



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE QUÍMICA

**EFFECTO DEL PROCESO DE ELABORACIÓN  
DE LOS ALIMENTOS SOBRE EL CONTENIDO  
DE VITAMINAS**

**T E S I N A**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**QUÍMICA DE ALIMENTOS**

PRESENTA:

**DIANA LAURA RAMÍREZ SÁNCHEZ**



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.

2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**           **Profesor: Alberto Tecante Coronel**  
**VOCAL:**               **Profesor: Bertha Julieta Sandoval Guillén**  
**SECRETARIO:**       **Profesor: Francisco Ruiz Terán**  
**1er. SUPLENTE:**     **Profesor: Jazmín Pineda Loperena**  
**2° SUPLENTE:**       **Profesor: Federico Nieto Pineda**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: FACULTAD DE QUÍMICA**

**ASESOR DEL TEMA:**

**QFB. Bertha Julieta Sandoval Guillén** \_\_\_\_\_

**SUSTENTANTE:**

**Diana Laura Ramírez Sánchez** \_\_\_\_\_

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>2</b>
<b>1. ANTECEDENTES</b> .....	<b>3</b>
<b>2. METODOLOGÍA</b> .....	<b>6</b>
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>9</b>
3.1. Selección de alimentos con base en el contenido de vitaminas.....	<b>9</b>
3.2. Efecto del procesamiento convencional en la cantidad de vitaminas.....	<b>15</b>
3.2.1. Vitaminas más afectadas durante el procesamiento térmico.....	<b>22</b>
3.2.2. Determinación de la vida útil de alimentos congelados con base en el contenido de vitamina C.....	<b>24</b>
3.3. Efecto de las tecnologías emergentes en la cantidad de vitaminas.....	<b>31</b>
3.3.1. Impacto de la matriz alimentaria sobre la estabilidad de las vitaminas.	<b>38</b>
3.3.2. Propuesta de modelo matemático para predecir la pérdida de vitaminas.....	<b>42</b>
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>46</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>47</b>
<b>ANEXO I</b> .....	<b>57</b>
<b>ANEXO II</b> .....	<b>58</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tecnologías emergentes de procesamiento de alimentos.....	4
Tabla 2. Métodos convencionales de procesamiento de alimentos.....	5
Tabla 3. Alimentos crudos con mayor contenido de vitamina A (USDA, 2021).....	10
Tabla 4. Alimentos crudos con mayor contenido de vitamina B1 (Tiamina) (USDA, 2021).....	11
Tabla 5. Alimentos crudos con mayor contenido de vitamina B2 (Riboflavina) (USDA, 2021).....	11
Tabla 6. Alimentos crudos con mayor contenido de vitamina B6 (Piridoxina) (USDA, 2021).....	12
Tabla 7. Alimentos crudos con mayor contenido de vitamina B9 (Ácido fólico) (USDA, 2021).....	13
Tabla 8. Alimentos crudos con mayor contenido de vitamina C (USDA, 2021).....	13
Tabla 9. Alimentos representativos del grupo de estudio.....	14
Tabla 10. Contenido de Vitamina A (µg) presente en 100 g de alimento expresado en base seca (Adaptado de Kmiecik & Lisiewska, 1999; Leskova <i>et al.</i> , 2006; ANSES, 2021; USDA, 2021).....	16
Tabla 11. Contenido de Vitamina B1 (mg) presente en 100 g de alimento expresado en base seca (Adaptado de Bernas & Jaworska, 2016; Sarkar <i>et al.</i> , 2020; Alibas <i>et al.</i> , 2021; ANSES, 2021; USDA, 2021).....	17
Tabla 12. Contenido de Vitamina B2 (mg) presente en 100 g de alimento expresado en base seca (Adaptado de Kmiecik & Lisiewska, 1999; Leskova <i>et al.</i> , 2006; Sarkar <i>et al.</i> , 2020; Alibas <i>et al.</i> , 2021; ANSES, 2021; USDA, 2021).....	17
Tabla 13. Contenido de Vitamina B6 (mg) presente en 100 g de alimento expresado en base seca (Adaptado de Leskova <i>et al.</i> , 2006; ANSES, 2021; USDA, 2021).....	18
Tabla 14. Contenido de Vitamina B9 (µg) presente en 100 g de alimento expresado en base seca (Adaptado de Kmiecik & Lisiewska, 1999; Leskova <i>et al.</i> , 2006; Sarkar <i>et al.</i> , 2020; ANSES, 2021; USDA, 2021).....	19

Tabla 15. Contenido de Vitamina C (mg) presente en 100 g de alimento expresado en base seca (Adaptado de Kmiecik & Lisiewska, 1999; Sarkar <i>et al.</i> , 2020; Alibas <i>et al.</i> , 2021; ANSES, 2021; USDA, 2021).....	<b>19</b>
Tabla 16. Porcentaje de pérdida de vitaminas (%) y temperatura de procesamiento, aplicados a los alimentos evaluados. Métodos convencionales (Kmiecik & Lisiewska, 1999; Bernas & Jaworska, 2016; Sarkar <i>et al.</i> , 2020).....	<b>22</b>
Tabla 17. Contenido de vitamina C (mg/100 g) en cebollines congelados (Kmiecik & Lisiewska, 1999).....	<b>25</b>
Tabla 18. Resumen evaluación cinética para degradación vitamina C en cebollines congelados (a partir de los datos reportados por Kmiecik & Lisiewska, 1999).....	<b>27</b>
Tabla 19. Vida útil de los cebollines congelados a diferentes temperaturas.....	<b>28</b>
Tabla 20. Parámetros cinéticos para la vitamina C presente en alimentos sometidos a congelación.....	<b>28</b>
Tabla 21. Determinación de la vida útil de brócoli a diferentes temperaturas de congelación.....	<b>29</b>
Tabla 22. Contenido de Vitamina A (µg) presente en 100 g de alimento expresado en base seca. Tecnologías emergentes (Adaptado de Kilcast, 1994; Sebastiao <i>et al.</i> , 2002; Arvanitoyannis & Stratakos, 2010; Khattak & Rahman, 2016; Zhang <i>et al.</i> , 2016; USDA, 2021).....	<b>33</b>
Tabla 23. Contenido de Vitamina B1 (mg) presente en 100 g de alimento expresado en base seca. Tecnologías emergentes (Adaptado de Sancho <i>et al.</i> , 1999; Dionisio <i>et al.</i> , 2009; USDA, 2021).....	<b>34</b>
Tabla 24. Contenido de Vitamina B2 (mg) presente en 100 g de alimento expresado en base seca. Tecnologías emergentes (Adaptado de Kilcast, 1994; Sancho <i>et al.</i> , 1999; Villavicencio <i>et al.</i> , 2000; Estrada <i>et al.</i> , 2005; Khattak & Rahman, 2016; Aylangan <i>et al.</i> , 2017; Firouzi <i>et al.</i> , 2021; USDA, 2021).....	<b>34</b>

