores de patógenos, fortaleciendo e induciendo la respuesta inmunitaria contra ellos (McCance and Widdowson's, 2002).

Investigaciones recientes sugieren que la lactosa puede influir en la absorción de calcio y otros minerales como el zinc y el cobre, especialmente durante la infancia o etapa de lactancia. Si la lactosa no es digerida en el intestino delgado, la microbiota intestinal (la población de microorganismos residente en el tubo digestivo) tiene la capacidad de utilizarla como nutriente (prebiótico). Los azúcares de la leche, incluida la lactosa, no solo impulsan el desarrollo de bifidobacterias intestinales, sino que también pueden contribuir a ralentizar el deterioro de ciertas funciones inmunitarias que se relaciona con el proceso de envejecimiento (Ameretti et al., 2006).

4.1.2 Metabolismo de la lactosa

La lactasa se clasifica bioquímicamente como una β -galactosidasa. Su rol primordial es actuar sobre la lactosa, específicamente rompiendo su enlace β glicosídico. Sin embargo, esta enzima no se limita a la lactosa, sino que también es capaz de hidrolizar otros compuestos que son análogos de la lactosa.

Según se ilustra en la Figura 1, la lactasa puede reconocer y descomponer otras moléculas como el lactitol, la lactulosa y el aglicón (una molécula de xilosa) (Estada, 2007). El aglicón, al ser hidrolizado en galactosa y xilosa, resulta particularmente útil en la investigación: dado que estos productos no pasan por procesos metabólicos significativos en el hígado o los riñones, su posterior excreción a través de la orina permite a los investigadores monitorizar y hacer un seguimiento de la actividad enzimática de la lactasa.

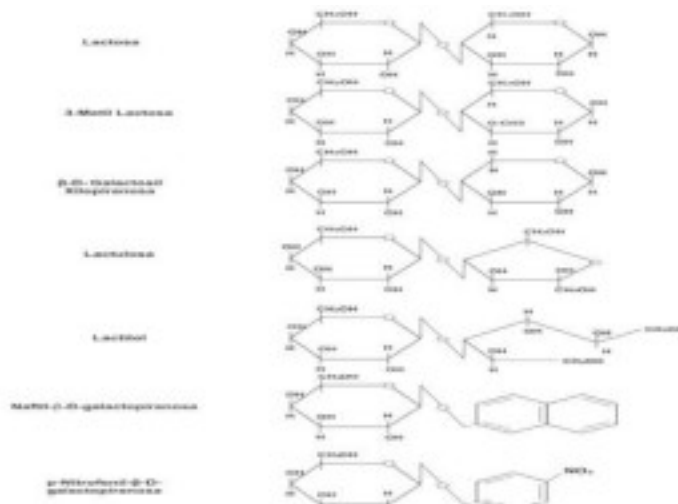


Figura 1. Estructuras químicas de sustratos de lactasa

Cuando se incluye la leche entera (con sus propiedades nutricionales y componentes intactos) en la dieta de manera regular, esta debe seguir un recorrido digestivo completo para poder ser metabolizada, absorbida y utilizada por el cuerpo humano. Desde que entra por la boca, la leche atraviesa el proceso digestivo que es común a todos los alimentos ingeridos por vía oral. Al llegar al intestino delgado, es donde ocurren las transformaciones clave. Aquí, la enzima lactasa se encarga de descomponer la lactosa (el azúcar de la leche), hidrolizándola en fragmentos más pequeños, que son la glucosa y la galactosa, mediante la ruptura del enlace β glicosídico que las mantiene unidas (Villanueva et al, 2015).

La concentración de la enzima lactasa fluctúa a lo largo de la vida, alcanzando su mayor nivel durante la infancia, que es el período de lactancia activa. A medida que el individuo crece y llega a la adultez, la cantidad de esta enzima se reduce de manera significativa, aunque todavía persiste un porcentaje (cercano al 10% de la concentración infantil). Esta retención enzimática permite que los humanos sigan consumiendo leche, siendo la de origen bovino la más común.

La lactasa se halla específicamente en las células del intestino delgado, predominantemente en la región del yeyuno y el íleon proximal (su porción media) (referencia a la Figura 2 que mostraría la anatomía intestinal). Para ejercer su función digestiva, la enzima se sitúa en las microvellosidades intestinales, que son

la parte apical de los enterocitos. Aunque su nombre molecular es lactasa-floricina hidrolasa, se le conoce de forma simplificada como lactasa (Villanueva et al, 2015).