Tabla 25. Contenido de Vitamina B6 (mg) presente en 100 g de alimento expresado en base seca. Tecnologías emergentes (Adaptado de Kilcast, 1994; Sancho <i>et al.</i> , 1999; Villavicencio <i>et al.</i> , 2000; Estrada <i>et al.</i> , 2005; Khattak & Rahman, 2016; Aylangan <i>et al.</i> , 2017; Firouzi <i>et al.</i> , 2021; USDA, 2021).....	<b>35</b>
Tabla 26. Contenido de Vitamina B9 (µg) presente en 100 g de alimento expresado en base seca. Tecnologías emergentes (Adaptado de Sancho <i>et al.</i> , 1999; Villavicencio <i>et al.</i> , 2000; Estrada <i>et al.</i> , 2005; Verlinde <i>et al.</i> , 2008; Khattak & Rahman, 2016; Aylangan <i>et al.</i> , 2017; Pinela <i>et al.</i> , 2019; Firouzi <i>et al.</i> , 2021; USDA, 2021).....	<b>35</b>
Tabla 27. Contenido de Vitamina C (mg) presente en 100 g de alimento expresado en base seca. Tecnologías emergentes (Adaptado de Sancho <i>et al.</i> , 1999; Khattak & Rahman, 2016; USDA, 2021).....	<b>36</b>
Tabla 28. Porcentaje de pérdida de vitaminas (%) y condiciones de procesamiento, aplicados a los alimentos evaluados. Tecnologías emergentes (Kilcast, 1994; Sancho <i>et al.</i> , 1999; Villavicencio <i>et al.</i> , 2000; Sebastiao <i>et al.</i> , 2002; Estrada <i>et al.</i> , 2005; Verlinde <i>et al.</i> , 2008; Zhang <i>et al.</i> , 2016; Aylangan <i>et al.</i> , 2017; Pinela <i>et al.</i> , 2019; Firouzi <i>et al.</i> , 2021).....	<b>38</b>
Tabla 29. Prueba Tukey de porcentaje de pérdida de vitamina B2 durante el procesamiento de altas presiones a condiciones de 600 MPa / 30 min.....	<b>39</b>
Tabla 30. Prueba Tukey de porcentaje de pérdida de vitamina B9 durante el procesamiento de altas presiones a condiciones de 400 MPa / 30 min.....	<b>40</b>
Tabla 31. Ecuaciones regresivas de predicción de vitamina B2 en alimentos sometidos a irradiación.....	<b>43</b>
Tabla 1A. Contenido de Humedad (%) considerada para los cálculos en base seca (Kilcast, 1994; Kmiecik & Lisiewska, 1999; Sancho <i>et al.</i> , 1999; Villavicencio <i>et al.</i> , 2000; Estrada <i>et al.</i> , 2005; Leskova <i>et al.</i> , 2006; Khattak & Rahman, 2016; Aylangan <i>et al.</i> , 2017; Sarkar 2020; Alibas <i>et al.</i> , 2021; Firouzi <i>et al.</i> , 2021; ANSES, 2021; USDA, 2021).....	<b>57</b>
Tabla 2A. Correlación entre dos variables (Reynaga, 2007).....	<b>58</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de pérdida (%) de las vitaminas estudiadas en A) cebollines congelados a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , B) hígado de pollo secado a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y C) espinacas secadas a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	<b>23</b>
Figura 2. Rapidez de pérdida de la vitamina C en un modelo cinético de primer orden para los cebollines almacenados a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	<b>26</b>
Figura 3. Gráfica de vida de anaquel de cebollines y brócoli congelados basados en el 50 % de pérdida de Vitamina C.....	<b>29</b>
Figura 4. Porcentaje de pérdida de los alimentos estudiados para A) vitamina B2 durante el proceso de irradiación a diferentes dosis y B) vitamina B9 durante el proceso de irradiación a $5\text{ kGy}$ en distintos alimentos.....	<b>41</b>
Figura 5. Comparación de las diferentes regresiones propuestas para el modelo matemático.....	<b>43</b>

## INTRODUCCIÓN

Las vitaminas son compuestos orgánicos que el individuo necesita para los procesos metabólicos. El organismo es incapaz de sintetizar vitaminas, por lo que se deben obtener de los alimentos (excepto vitamina D, K y B3), además, no están relacionadas química ni funcionalmente con otras sustancias, por lo que no pueden ser reemplazadas (Tolonen, 1996).

El hombre primitivo no conocía la importancia de las vitaminas y, debido a que cazaban, consumían los alimentos en su estado natural. Durante su evolución comenzó a cocinarlos, aprendiendo formas y técnicas térmicas para el procesamiento de alimentos (Aguilar, 2012).

La demanda de los consumidores de productos alimenticios naturales y nutritivos ha aumentado rápidamente. Por lo tanto, el desarrollo de tecnologías innovadoras no térmicas, llamadas “tecnologías emergentes”, satisfacen la demanda de alimentos de alta calidad, inocuos, nutritivos y mínimamente procesados (Khouryieh, 2021).

Estos procesos (convencionales y tecnologías emergentes) se centran fundamentalmente en: Inactivación de enzimas, inhibir patógenos transmitidos por los alimentos, prolongación de la vida útil, mejor digestibilidad y biodisponibilidad de nutrientes. Por otro lado, estas operaciones tienen consecuencias no intencionales y no deseadas, como la pérdida de vitaminas dado a que son muy sensibles a la degradación.

Analizar el efecto que producen estos procesamientos en las vitaminas es fundamental puesto que son de los nutrientes más importantes en la alimentación debido a que mejoran la salud de forma integral. La deficiencia de vitaminas en la dieta puede derivar problemas como: Fatiga, mareos, debilidad muscular, desequilibrios hormonales, entre otros (Chazi, 2006; Russell y Suter, 2016; Merve & Seid, 2019).

Este trabajo tiene como propósito presentar una fuente de información útil sobre la estabilidad de las vitaminas durante los procesamientos térmicos y no térmicos, en donde se evalúen las variables que más afectan su comportamiento. Así como determinar la vida útil de algunos alimentos y proponer un modelo matemático que se adapte a los datos reportados.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Evaluar los efectos del procesamiento térmico y no térmico de alimentos en la estabilidad de las vitaminas para analizar las variables que más afectan su comportamiento

### **Objetivos Específicos**

Definir el grupo de alimentos con mayor contenido de vitaminas para seleccionar los objetos de estudio

Discutir cuáles son los principales procesamientos térmicos y no térmicos y con base en esto, seleccionar los empleados en alimentos frescos

Estudiar el comportamiento de las vitaminas durante los diferentes procesamientos térmicos y no térmicos aplicados a los alimentos para analizar si la temperatura influye en su estabilidad

Conocer la cinética de deterioro de vitaminas en procesamientos convencionales para estimar la vida útil en ciertos alimentos frescos

Proponer un modelo matemático para predecir los cambios en el contenido de vitaminas hidrosolubles en tecnologías emergentes empleadas en alimentos frescos

Discutir que variables además de la temperatura, influyen en la estabilidad de las vitaminas

## 1. ANTECEDENTES

Las vitaminas se descubrieron a finales del siglo XIX cuando el bioquímico inglés Sir Frederick Hopkins (1861 – 1967) observó que las ratas sometidas a una dieta de productos “purificados” detenían su proceso de crecimiento y este continuaba cuando se les suministraba diario una porción pequeña de “leche fresca”. Este y otros experimentos demostraron la existencia de sustancias orgánicas desconocidas en los alimentos (Palacios, 2013). Por su parte, el bioquímico estadounidense de origen polaco Casimir Funk (1884 – 1967) propuso denominar a estas sustancias: *Vitaminas*, cuya etimología es “vita”: vida y “amina”: sustancia que contiene amoníaco (Chazi, 2006).

El término “**Vitamina**” es el descriptor de todos los factores con características comunes de ser compuestos orgánicos que no son sintetizados por el huésped, pero que se encuentran comúnmente en los alimentos en cantidades mínimas y son esenciales para las funciones fisiológicas normales y la prevención de síndromes causados por su deficiencia específica (Combs & McClung, 2017). Actualmente, se han estudiado 13 vitaminas las cuales se clasifican comúnmente con base en su solubilidad:

- **Hidrosolubles**: Vitamina C, vitaminas del grupo B (B1, B2, B3, B5, B6, B8, B9, B12).
- **Liposolubles**: Vitamina A, D, E y K.

La industria alimentaria, con el objetivo de ofrecer al consumidor una gran variedad de productos de calidad en cualquier época del año, además de facilitar su comercialización en diferentes países, ha innovado diferentes operaciones convencionales de procesamiento que incluye procesamientos no térmicos (Tabla 1) y térmicos (Tabla 2). Los avances en el desarrollo de tecnologías innovadoras no térmicas satisfacen la demanda de los consumidores de alimentos de alta calidad, inocuos, nutritivos y mínimamente procesados (Aguilar, 2012; Khouryieh, 2021).

Uno de los métodos más comunes y útiles para la predicción de la estabilidad de las vitaminas es el uso de una expresión general de la velocidad de reacción para la degradación cinética y mediante la ecuación de Arrhenius. Sin embargo, se han creado modelos siguiendo los pasos del procesamiento desde la preparación, hasta la esterilización (Castillo y Miranda, 2009; Corradini & Peleg, 2006; Rigaux *et al.*, 2016).

**Tabla 1.** Tecnologías emergentes de procesamiento de alimentos

Tecnología	Características	Funciones	Aplicaciones
<b>Procesamiento de alta presión (HPP)</b> (Téllez <i>et al.</i> , 2001; Fellows, 2017)	Aplicación de presión (100 - 800 MPa), a alimentos envasados durante un pulso de milisegundos a varios minutos. Este proceso se realiza en el envase final	Pasteurizar los alimentos para inactivar microorganismos y enzimas. Conserva la mayoría de sus características sensoriales y calidad nutricional	Algunas de sus aplicaciones son: Maíz, sorgo, algunas frutas y vegetales como: Zanahoria, lechuga y tomate, mermeladas y alimentos con pH ácido
<b>Irradiación</b> (Fellows, 2017; Moreira & Castell, 2021)	Los alimentos se someten a una cantidad controlada de radiación ionizante, como haces de electrones, rayos X o radiación gamma, durante un período de tiempo específico	Eliminar microorganismos dañinos	La FDA (2018) aprobó: Carne de res y cerdo, crustáceos, frutas y vegetales frescos, moluscos, carne de ave, semillas para germinar, huevos, especias y condimentos
<b>Procesamiento de campo eléctrico pulsado (PEF)</b> (Terefe <i>et al.</i> , 2015; Hernández <i>et al.</i> , 2019; Rai <i>et al.</i> , 2021)	Aplicación de pulsos cortos de campos eléctricos de alta intensidad ( $10 - 80 \text{ kV cm}^{-1}$ ) durante microsegundos a milisegundos	Se produce una reducción significativa en el número de microorganismos vegetativos debido a la formación de poros en las membranas celulares	Se aplica principalmente a alimentos líquidos y se colocan entre dos electrodos como jugos de frutas, leche, claras de huevo líquidas y productos cárnicos
<b>Luz Pulsada</b> (John & Ramaswamy, 2018)	Aplicación de pulsos sucesivos de luz intensa (lámpara de xenón) sobre el producto a tratar (100 - 350 microsegundos por pulso) situado en la cámara de tratamiento	Inactivar una amplia gama de microorganismos (formas vegetativas y esporuladas), así como sistemas enzimáticos implicados en el deterioro de los alimentos	Algunos de los productos tratados mediante pulsos de luz con resultados bastante satisfactorios han sido los productos pesqueros y cárnicos, huevo, queso, frutas y vegetales

**Tabla 2.** Métodos convencionales de procesamiento de alimentos

Método	Características	Funciones	Aplicaciones
<b>Pasteurización</b> (Deák, 2014a)	<b>Pasteurización:</b> Temperatura por debajo del punto de ebullición del agua (65 a 85 °C / 15 a 30 min) <b>Ultrapasteurización:</b> Temperaturas superiores a 100 °C durante unos segundos	Inhibir el deterioro microbiano o enzimático	<b>Pasteurización:</b> Productos con pH < 4.5 en botellas, frascos o latas, así como algunos productos cárnicos <b>Ultrapasteurización:</b> Alimentos líquidos (bebidas, jugos de frutas y verduras, leche) y algunos productos lácteos
<b>Esterilización</b> (Deák, 2014b)	Se emplean autoclaves o retortas a temperatura de 121 °C durante 15 min o su equivalente	Eliminar <i>Clostridium botulinum</i> y la mayoría de los microorganismos de deterioro formadores de esporas	Se aplica principalmente a alimentos que contienen un pH > 4.5 y alimentos en donde exista peligro de las esporas del patógeno
<b>Congelación</b> (Kasiviswanathan <i>et al.</i> , 2019)	Conversión del agua libre en hielo y la consiguiente reducción de la actividad del agua. En algunos alimentos, incluso a -40 °C, algo de agua permanece sin congelar (agua ligada)	Reducir el crecimiento de microorganismos y la actividad enzimática, debido a la falta de disponibilidad de agua	Se utiliza preferentemente en pescados, mariscos, carne de cerdo y res, frutas y también vegetales debido a que le da un valor agregado y una sensación de frescura al producto
<b>Secado</b> (Mousakhani <i>et al.</i> , 2021)	Su propósito es eliminar parcialmente el agua mediante su evaporación (con el uso de una fuente de calor) de la matriz de los alimentos	Extender la vida útil y prevenir el deterioro de los alimentos	Se aplica principalmente a granos y semillas, aunque actualmente se está incrementando su uso en frutas

## 2. METODOLOGÍA

La presente investigación inició con la búsqueda del origen de las vitaminas, generalidades, así como su importancia en la salud humana. A partir de esto, se investigó acerca de las ventajas y desventajas que otorga el procesamiento de alimentos enfocado particularmente en el comportamiento de las vitaminas.

Se revisaron los principales métodos de procesamiento convencionales (térmicos), así como las tecnologías emergentes (no térmicos). De cada método se recabaron las principales características, funcionalidad y aplicaciones en alimentos.

Se realizó la búsqueda de los modelos matemáticos existentes para la predicción de la pérdida de vitaminas, con el fin de evaluar las diferentes variables que pueden influir en la pérdida de estos micronutrientes.

A través de la consulta de bases de datos de composición de alimentos, se elaboraron Tablas (Tablas 3 – 8) con los diez alimentos crudos seleccionados por su mayor contenido de vitaminas (A, B1, B2, B6, B9 y C), estas incluyen la comparación del contenido de vitamina presente en 100 g de alimento crudo, así como el contenido de vitamina por porción de alimento con el fin de evaluar el % VRN (Valor de Referencia de Nutriente) que otorga por porción habitual de consumo con base en la Ingesta Diaria Sugerida (IDS) para la Población Mexicana. Esto con el fin de poder elegir a los alimentos tuvieran el mayor contenido de las vitaminas estudiadas.