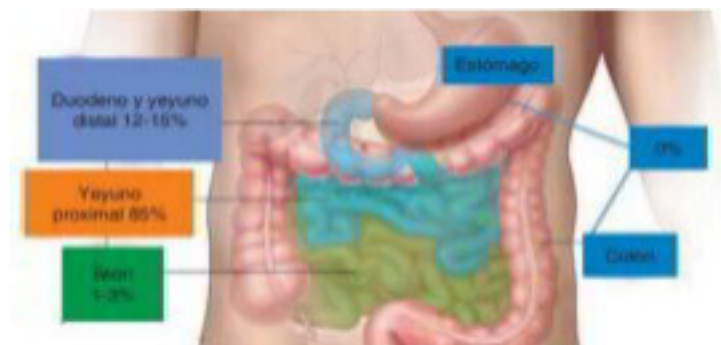


Figura 2. Metabolismo de la lactosa

Una vez que la lactosa se descompone en sus monosacáridos constituyentes (glucosa y galactosa) gracias a la acción enzimática, estos azúcares deben ser absorbidos. Este proceso ocurre mediante transportadores, principalmente el SGLT1 (transportador de glucosa dependiente de sodio). El transporte es de tipo activo, e introduce los monosacáridos al interior del enterocito junto con moléculas de sodio (Na^+). Posteriormente, para pasar al torrente sanguíneo, emplean el transportador GLUT2 (Carabaño et. al, 2011). La absorción de la lactosa, que debe estar en forma de monosacáridos para ser utilizada, depende de SGLT1. Este transportador facilita el ingreso de Na^+ al interior del enterocito, basándose en la creación de un complejo formado por el transportador, la hexosa y el sodio. La unión del Na^+ aumenta la afinidad del transportador por las hexosas, la cual disminuye al separarse el Na^+ dentro del enterocito. Es relevante destacar que por cada molécula de glucosa que ingresa, también se transportan dos iones de Na^+ (Paz Olivas, 2018).

Una vez dentro del citosol del enterocito, la glucosa y galactosa se trasladan al torrente sanguíneo mediante transporte pasivo a favor del gradiente, utilizando el transportador GLUT.

- Glucosa: La hexoquinasa inicia el metabolismo de la glucosa al fosforilarla para producir glucosa 6-fosfato, dando comienzo así a la glucólisis (Figura 3).
- Galactosa: Para que el cuerpo pueda aprovecharla, la galactosa es transformada en glucosa. En este proceso interviene la galactokinasa para generar galactosa 1-fosfato, que luego sirve como sustrato a la uridil transferasa. El resultado es la obtención de glucosa 1-fosfato, la cual se convierte finalmente en glucosa 6-fosfato, ingresando de esta manera a la ruta glucolítica (Paz Olivas, 2018).

La porción de lactosa que no es digerida ni absorbida en el intestino delgado continúa su recorrido por el tracto gastrointestinal hasta alcanzar el colon. Allí, es sometida a la acción de las bacterias de la microbiota intestinal, que la fermentan. Como resultado de esta fermentación, se generan diversos ácidos grasos de cadena corta (como el ácido acético, láctico, propiónico y butírico) y gases (incluyendo CO₂ y metano). Son estos gases los que causan las molestias abdominales características de la intolerancia a la lactosa (Carabaño et. al, 2011).

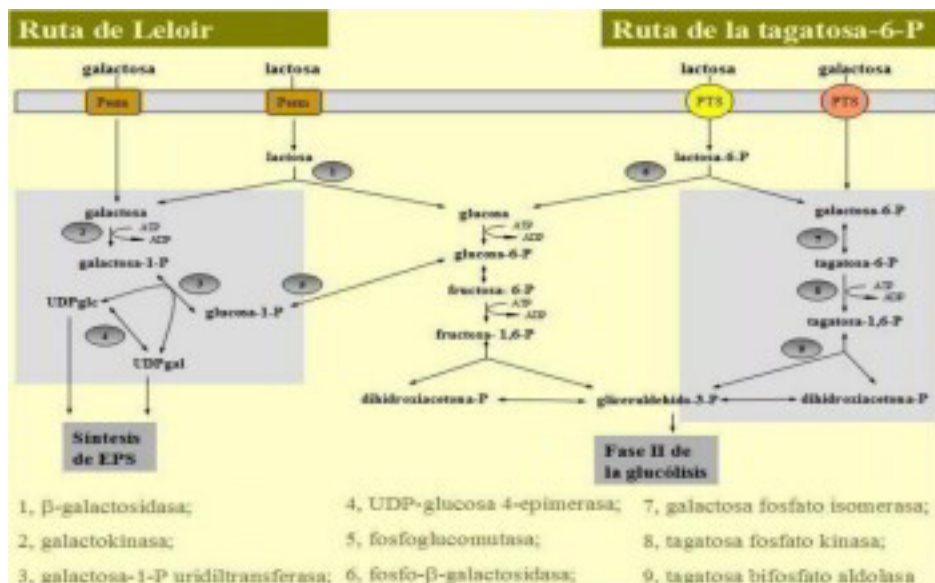


Figura 3. Ruta metabólica de la lactosa

4.2 Intolerancia a la lactosa

La leche es un alimento de gran relevancia a nivel mundial debido a su alto valor nutricional, sus propiedades fisicoquímicas favorables y su fácil acceso. Aunque es el alimento exclusivo de los mamíferos durante la lactancia, se convirtió en una opción alimentaria para los humanos después del destete. Los seres humanos adoptaron el consumo de leche de otros mamíferos, en especial de vaca, hace más de 10,000 años.

Generalmente, la principal limitación para que la población consuma productos lácteos es la Intolerancia a la Lactosa (IL). La lactosa, un hidrato de carbono, se encuentra exclusivamente en la leche y sus derivados en la dieta. Para que los mamíferos y los humanos puedan aprovechar la lactosa de los lácteos, esta debe ser digerida. La enzima β -galactosidasa(lactasa), producida en los enterocitos del duodeno, es la encargada de hidrolizar la lactosa, dando como resultado glucosa y galactosa. Estos monosacáridos son absorbidos por la mucosa intestinal. Si este proceso de hidrólisis no ocurre de manera adecuada, la lactosa provoca trastornos que se abordarán en detalle más adelante (Rosado, 2016).

La razón más frecuente de la IL es la deficiencia primaria de lactasa. Esta deficiencia afecta aproximadamente al 30% de los adultos mexicanos cuando ingieren un vaso de leche (que contiene entre 12 y 18 gramos de lactosa). Sin embargo, la IL con síntomas tras esta dosis, debida a la deficiencia primaria, se presenta en menos del 15% de los adultos mexicanos.

Existe otra forma de deficiencia de lactasa conocida como deficiencia secundaria. Esta ocurre cuando una enfermedad afecta la mucosa intestinal, provocando una reducción en la concentración de la enzima. La IL puede mitigarse o eliminarse reduciendo o suprimiendo el consumo de productos lácteos.

Además de la IL, una causa diferente de intolerancia a la leche es la β -casomorfinina7, un opioide que se genera durante la hidrólisis de la β -caseína-A1 presente en la leche (Rosado, 2016).

4.2.1 Mala absorción de la lactosa

La digestión deficiente de lactosa se puede ver como una situación esperada y normal dentro del ciclo de vida en ciertos grupos étnicos, o bien, como un defecto secundario en la producción o la función de la enzima lactasa. Generalmente, se reconocen tres tipos de la no persistencia de lactasa (NPL) (Vandenplas, 2015).

La primera causa se origina por mutaciones genéticas y se manifiesta en el período neonatal. Los recién nacidos afectados carecen de la capacidad para digerir la lactosa, lo que resulta en diarrea al consumir leche materna y, en ocasiones, puede estar acompañado de hipercalcemia y acidosis. Esta hipolactasia primaria es poco común, muestra una distribución geográfica específica y puede ser de carácter total o parcial (Storhaug et al, 2017).

La primera causa se origina por mutaciones genéticas y se manifiesta en el período neonatal. Los recién nacidos afectados carecen de la capacidad para digerir la lactosa, lo que resulta en diarrea al consumir leche materna y, en ocasiones, puede estar acompañado de hipercalcemia y acidosis. Esta hipolactasia primaria es poco común, muestra una distribución geográfica específica y puede ser de carácter total o parcial (Storhaug et al, 2017).

El segundo tipo, y el más común a nivel mundial, se caracteriza por una disminución progresiva de la actividad de la lactasa. Este fenómeno también está regido por la genética, pero su distribución está influenciada por la mezcla de poblaciones nativas. Se ha documentado que la migración de poblaciones desde el "viejo mundo" modificó la distribución entre la persistencia de lactasa (PL) y la NPL.

El fenotipo de no persistencia es más reciente en el "nuevo mundo" y puede comenzar a manifestarse entre los 2 y 5 años, aunque los síntomas suelen no hacerse evidentes antes de los 8 años. En poblaciones con una mezcla de fenotipos PL/NPL, como en México (referencia a la Figura 4/Cuadro 1 que mostraría la prevalencia), la manifestación del fenotipo ocurre a edades más tardías. Desde una perspectiva funcional, se ha observado que las personas con el fenotipo PL (tanto homocigotas como heterocigotas) expresan niveles de lactasa en el borde en cepillo diez veces superiores a los de aquellos con NPL (Vandenplas, 2015).