Se seleccionaron los alimentos para la presente investigación, los procesos convencionales que más se aplican a estos productos y las tecnologías emergentes que tienen mayor demanda en Norteamérica (Canadá, Estados Unidos y México) con base en Jermann *et al.*, (2015) y Khouryieh (2021).

Posteriormente se elaboraron las Tablas del contenido de las diferentes vitaminas estudiadas presente en 100 g de alimento crudo en comparación con el contenido de vitamina a través de los distintos procesamientos térmicos (Tablas 10 – 15) y no térmicos (Tablas 22 – 27). La comparación en el contenido de vitaminas se expresó en base seca, el cálculo se realizó a partir del contenido de humedad reportado en las bases de datos y en los artículos científicos que se revisaron en esta investigación (Anexo I).

El cálculo para determinar el contenido de vitaminas en base seca se realizó mediante el siguiente algoritmo:

$$\text{Vitamina en Base Seca} = \left( \frac{\text{contenido Vitamina}}{100 \text{ g alimento}} \right) \left( \frac{100 \text{ g alimento}}{100 - \text{Humedad (g)}} \right) * 100$$

$$\text{Vitamina en Base Seca} = \left( \frac{\text{contenido Vitamina}}{100 - \text{Humedad (g)}} \right) * 100$$

A partir de las Tablas de comparación, se analizó el procesamiento térmico y no térmico, así como las posibles causas del comportamiento de éstas con el fin de evaluar los factores que tuvieron más impacto.

Una vez que se reunieron las condiciones del tratamiento térmico aplicado a los alimentos, se determinaron con ayuda de gráficas las vitaminas que son más inestables a la temperatura.

Para evaluar el efecto de la matriz en la estabilidad de las vitaminas frente a la aplicación de altas presiones, se realizaron análisis de varianza de una vía (ANOVAS) con su respectiva comparación múltiple (prueba de Tukey). Para el caso de irradiación se graficó la pérdida de vitaminas en los alimentos estudiados a las dosis de radiación aplicada para evaluar alguna relación en su comportamiento.

Adicionalmente, se propuso un modelo matemático para predecir la pérdida de vitaminas para el proceso de irradiación con base en las variables obtenidas.

Finalmente, con la ecuación de Arrhenius se determinaron los parámetros cinéticos de los alimentos estudiados para la vitamina C sometidos a congelación con el fin de calcular su vida útil.

Como parte de la metodología a seguir, se recabaron diversas investigaciones bibliográficas acerca del efecto que produce la aplicación de técnicas térmicas y no térmicas sobre el contenido de vitaminas presente en los alimentos estudiados en este trabajo. La información seleccionada corresponde al periodo del 2000 a 2021, excepto la que, debido a la calidad de la investigación, se eligió para desarrollar el presente trabajo. Tal información fue obtenida de manera digital principalmente proveniente de artículos científicos nacionales e internacionales (artículos de investigación y artículos de revisión)

existentes en la base de datos de las bibliotecas de la UNAM (*Elsevier, ScienceDirect, FSTA: Food Science and Technology Abstracts*), así como libros digitales de la misma biblioteca y localizados en la web.

Adicionalmente se consultaron Tablas y bases de datos de composición de alimentos como: U.S. Department of Agriculture (USDA, 2021) y Ciqual Table de composition nutritionnelle des aliments (ANSES, 2021).

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1. Selección de alimentos con base en el contenido de vitaminas**

Las vitaminas hidrosolubles que se estudiaron en este trabajo (B1, B2, B6, B9 y C), se seleccionaron debido a que se pierden fácilmente en procesos húmedos. La aplicación de calor generalmente implica pérdida nutricional que radica en la intensidad del tratamiento térmico. La vitamina C se seleccionó porque es la más lábil en presencia de humedad y oxígeno, pH, agentes oxidantes, temperatura y presencia de iones metálicos (King y de Pablo, 1987).

Las vitaminas solubles en agua actúan como coenzimas y están involucradas en procesos bioquímicos, reacciones tales como: Metabolismo energético, metabolismo de aminoácidos, biosíntesis de aminoácidos, ácidos grasos y azúcares pentosa (ribosa y desoxirribosa), síntesis de ADN, transferencia de una unidad de carbono y sirven como antioxidantes en muchas reacciones (Yaman *et al.*, 2021).

Las vitaminas B1 y B2 son esenciales para el correcto crecimiento del cuerpo. Regulan, entre otras cosas, el metabolismo de los neurotransmisores, lo que inhibe el desarrollo de la depresión. La falta o deficiencia significativa de tiamina (B1) en la alimentación, causa una enfermedad llamada “beriberi” (Korus, 2020).

La única vitamina liposoluble que se evaluó es la vitamina A, la cual regula la producción y la actividad de las células del sistema inmune conocidos como linfocitos T, que evitan que los virus causen daños una vez que entran al cuerpo y debido a que es la más susceptible al calor. Se encuentra asociada con la fase lipídica de los alimentos por lo que la pérdida por oxidación es función de la temperatura, presencia de oxígeno y es catalizada por la luz y los metales al igual que en la oxidación de las grasas (King y de Pablo, 1987).

Las vitaminas se encuentran presentes en cantidades muy pequeñas en todos los alimentos por lo que llevar una dieta equilibrada ayuda a cumplir con la cantidad de vitaminas que necesita el cuerpo humano para no sufrir de algún síndrome derivado de la deficiencia de alguna de éstas (Latham, 2002; Servín, 2013). A continuación, se mencionan las más importantes y su principal fuente.

La vitamina A se encuentra principalmente en las hojas verde oscuro, como las de amaranto, espinacas y yuca. Varias frutas pigmentadas y hortalizas, como mangos, papayas y tomates, contienen cantidades útiles. El betacaroteno (caroteno que el cuerpo fácilmente transforma en vitamina A) también está presente en las variedades amarillas de camote y en las hortalizas amarillas como la calabaza. Las zanahorias son fuentes ricas. El maíz amarillo es el único cereal que contiene caroteno (Latham, 2002). El estándar internacional para la medición de la vitamina A es el 'equivalente de la actividad del retinol' (RAE por sus siglas en inglés), que representa la actividad de esta vitamina como retinol. Los alimentos con mayor contenido en vitamina A se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Alimentos crudos con mayor contenido de vitamina A (USDA, 2021)

	Contenido de vitamina A RAE, por cada 100 g de alimento (µg)	Contenido de vitamina A (µg), por porción de alimento	% VNR* por porción
Hígado de pato	11984	1198.40 (10 g)	210.99
Hígado de pollo	3296	1450.00 (44 g)	255.28
Zanahoria	835	601.00 (73 g)	105.81
Espinaca	469	141.00 (30 g)	24.82
Calabaza	426	494.00 (116 g)	86.97
Cebollines	218	6.54 (3 g)	1.15
Camote	189	66.20 (35 g)	11.76
Melón	169	264.00 (156 g)	46.48
Huevo completo	160	80.00 (50 g)	14.08
Mango	54	89.10 (165 g)	15.69