Autores, referencia (año)	Tamaño de muestra	Rangos de edad (zona)	Tipo de prueba	Dosis de lactosa y vehículo	Frecuencia de digestión deficiente (%)	Frecuencia de síntomas de IL (%)
Löker (1974)	401	13- 72 años (rural/urbana)	Tolerancia a la lactosa	50 g de lactosa en agua	69- 77	40- 66
Löker (1975)	105	23- 68 años (urbana)	Tolerancia a la lactosa	50 g de lactosa en agua	73	61
Löker (1976)	161	17- 86 años	Tolerancia a la lactosa	2 g lactosa/kg en agua	36- 77	NR
Löker (1978)	150	16- 50 años (urbana)	Tolerancia a la lactosa	12.5 y 37.5 g de lactosa en leche o 50 g lactosa en agua	65	25- 57
Löker (1978)	200	15-50 años (urbana)	Tolerancia a la lactosa	50 g lactosa en agua y 250- 1000 ml leche	66	4- 52
Cifuentes (1985)	110	6- 15 años (rural)	Tolerancia a la lactosa	2 g lactosa/kg en agua y 50g en agua	78	75
Löker (1988)	102	50-90 años (HR)	Hidrógeno espirado	12.5 g en agua	29- 55	NR
Rosado (1994)	205	15- 100 años (rural/ urbana)	Hidrógeno espirado	18 g lactosa (360 ml leche)	32	10
Rosado (1994)	254	< 4 > 13 años (rural/ urbana)	Hidrógeno espirado	12-18 g lactosa (240- 360 ml leche)	2- 43	3- 31
Moran (2013)	138	3-17 años (HR)	Hidrógeno espirado y/o metano espirado	12- 18 g lactosa (240- 360 ml leche)	21.4- 46.4	NR
Löker (1980)	341	5-14 años (HR)	NR	12- 36 g lactosa (240 ml leche)	NR	50- 81
Rosado (1984)	50	19- 53 años (urbana)	NR	18 g (360 ml leche)	NR	30

Cuadro 1. Prevalencia de digestión deficiente y de síntomas relacionados con la intolerancia a la lactosa en diferentes estudios en México

4.2.2 Deficiencia de la lactasa

La deficiencia primaria de lactasa se hereda según un patrón autosómico recesivo, siguiendo los principios de la herencia mendeliana. El gen que contiene el código para la enzima lactasa está situado en el cromosoma 2q21 y se cree que su expresión está regulada por elementos que actúan en la posición cis-3.

En dicho estudio, los alelos T-13910 y A-22018 mostraron una fuerte asociación con la persistencia de la lactasa, con frecuencias del 100% y 97%, respectivamente. Estudios posteriores en otras poblaciones europeas también han confirmado que estos alelos se asocian a la persistencia de la lactasa en un rango significativo que va del 86% al 98%(Poulter et al, 2003).

Este fenómeno se ha documentado en distintas poblaciones y subraya que los adultos que consumen leche pueden desarrollar diversas variantes de la persistencia de la lactasa. Esto resalta la importancia de las mutaciones recientes en la evolución humana (Wray et al, 2003).

Se ha demostrado que en los individuos con persistencia de lactasa homocigota, la cantidad de lactasa presente en las vellosidades de la mucosa intestinal es diez veces mayor en comparación con aquellos individuos que son homocigotos para la no persistencia de lactasa o que son heterocigotos (Enattah, 2002).

4.2.3 Digestión de la lactosa

Al evitar el consumo de leche, se incrementa el riesgo de no cumplir con la ingesta recomendada de ciertos nutrientes clave, como el calcio y, potencialmente, las proteínas. Por esta razón, es crucial garantizar que se consuman alimentos alternativos que proporcionen cantidades suficientes de estos nutrimentos (Rosado et al, 2005).

La leche, al ser fortificada con vitamina D, se convierte en una fuente importante de esta vitamina. Por lo tanto, al restringir la leche, la persona con intolerancia enfrenta una dificultad adicional para cubrir sus requerimientos de vitamina D.

En el contexto mexicano, la tortilla es un alimento que contribuye significativamente al aporte de calcio en la dieta. Estudios previos han demostrado que el calcio presente en la tortilla posee una biodisponibilidad razonable, siempre y cuando el proceso de nixtamalización se realice de manera adecuada (Rosado et al, 2005).

El proceso de digestión de la lactosa no es completamente eficiente debido a un fenómeno conocido como inhibición competitiva por productos. La actividad de las β -galactosidasas microbianas (añadidas a la leche) se ve inhibida cuando se acumulan los productos de la reacción: glucosa y/o galactosa.

Esta inhibición por los productos de la reacción es un mecanismo de control natural común a la mayoría de las enzimas. En base a esto, el nivel de hidrólisis alcanzado en la mayor parte de las "leches deslactosadas" disponibles en la industria oscila entre el 70% y el 85%. Esto significa que, si bien contienen significativamente menos lactosa que la leche original, no logran eliminarla por completo (Enattah, 2002).

4.3 Inmovilización de enzimas

Las enzimas pueden ser llamadas como catalizadores de naturaleza proteica que se distinguen por ser altamente específicos. Su origen biológico les confiere ciertas ventajas y limitaciones en comparación con los catalizadores químicos inorgánicos (Voet y Voet, 2006).

Dos factores han restringido históricamente la metodología de enzimas en algunos proyectos industriales: Estabilidad: La sensibilidad y las condiciones específicas de trabajo bajo las cuales conservan su estabilidad. Solubilidad Acuosa: Su solubilidad en H₂O dificulta su recuperación y reutilización eficiente en el medio de reacción.

Los métodos de inmovilización han logrado superar o mitigar estos problemas de manera significativa (Voet y Voet, 2006).