\*IDS (Ingesta Diaria Sugerida) = 568 µg

La vitamina B1 se encuentra ampliamente en los alimentos de origen vegetal y animal. Las fuentes más ricas son los granos de cereales y semillas, como los salvados de arroz, trigo y otros. En estos, la tiamina se encuentra sobre todo en el germen y en las capas externas (Latham, 2002). Los alimentos con mayor contenido en vitamina B1 se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Alimentos crudos con mayor contenido de vitamina B1 (Tiamina) (USDA, 2021)

	Contenido de vitamina B1 por cada 100 g de alimento (mg)	Contenido de vitamina B1 (mg), por porción de alimento	% VNR* por porción
Salvado de Arroz	2.753	3.250 (118 g)	406.250
Germen de Trigo	1.670	1.890 (113 g)	236.250
Frijoles negros	0.900	1.750 (194 g)	218.750
Lentejas	0.873	1.680 (192 g)	210.000
Pistaches	0.870	0.247 (28 g)	30.860
Lomo de Cerdo	0.667	0.754 (113 g)	94.250
Piñones	0.364	0.102 (28 g)	12.750
Maíz	0.155	0.116 (75 g)	14.500
Champiñones	0.081	0.028 (35 g)	3.500
Brócoli	0.071	0.105 (148 g)	13.125

\*IDS = 0.8 mg

Las fuentes más ricas en vitamina B2 son la leche y sus productos no grasos. Las hortalizas verdes, la carne (sobre todo el hígado) el pescado y los huevos. También son buenas alternativas las legumbres, además de granos, cereales y semillas (Latham, 2002). Los alimentos con mayor contenido en vitamina B2 se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Alimentos crudos con mayor contenido de vitamina B2 (Riboflavina) (USDA, 2021)

	Contenido de vitamina B2 por cada 100 g de alimento (mg)	Contenido de vitamina B2 (mg), por porción de alimento	% VNR* por porción
Hígado de pollo	1.780	0.782 (44 g)	93.10
Corazón de cordero	0.990	0.281 (28 g)	33.45
Huevo completo	0.457	0.229 (50 g)	27.26
Champiñones	0.402	0.141 (35 g)	16.79
Lentejas	0.211	0.405 (192 g)	48.21
Frijoles negros	0.193	0.374 (194 g)	44.52
Espinaca	0.189	0.057 (30 g)	6.79
Espárragos	0.141	0.189 (134 g)	22.50
Brócoli	0.117	0.173 (148 g)	20.60
Cebollines	0.115	0.003 (3 g)	0.36

\*IDS = 0.84 mg

La vitamina B6 incluye a una familia de compuestos que tienen piridoxina, piridoxal, piridoxamina y sus derivados 5'-fosfato. El fosfato de 5'-piridoxal (*PLP*, *pyridoxal phosphate*) es un cofactor para más de cien enzimas involucradas en el metabolismo de aminoácidos (Russell y Suter, 2016). La vitamina B6 es soluble en agua, muy común en alimentos de origen animal y vegetal (Latham, 2002). Los alimentos con mayor contenido en vitamina B6 se presentan en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Alimentos crudos con mayor contenido de vitamina B6 (Piridoxina) (USDA, 2021)

	Contenido de vitamina B6 por cada 100 g de alimento (mg)	Contenido de vitamina B6 (mg), por porción de alimento	% VNR* por porción
Ajo	1.235	0.037 (3 g)	3.98
Germen de trigo	0.978	1.100 (113 g)	118.28
Hígado de pollo	0.853	0.375 (44 g)	37.07
Atún fresco	0.850	1.680 (198 g)	180.65
Salmón	0.611	0.971 (159 g)	104.41
Lentejas	0.540	1.040 (192 g)	111.83
Frijoles negros	0.283	0.555 (194 g)	59.68
Espinaca	0.195	0.058 (30 g)	6.24
Zanahoria	0.138	0.099 (73 g)	10.65
Espárragos	0.091	0.122 (134 g)	13.12

\*IDS = 0.93 mg

La vitamina B9 se encuentra mayoritariamente en vegetales de hoja como la espinaca, algunas frutas, legumbres, huevos e hígado. Se conoce comúnmente como ácido fólico, aunque el término correcto es “folato” debido a que es la forma como se encuentra naturalmente en los alimentos (Ros *et al.*, 2008). Los alimentos con mayor contenido en vitamina B9 se presentan en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Alimentos crudos con mayor contenido de vitamina B9 (Ácido fólico) (USDA, 2021)

	Contenido de vitamina B9 por cada 100 g de alimento (µg)	Contenido de vitamina B9 (µg), por porción de alimento	% VNR* por porción
Lentejas	479	920.00 (192 g)	242.11
Frijoles negros	444	861.00 (194 g)	226.58
Espinaca	194	58.20 (30 g)	15.32
Cebollines	105	3.15 (3 g)	0.83
Aguacate	81	24.30 (30 g)	6.40
Brócoli	63	93.20 (148 g)	24.53
Coles de Bruselas	61	53.70 (88 g)	14.13
Espárragos	52	69.70 (134 g)	18.34
Guayaba	49	27.00 (55 g)	7.11
Huevo completo	47	23.50 (50g)	6.18

\*IDS = 380 µg

La vitamina C se encuentra principalmente en las frutas, hortalizas y diversos tipos de hojas (Latham, 2002). Algunas fuentes alimentarias importantes de vitamina C son los cítricos y las verduras verdes (en especial, el brócoli) (Russell y Suter, 2016). Los alimentos con mayor contenido en vitamina C se presentan en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Alimentos crudos con mayor contenido de vitamina C (USDA, 2021)

	Contenido de vitamina C por 100 g de alimento (mg)	Contenido de vitamina C (mg), por porción de alimento	% VNR* por porción
Guayaba	228.3	126.00 (55 g)	210.00
Perejil	133.0	5.32 (4 g)	8.87
Pimiento morrón rojo	127.7	94.50 (74 g)	157.50
Brócoli	89.2	132.00 (148 g)	220.00
Coles de Bruselas	85.0	74.80 (88 g)	124.67
Kiwi	74.7	56.00 (75 g)	93.33
Naranja	71.0	113.00 (159 g)	188.33
Fresa	58.8	84.70 (144 g)	141.17
Cebollines	58.1	1.74 (3 g)	2.90
Limón	53.0	30.70 (58 g)	51.17

\*IDR = 60 mg

Como se observa en las Tablas 3 – 8, las vitaminas se encuentran principalmente en el grupo de frutas y hortalizas, aunque también se pueden presentar en granos y cereales. Los alimentos de origen animal son el grupo con el menor contenido de estos micronutrientes. En la Tabla 9 se muestran los alimentos seleccionados debido a su mayor contenido de las vitaminas estudiadas.

**Tabla 9.** Alimentos representativos del grupo de estudio

Frutas y Hortalizas	Granos y Cereales	Alimentos de Origen Animal
Cebollines	Frijoles negros	Hígado de pollo
Brócoli	Lentejas	Huevo completo
Champiñones		
Espinaca		
Espárragos		

### **3.2. Efecto del procesamiento convencional en la cantidad de vitaminas**

Los procesos convencionales que se evaluaron en este trabajo son: Cocción, congelación y secado.

Para el presente trabajo se utilizó la cocción en medio húmedo la cual consiste en la cocción de los alimentos a través del contacto directo con el vapor de agua, sin que éstos entren en contacto con el líquido, puesto que, al no estar en contacto con el agua, los alimentos mantienen su textura y consistencia, es decir, es el método de cocción que menos afecta sus cualidades, además de que no es necesario añadir aceites o grasas que pueden afectar su composición (Aguilar, 2012).

Por otra parte, la congelación consiste en la conversión de agua libre en cristales de hielo en donde se involucra el cambio de fase líquido-sólido (Aguilar, 2012). La temperatura de congelación es aquella a la cual empiezan a formarse los primeros cristales de hielo; es decir, la temperatura en la que coexisten en equilibrio cristales de hielo y agua líquida. El agua de los alimentos contiene sólidos solubles, y es conocido que el efecto de estos sólidos hace descender el punto de congelación del agua (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005). Se seleccionó debido a que permite conservar a largo plazo, es decir, puede extender significativamente la vida útil del producto y es comúnmente usada en alimentos crudos como las frutas, una gran variedad de verduras, diversas carnes y pescados (Teuteberg *et al.*, 2021).

Finalmente, el secado es la operación por el cual el líquido retenido por un sólido es eliminado del mismo por contacto con una corriente de gas caliente no saturado en dicho líquido. La transferencia de energía térmica se da por dos vías: i) por transmisión/convección desde las zonas calientes a las frías del sistema, ii) como calor absorbido por el vapor debido al fenómeno de evaporación. Se seleccionó debido a que aumenta la estabilidad y prolonga la vida de anaquel de los alimentos (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005). Se ha utilizado principalmente para secar las especias, frutas, granos, carnes y pescados desde tiempos remotos (Aguilar, 2012; Jayas, 2016).

En las Tablas 10 – 15 se compara el contenido de vitaminas presente en 100 g de alimento crudo y en el alimento procesado convencionalmente, se expresa en base seca para tener una base uniforme y poder comparar los alimentos estudiados. El cálculo se realizó a partir del contenido de humedad reportado en las bases de datos y en los artículos científicos que se revisaron durante la presente investigación (Anexo I). Para expresar la pérdida de vitamina se considera el - 100 % - para el contenido de vitamina reportado en el alimento crudo.

**Tabla 10.** Contenido de Vitamina A ( $\mu\text{g}$ ) presente en 100 g de alimento expresado en base seca (Adaptado de Kmiecik & Lisiewska, 1999; Leskova *et al.*, 2006; ANSES, 2021; USDA, 2021)

	Crudo	Cocido	Congelado	Secado
Cebollines	2344.09	1895.65	1964.67	3484.69
Espinaca	5453.49	7263.89	6976.19	640.72
Hígado de Pollo	14025.53	11891.57	NR	3274.38
Huevo Completo	661.16	1221.31	695.12	313.77

NR: No Reportado

En la Tabla 10 se observa que el alimento más afectado en el secado es la espinaca, en la cual el contenido disminuye 88.25 %, seguido del hígado de pollo y el huevo con 76.65 % y 52.54 %, respectivamente. Se tiene un aumento de 48.66 % en el contenido de vitamina A en los cebollines respecto al alimento crudo que puede ser debido al lugar de origen de la materia prima, así como la precisión del método analítico utilizado, la operación aplicada no tiene efecto en el aumento de vitamina (Sarkar *et al.*, 2020).

La cocción y congelación afectan de manera similar el contenido de vitamina A presente en los cebollines con disminución de 19.13 % y 16.19 %, respectivamente. Existe una afectación de 15.21 % en el contenido de este nutriente en el hígado de pollo. Con respecto a la espinaca existe un aumento similar de ésta en la cocción y congelado, 33.20 % y 27.92 %, respectivamente. Finalmente, en el huevo existe un aumento significativo del contenido de vitamina A en la cocción con 84.72 % y durante la congelación aumenta 5.14 %. Las posibles causas de aumento para el caso de la espinaca son debido a variabilidad de cultivo y sitio de cosecha; para el caso del huevo influye la dieta proporcionada a la gallina (Chen *et al.*, 2021). Estas y otras causas serán mejor explicadas más adelante.

**Tabla 11.** Contenido de Vitamina B1 (mg) presente en 100 g de alimento expresado en base seca (Adaptado de Bernas & Jaworska, 2016; Sarkar *et al.*, 2020; Alibas *et al.*, 2021; ANSES, 2021; USDA, 2021)

	Crudo	Cocido	Congelado	Secado
Brócoli	0.66	0.84	0.62	0.07
Champiñones	1.07	0.82	0.39	0.04

En la Tabla 11 se observa la variación del contenido de vitamina B1 (Tiamina) en el brócoli y los champiñones en las distintas operaciones convencionales estudiadas. El secado provoca una disminución de 89.35 % y 96.16 % respectivamente, siendo este tratamiento el que más afecta el contenido de tiamina. En los champiñones, la congelación afecta el contenido de tiamina 63.59 % y 23.04 % en la cocción.

En el brócoli, la congelación provoca una pérdida de 6.03 % en el contenido de tiamina, sin embargo, en la cocción se presenta un incremento de 23.04 %.

**Tabla 12.** Contenido de Vitamina B2 (mg) presente en 100 g de alimento expresado en base seca (Adaptado de Kmiecik & Lisiewska, 1999; Leskova *et al.*, 2006; Sarkar *et al.*, 2020; Alibas *et al.*, 2021; ANSES, 2021; USDA, 2021)

	Crudo	Cocido	Congelado	Secado
Cebollines	1.24	1.09	1.15	1.53
Brócoli	1.09	1.64	1.13	0.06
Champiñones	5.29	3.37	4.42	0.19
Espinaca	2.20	1.49	2.67	0.19
Espárragos	2.07	2.11	2.26	0.11
Frijoles Negros	0.22	0.64	0.27	0.06
Lentejas	0.23	0.24	0.22	0.08
Hígado de Pollo	7.57	5.95	NR	0.96
Huevo completo	1.89	4.21	2.13	2.06

En la Tabla 12, se observa una disminución significativa de vitamina B2 (Riboflavina) durante el secado especialmente en los alimentos pertenecientes al grupo de frutas y verduras, con una disminución de 91.51 % – 96.47 %, sin embargo, en el caso de los cebollines, existe un aumento del 23.78 %. Los alimentos pertenecientes al grupo de cereales y leguminosas el frijol negro y la lenteja sufren una pérdida de 71.46 % y 67.05 %, respectivamente. El hígado de pollo sufre una pérdida de 87.38 % y el contenido de vitamina en el huevo completo aumenta 9.13 %.

En la cocción, se observa un porcentaje de pérdida menor en comparación con el secado, hay una disminución de 12.10 % – 36.27 %, sin embargo, existen más casos en los que el contenido de vitamina aumenta, desde 1.57 % como es el caso de los espárragos, hasta 195.73 % en los frijoles negros.

En la congelación se muestra un menor porcentaje de pérdida comparado con secado y cocción, siendo los champiñones el alimento con mayor porcentaje (16.48 %) seguido de los cebollines (6.82 %), las lentejas obtuvieron el menor porcentaje (2.97 %). Cinco de los nueve alimentos evaluados aumentaron su contenido de vitamina B2 en intervalo de 3.29 % - 23.25 % lo cual puede ser causado por diferentes factores que se explicarán más adelante, sin embargo, la operación aplicada no tiene efecto en el aumento del contenido de estas vitaminas.