Existen varias técnicas de inmovilización enzimática, estas se agrupan en dos categorías principales basándose en la forma de enlace que se establece entre la enzima y el soporte: unión física y unión química (Lupo y González, 2012).

- Unión Física: Incluye variantes como el atrapamiento y la inclusión en membranas.
- Unión Química: Abarca el enlace covalente a soportes y el reticulado (o crosslinking).

4.3.1 Métodos de encapsulación enzimática.

La encapsulación se basa en la integración de una matriz tipo polimérica. Esta matriz crea un entorno que puede manejar el choque del material interno con el medio externo.

Específicamente, la técnica de micro-encapsulación se describe como un suceso en el que partículas de tamaño reducido son cubiertas por un recubrimiento. Este recubrimiento puede ser homogéneo o heterogéneo y da lugar a cápsulas que tienen una amplia gama de manejos industriales (Borgogna et al., 2010). La Figura 5 ilustra los distintos tipos de microcápsulas que pueden formarse mediante este proceso (Gharsallaio, 2007).

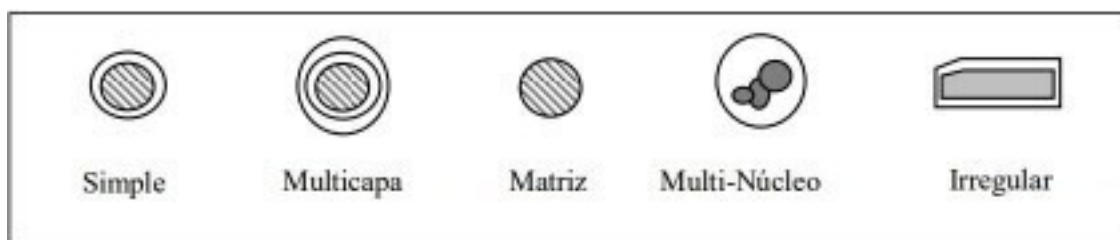


Figura 5. Tipos de microcapsulas

4.3.1.1. Encapsulación de gelificación externa

El mecanismo de la gelificación se produce cuando el ion calcio (Ca^{2+}) se difunde desde una fuente externa (la solución circundante) hacia el hidrocólide de alginato disuelto en una solución de pH neutro o estable.

La elaboración del gel comienza en el punto de contacto (interfase) y progresa hacia el centro del polímero conforme la superficie se satura con los iones calcio (Ca^{2+}). En este proceso, el catión divalente (Ca^{2+}), que está solubilizado en el agua, reemplaza al ion sodio (Na^+) que proviene de la sal de alginato.

El ion Ca^{2+} interactúa específicamente con las partes del ácido gúlico (bloques) de distintas moléculas de naturaleza poliméricas, estableciendo uniones transversales entre ellas. Sin embargo, el cloruro de calcio (CaCl_2) es la fuente de

calcio más utilizada debido a su alta disponibilidad, ocasionalmente se emplean otras sales, como el acetato monohidratado y el lactato de calcio (Helgerud et al., 2010).

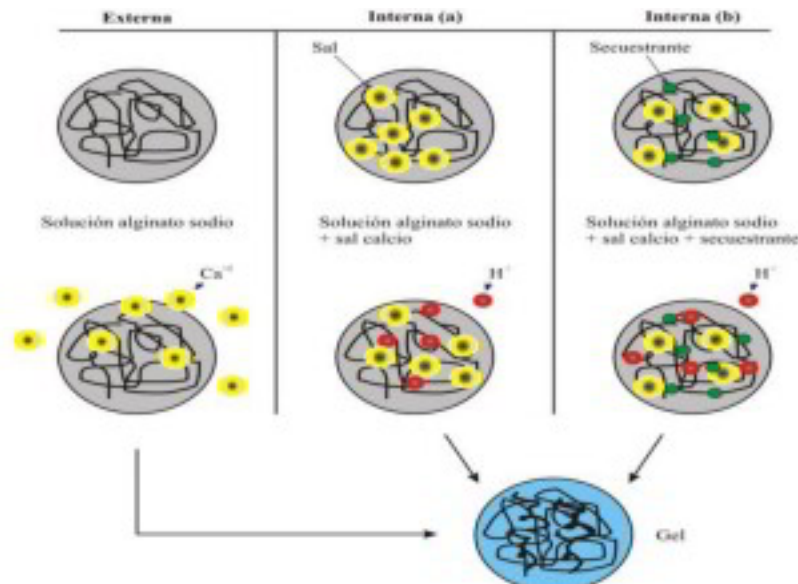
4.3.1.2 Encapsulación de gelificación interna

La encapsulación de gelificación interna se basa en la liberar controladamente iones de calcio (Ca^{2+}) que provienen de una fuente interna. Esta fuente es una sal de calcio que es de naturaleza insoluble, la cual se diversifica inicialmente en alginato de sodio.