**Tabla 13.** Contenido de Vitamina B6 (mg) presente en 100 g de alimento expresado en base seca (Adaptado de Leskova *et al.*, 2006; ANSES, 2021; USDA, 2021)

	Crudo	Cocido	Congelado	Secado
Espinaca	2.27	3.29	2.05	0.15
Espárragos	1.34	1.20	1.91	0.02
Frijoles Negros	0.32	0.75	0.48	0.07
Lentejas	0.59	0.59	0.70	0.19
Hígado de Pollo	3.63	2.26	NR	0.17

En la Tabla 13 se muestra el contenido de piridoxina en los alimentos investigados, se observa un mayor porcentaje de pérdida en el contenido de esta vitamina en el secado en el intervalo de 68.65 % - 98.39 %.

En la cocción, el alimento con mayor afectación en el contenido de vitamina B6 es el hígado de pollo el cual disminuye 37.85 %, seguido de los espárragos con 10.56 %. Así mismo, se observa un aumento en las espinacas y en los frijoles negros de 45.17 % y 135.87 %, respectivamente.

En la congelación, el único alimento que se vio afectado en su contenido de vitaminas fue la espinaca, presentando pérdida de 9.69 %. Los demás alimentos analizados, presentaron un aumento de su contenido en intervalo de 18.66 % - 50.59 %.

**Tabla 14.** Contenido de Vitamina B9 ( $\mu\text{g}$ ) presente en 100 g de alimento expresado en base seca (Adaptado de Kmiecik & Lisiewska, 1999; Leskova *et al.*, 2006; Sarkar *et al.*, 2020; ANSES, 2021; USDA, 2021)

	Crudo	Cocido	Congelado	Secado
Cebollines	1129.03	502.17	833.15	110.20
Brócoli	588.79	1440.00	788.24	42.07
Espinaca	2255.81	111.11	1726.19	129.00
Espárragos	764.71	2257.58	3293.10	145.01
Frijoles Negros	498.88	1619.57	111.36	155.84
Lentejas	522.13	595.40	91.89	187.83
Huevo Completo	194.22	360.66	353.66	124.05

En la Tabla 14 se muestra el contenido de ácido fólico en los alimentos crudos y procesados convencionalmente, en ésta se observa un mayor porcentaje de pérdida de folatos en los alimentos sometidos a secado en intervalo de 36.13% - 94.28 %, donde el alimento con menor porcentaje es el huevo completo y el de mayor pérdida es la espinaca.

En la cocción se observa que la espinaca es el alimento con mayor porcentaje de pérdida (95.07 %) seguido de los cebollines (55.52 %). Sin embargo, es el que presenta un mayor número de alimentos en los cuales se observa un aumento en su contenido de folatos en intervalo de 14.03 % - 195.22 %.

En la congelación, se observa una disminución en el contenido de folatos en cuatro de los siete alimentos analizados, los cuales se encuentran dentro del intervalo de 23.48 % - 82.40 %. Los tres alimentos restantes, presentan un aumento considerable en su contenido de esta vitamina siendo el brócoli el alimento con menor aumento y los espárragos el alimento con mayor incremento con 33.87 % y 330.64 %, respectivamente.

**Tabla 15.** Contenido de Vitamina C (mg) presente en 100 g de alimento expresado en base seca (Adaptado de Kmiecik & Lisiewska, 1999; Sarkar *et al.*, 2020; Alibas *et al.*, 2021; ANSES, 2021; USDA, 2021)

	Crudo	Cocido	Congelado	Secado
Cebollines	624.73	448.38	299.13	673.47
Brócoli	833.65	865.33	663.53	25.29

En la Tabla 15 se muestra el contenido de vitamina C en cebollines y brócoli. Se observa que, en los cebollines, la congelación es el que más afecta el contenido de vitamina C, seguido de la cocción con una pérdida de 52.12 % y 28.23 %, respectivamente. Sin embargo, en el secado se presenta un aumento del 7.80 % en el contenido de este nutriente en el alimento.

En el brócoli, el secado disminuyó el contenido de vitamina C (96.97 %), seguido de la congelación (20.41 %). En la cocción se presentó un aumento de 3.80 % en su contenido de vitamina C.

### **Comportamiento de las vitaminas en los procesos convencionales**

En las Tablas 10 – 15, se observa que, en la mayoría de las vitaminas estudiadas, el secado es el que más afecta el contenido de éstas en los alimentos, seguido de la cocción. El que menos afecta su contenido es la congelación.

La pérdida de vitaminas en un alimento durante la operación de deshidratación depende de la técnica empleada. Dentro de estas se encuentran: Deshidratación solar, liofilización y secado por convección forzada; cada una tiene diferentes características que le otorgarán ventajas y desventajas, no obstante, esta última técnica afecta la calidad de los productos, debido a que origina alteraciones físicas y químicas que modifican las características sensoriales y nutricionales (Serpa *et al.*, 2015).

La pérdida de vitaminas en la cocción se ve afectada por la cantidad de agua utilizada, la disminución es mínima cuando las verduras se cocinan sin agua, mientras que las pérdidas máximas se asocian con la cocción en una gran cantidad de agua (Leskova *et al.*, 2006; Moltedo *et al.*, 2021).

Durante la congelación la cantidad de vitaminas no se ve afectada significativamente a menos que la cadena de frío se rompa. Cuando las verduras y frutas se congelan en condiciones óptimas, es decir, poco después de ser cosechadas, pueden presentar incluso mejores cualidades nutritivas que sus equivalentes crudos y “frescos”. Esto debido a que, los productos cosechados (frutas y verduras) en muchas ocasiones,

tardan días en ser seleccionados, transportados y distribuidos a los comercios. Durante este tiempo, los alimentos pueden perder progresivamente vitaminas, afectando su calidad nutricional (Bernas & Jaworska, 2016; Kasiviswanathan *et al.*, 2019; Merve & Seid, 2019).

Por otro lado, existen alimentos en los cuales se incrementa el contenido de vitamina, esto se puede deber:

- En los alimentos pertenecientes al grupo de frutas y verduras, el contenido de vitaminas se ve afectado de un cultivo a otro debido a la variabilidad natural en la materia prima relacionada con el estado fisiológico en el momento de la cosecha, las condiciones de cultivo y la precisión del método analítico utilizado (Pinela *et al.*, 2019; Sarkar *et al.*, 2020).
- El contenido de vitamina B en cultivos de legumbres se ve afectada principalmente por la variedad, el sitio de cosecha y el año, además de los factores ambientales y condiciones de almacenamiento (Witten & Aulrich, 2018).
- En los alimentos evaluados pertenecientes a alimentos de origen animal, la variación de nutrientes se ve afectada por factores como: El alimento evaluado no es proveniente del mismo animal, por lo que al ser de diferente animal no se puede asegurar que la alimentación proporcionada sea la misma, la dieta influye en gran medida a la cantidad de nutrientes; también, influye el tiempo que transcurrió entre el momento en el que la gallina puso el huevo y el momento en el cual el huevo fue sometido a la evaluación así como la genética para el caso del hígado de pollo, al igual que las enfermedades que pudiera tener el animal de donde provino el hígado (Chen *et al.*, 2021).