Puede ser inducida de dos maneras:

1. Activación por pH: Cuando se utiliza calcio que es insoluble a un pH neutro o estable pero que se vuelve soluble en condiciones ácidas, es necesario añadir un ácido orgánico.
2. Mecanismo de Acción: El ácido orgánico se difunde a través del medio hasta llegar a la sal. Al acidificar el entorno, se logra solubilizar los iones calcio, permitiendo que inicien el proceso de gelificación.

Los diversos mecanismos de gelificación iónica (tanto interna como externa) pueden ser vistos en la Figura 6 (referencia a la imagen original) (Gharsallaio, 2007).



4.3.1.3 Encapsulación por extrusión

El método de extrusión para encapsulación se basa en la creación de gotas a partir de alginato que tiene el compuesto que se desea encapsular. Esto se logra al hacer pasar la solución a través de un dispositivo extrusor cuya velocidad de goteo y tamaño de boquilla están controlados (Chan et al., 2009).

Estas gotas van directamente sobre una parte que tiene la fuente del ion (como el calcio). Este ion desencadena la gelificación de forma inmediata a través del mecanismo de gelificación externa, formando así la microcápsula.

A pesar de su simplicidad, esta técnica presenta dos desventajas:

- **Tamaño de Cápsulas:** La principal limitación es la forma de las cápsulas producidas, el cual está directamente en relación con el diámetro de la boquilla del dispositivo extrusor.
- **Tiempo de Gelificación:** Como consecuencia de la producción individual, se requieren tiempos prolongados para completar la gelificación de grandes volúmenes (Mofidi et al., 2000).

4.3.1.4 Encapsulación por emulsión

Se basa en dispersar una parte líquida dentro de otro que es inmisible. En este sistema, la fase dispersa (o interna) está compuesta por la parte que contiene el reactivo a encapsular. La incorporación de un surfactante) es crucial, ya que facilita la formación de la emulsión, mejora su estabilidad y ayuda a controlar la diversificación de la forma de las gotas (Poncelet, 2001; de Vos et al, 2010).

El uso de la emulsificación para la preparación de cápsulas puede realizarse aplicando el proceso de gelificación externa como el de gelificación interna.

4.3.1.5 Encapsulación mediante secado por atomización

El proceso inicia con la preparación de una suspensión o emulsión que incluye tanto el compuesto que se va a encapsular como el material polimérico (la matriz encapsulante). Esta mezcla es luego pulverizada (atomizada) dentro de una cámara que contiene un aire caliente.

Esta pulverización hace que la evapore de manera inmediata agua de las microgotas. Como resultado, una parte queda interceptado dentro de una pequeña película encapsulante. Las micropartículas resultantes en polvo son posteriormente alejadas del gas a temperaturas más bajas (Martín-Villena et al, 2009; de Vos et al., 2010; López-Hernández, 2010).

4.3.2 Aplicaciones de la encapsulación

4.3.2.1 Microorganismos de forma probióticas

Estas se han incorporado en una amplia variedad de productos alimenticios, incluyendo yogures, helados, postres lácteos, bebidas a base de leche, cremas y quesos. A pesar de los beneficios que su consumo conlleva, el principal obstáculo ha sido asegurar la viabilidad y supervivencia de estos microorganismos. Factores como el procesamiento, el almacenamiento de los alimentos e, incluso, las condiciones agresivas del tracto gastrointestinal posterior a la ingesta, merman su supervivencia.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) llaman a los probióticos como microorganismos vivos (bacterias o levaduras) que, al ser consumidos o aplicados de forma localizada en cantidades adecuadas, aportan algunas ventajas para el sistema inmunológico del huésped, los cuales deben haber sido demostrados previamente (FAO/WHO, 2001).

La microencapsulación ha emergido como una solución eficaz, permitiendo la inmovilización de bacterias probióticas dentro de una matriz de alginato. Esta técnica es preferida por la simplicidad de su preparación, su excelente biocompatibilidad y su capacidad para retener a los microorganismos. Esta alta retención se debe a la gran diferencia de tamaño: el tamaño de poro de la matriz de alginato.

Debido a estas propiedades, la microencapsulación de probióticos se ha investigado intensamente con el propósito de proteger a los microorganismos y mejorar su biodisponibilidad tanto dentro de los productos alimentarios como una vez que llegan al intestino (Krasaekoop et al, 2003; 2004).

4.3.2.2 Compuestos activos de naturaleza no microbiana

La técnica de microencapsulación ha demostrado ser fundamental para proteger los compuestos activos. Este proceso previene su degradación química, la cual puede ser causada la hidrólisis, garantizando así el mantenimiento de sus propiedades funcionales.

Si se considera que el sabor y el aroma son propiedades sensoriales de gran importancia, la tecnología de encapsulación es vital para la industria alimentaria. Se utiliza con el fin de enmascarar sabores desagradables (como los astringentes o amargos) de ciertos componentes, o para protegerlos de la degradación, ya que esta degradación puede alterar su olor o sabor original. Una forma es la encapsulación de omega-3 y omega-6, que se usan para enriquecer alimentos pero que son altamente susceptibles a la oxidación y tienen un sabor poco agradable.

Compañías como Denomega Nutritional Oils implementaron la encapsulación de aceite de pescado en micro-esferas de alginato. Estas tienen tamaños que oscilan entre 1 y 32 μm y se producen utilizando la manera de emulsión y un cubrimiento adicional de goma.

Para la creación de estas esferas, se sigue un procedimiento específico: Inicialmente, se prepara una emulsión de agua en aceite (W/O), donde la sal de calcio se encuentra en la fase acuosa. Posteriormente, se disuelve de alginato

mientras se mantiene una moviéndose de manera constante. Esto provoca una inversión de fases, lo cual facilita la caída de las micro-esferas de alginato.

4.3.2.3 Encapsulación de lactasa

En desarrollos recientes, se han empleado nuevos materiales acarreadores, como gomas naturales y coloides, con el objetivo de crear mezclas que mejoren la detención de formas volátiles y extiendan su vida útil de las cápsulas. Un ejemplo exitoso es el uso de goma arábica para encapsular aceites esenciales de naranja, logrando disminuir significativamente su oxidación. Otra aplicación innovadora, diseñada para ofrecer otras formas a personas intolerantes a la lactosa, es la micro-encapsulación de lactasa con agarosa, recubierta posteriormente con chocolate (Nussinovitch, 2012).

Para la producción del tamaño de las esferas de alginato, se evaluaron inicialmente tres variables: la concentración de (CaCl_2), la concentración de alginato de sodio y la velocidad de rotación.

Mediante el análisis experimental y el cálculo de medidas de disolución, el promedio granulométrico y la pendiente de disolución, se identificó que las partes más influyentes en el suceso son la velocidad de rotación y la concentración de alginato.

Utilizando estas dos formas relevantes, junto con un diseño factorial y una función de deseabilidad, se determinó el punto óptimo para producir , resultando en la siguiente ecuación de la función de deseabilidad (FD):

$$FD=0.804-0.0104X_1-0.006X_2+0.0045X_1X_2+0.0226X_1^2+0.036X_2^2$$

Al derivar este modelo, se obtuvieron las coordenadas del punto óptimo ($X_1:0.22;X_2:0.07$). Estas coordenadas corresponden a las siguientes condiciones específicas para maximizar la función de deseabilidad (Davila, 2009):

- Concentración de cloruro de calcio: 2%

- Concentración de alginato de sodio: 5%
- Velocidad de rotación: 1036 rpm

Para la etapa final, que consiste en el encapsulamiento de la enzima (lactasa) en las esferas de alginato, las variables de estudio definidas fueron la temperatura de reacción, la velocidad de agitación y la cantidad de enzima.

En base a una curva de calibración de lactosa y el análisis de los resultados obtenidos, se determinaron las condiciones más favorables para atrapar la enzima en las perlas:

- Temperatura: 37°C
- Tiempo de reacción: 7 horas
- Velocidad de agitación: 148 rpm
- Concentración de enzima: 9.6 ml/lit

En estas formas optimizadas, el valor de lactosa residual en el producto final fue del 1.003%. Este resultado cumple con los parámetros de las normas internacionales para la producción de leche deslactosada (Davila, 2009).

5. Conclusiones

Las técnicas de encapsulación han permitido grandes avances en aplicaciones alimentarias y farmacéuticas, como la protección de enzimas, específicamente la lactasa que se enfrenta a condiciones adversas del entorno, como cambios de pH, temperatura o acción de proteasas. Al encapsular la lactasa en materiales biocompatibles, como alginato de sodio, gelatina o polímeros sintéticos, se mejora su estabilidad, actividad y tiempo de vida útil, estas técnicas facilitan una liberación controlada de la enzima en el sitio de acción, como el intestino delgado, optimizando su funcionalidad en personas con intolerancia a la lactosa.

6. Referencias Bibliográficas

Amaretti A, Tamburini E, Bernardi T, et al. Substrate preference of *Bifidobacterium adolescentis* MB 239: compared growth on single and mixed carbohydrates. *Appl Microbiol Biotechnol* 2006;73:654-62

Arroyo, M. (1998). Inmovilización de enzimas. Fundamentos, métodos y aplicaciones. *Ars. Pharmaceutical*, 39(2), 23-39.

Burgain, J.; Gaiani, C.; Linder, M. and Scher, J. 2011. Encapsulation of probiotic living cells: from laboratory scale to industrial applications. *Journal of Food Engineering*. 104(4):467-483.

Champagne, C.P.; Blahuta, N.; Brion, F. and Gagnon, C. 2000. A vortex-bowl disk atomizer system for the production of alginate beads in a 1500-liter fermentor. *Biotechnology and Bioengineering*. 68(6):681-688.

Champagne, Claude P. and Fustier, Patrick. 2007. Microencapsulation for the improved delivery of bioactive compounds into foods. *Current Opinion in Biotechnology*.

18(2):184-190.

Enattah NS, Sahi T, Savilahti E, Terwilliger JD, Peltonen L, Jarvela I. Identification of a variant associated with adult-type hypolactasia. *Nat. Genet.* 2002;30:233-7.

Estada Gimeno Ú. Metabolismo de los hidratos de carbono en los enterocitos de sujetos con enfermedad de Crohn y colitis ulcerosa. 2007.

Helgerud, Trond; Gåserød, Olav; Fjæreide, Therese; Andersen, Peder O. and Larsen, Christian K. 2010. Alginates. In *Food stabilizers, thickeners and gelling agents.* (pp. 5072). United Kingdom: WileyBlackwell.

La Orden Izquierdo E, Carabaño Aguado I, Pelayo García FJ. Situación actual de la intolerancia a la lactosa en la infancia. *Pediatría Atención Primaria.* 2011;13:271-8.

López-Hernández, Orestes Darío. 2010. Microencapsulación de sustancias oleosas mediante secado por aspersión. *Revista Cubana de Farmacia.* 44(3):381-389.

Lupo, P. B., Gonzalez, A.C.(2012). Microencapsulacion con alginato en alimentos. Tecnicas y aplicaciones. *Revista venezolana de ciencia y tecnología de alimentos.*, 131151.

Misselwitz, B., Pohl, D., Frühauf, H., Fried, M., Vavricka, S. R., & Fox, M. (2013). Lactose malabsorption and intolerance: pathogenesis, diagnosis and treatment. *United European Gastroenterology Journal*, 1(3), 151–159.

Mogrovejo Davila, Urjiles Jumbo, Sanchez Jáuregui.2009. Optimización de las condiciones de hidrólisis utilizando B-galactosidasa inmovilizada por atrapamiento y determinación de lactosa residual., 55-56.

Pal, Kunal; Paulson, Allan T. and Rousseau, Dérick. 2009. Biopolymers in controlled release delivery systems. In *Modern biopolymer science. Bridging the divide between fundamental treatise and industrial application.* (pp. 519-557). LondonBurlington-San Diego: Academic Press.

Pal, Kunal; Paulson, Allan T. and Rousseau, Dérick. 2009. Biopolymers in controlled release delivery systems. In *Modern biopolymer science. Bridging the divide between fundamental treatise and industrial application.* (pp. 519-557). LondonBurlington-San Diego: Academic Press.

Paz Olivas Y. Síntomas de intolerancia a la lactosa en consumidores de leche deslactosada comparada con la leche sin lactosa del hospital Hipólito Unanue del 2015. Lima, Perú: Universidad San Ignacio de Loyola; 2018.

Poulter M, Hollox E, Harvey CB, Mulcare C, Peuhkuri K, Kajander K, et al. The causal element for the lactase persistence/non-persistence polymorphism is located in a 1 Mb region of linkage disequilibrium in Europeans. *Ann Hum Genet.* 2003;67:298-311

Rosado JL, Díaz M, Rosas A, Griffit I, García OP. Calcium absorption from corn tortilla is relatively high and is dependent upon calcium content and liming in Mexican women. *J Nutr.* 2005;135:2578-81.

Schönfeldt, H. C., Hall, N. G., & Smit, L. E. (2012). The need for country specific composition data on milk. *Food Research International*, 207-209.

Shukla, A., & Jain, A. (2020). Encapsulation of β -galactosidase: strategies and applications in food processing. *Food Bioscience*, 35, 100568.

Storhaug CL, Fosse SK, Fadness LT. Country, regional, and global estimates for lactose malabsorption in adults: a systematic review and meta- analysis. *Lancet Gastroenterol Hepatol.* 2017;2:738---46.

Szilagyi A, Ishayek N. Lactose intolerance, dairy avoidance, and treatment options. *Nutrients.* 2018;10:E1994.

Vandenplas Y. Lactose intolerance. *Asia Pac J Clin Nutr.* 2015;24 suppl 1:S9---13.

Villanueva Torregrosa D, Mendoza Torres E, Varela Prieto L, Villarreal Camacho J. Conceptual basis of the diagnosis of lactose intolerance, hypolactasia and lactose maldigestion. *Revista Salud Uninorte.* 2015;31(1):101-17.

Voet, D., Voet, J.(2006). *Bioquímica*. Montevideo: Panamericana.

Wray GA, Hahn MW, Abouheif E, Balhoff JP, Pizer M, Rockman MV, et al. The evolution of transcriptional regulation in eukaryotes. *Mol Biol Evol.* 2003;20:1377-1419

Zuidam, Nicolaas Jan and Shimoni, Eyal. 2010. Overview of microencapsulates for use in food products or processes and methods to make them. In *Encapsulation technologies for*

active food ingredients and food processing. (pp. 3-29). New York, NY, USA: Springer Science+Business Media, LLC.