### 3.2.1. Vitaminas más afectadas durante el procesamiento convencional

Con el propósito de relacionar la temperatura de procesamiento con el porcentaje de pérdida obtenido para cada vitamina estudiada y poder determinar cuál es la más afectada con la aplicación de tratamiento térmico, se elaboró la Tabla 16, en la que se presentan las condiciones recabadas a las cuales fueron sometidos los alimentos.

**Tabla 16.** Porcentaje de pérdida de vitaminas (%) y temperatura de procesamiento, aplicados a los alimentos evaluados. Métodos convencionales (Kmiecik & Lisiewska, 1999; Bernas & Jaworska, 2016; Sarkar *et al.*, 2020)

	A		B1		B2		B6		B9		C	
	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S
<b>Cebollines</b>	16.19 (-20 °C)	NR	NE		6.82 (-20 °C)	NR	NE		26.21 (-20 °C)	NR	52.12 (-20 °C)	NR
<b>Brócoli</b>	NE		NR	89.35 (60 °C)	NR	94.13 (60 °C)	NE		NR	92.85 (60 °C)	NR	96.97 (60 °C)
<b>Champiñones</b>	NE		63.59 (-30 °C)	96.16 (40 °C)	16.48 (-30 °C)	96.47 (40 °C)	NE		NE		NE	
<b>Espinaca</b>	NR	88.25 (50 °C)	NE		NR	91.51 (50 °C)	NR	93.61 (50 °C)	NR	94.28 (50 °C)	NE	
<b>Espárragos</b>	NE		NE		NR	94.66 (50 °C)	NR	98.39 (50 °C)	NR	81.04 (50 °C)	NE	
<b>Frijoles Negros</b>	NE		NE		NR	NR	NR	NR	NR	NR	NE	
<b>Lentejas</b>	NE		NE		NR	NR	NR	NR	NR	NR	NE	
<b>Hígado de Pollo</b>	NE	76.65 (40 °C)	NE		NE	87.38 (40 °C)	NE	95.41 (40 °C)	NE		NE	
<b>Huevo Completo</b>	NR	NR	NE		NR	NR	NE		NR	NR	NE	

C: Congelación

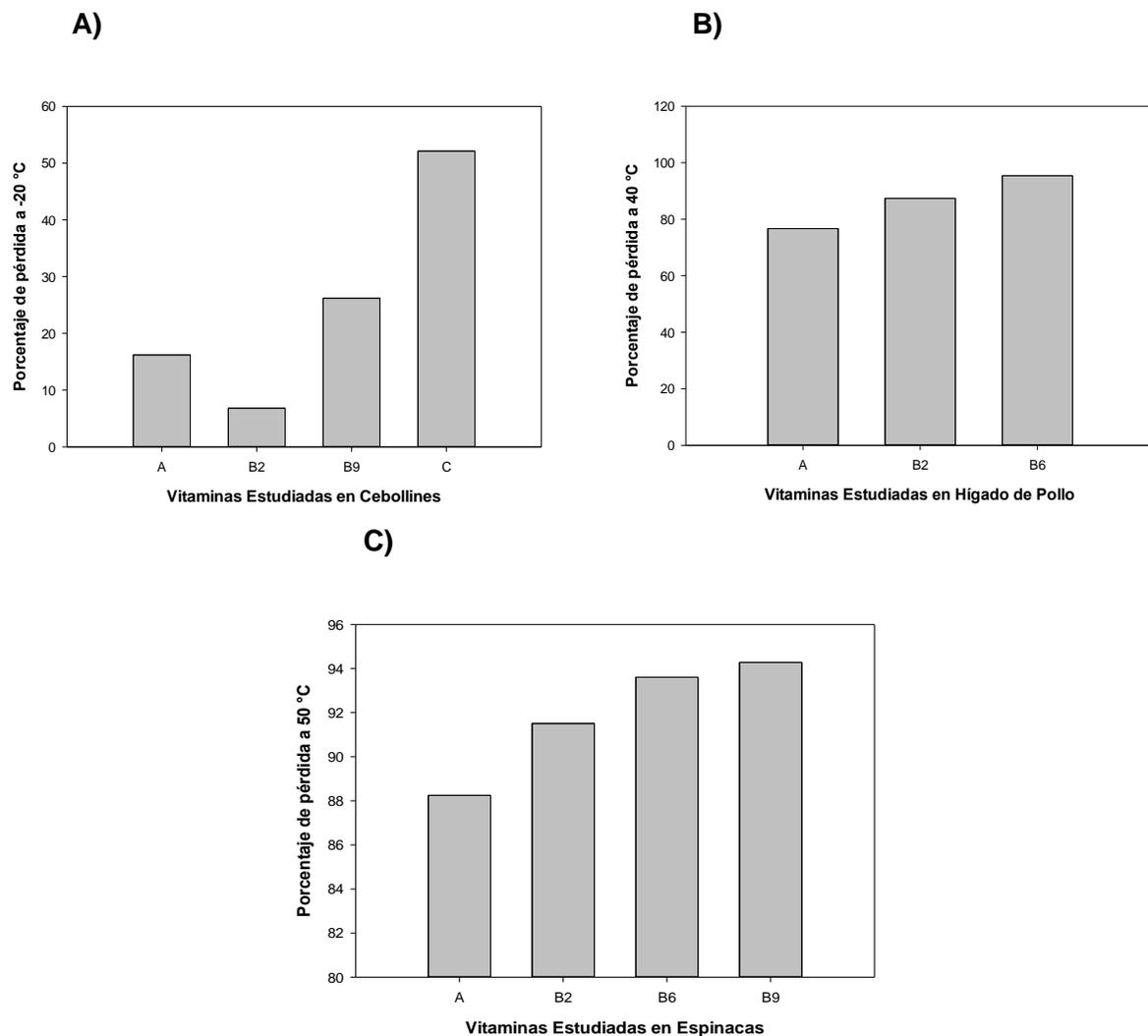
S: Secado

NR: No Reportado. Datos proporcionados por las bases de datos consultadas (ANSES, USDA)

NE: No Evaluado

Nota: No se conocen las condiciones de procesamiento de cocción de los alimentos estudiados debido a que las bases de datos (USDA, ANSES) solo reportan el contenido de vitaminas

Debido a la falta de datos sobre las condiciones aplicadas en los procesos convencionales, no se puede establecer un modelo matemático que prediga el comportamiento de las vitaminas en los alimentos sometidos a esos procesos, por ello, se realizó una comparación en el comportamiento de las vitaminas estudiadas en: Cebollines, hígado de pollo y espinacas (Figuras 1 A – C, respectivamente), puesto que son los alimentos con mayor número de datos de concentración de vitaminas con condiciones establecidas y así poder para evaluar cuál de éstas es la más perjudicada con la aplicación de un tratamiento térmico.



**Figura 1.** Porcentaje de pérdida (%) de las vitaminas estudiadas en A) cebollines congelados a -20 °C, B) hígado de pollo secado a 40 °C y C) espinacas secadas a 50 °C

En la Figura 1A se observa que la vitamina más afectada en la congelación a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  de los cebollines es la C, mientras que la Riboflavina es la menos afectada. La vitamina A ocupa en tercer lugar de pérdida.

En la Figura 1B se observa un mayor porcentaje de pérdida en la vitamina B6 para hígado de pollo, seguida de la Riboflavina. La vitamina A, es la menos afectada durante el tratamiento térmico.

Dentro de las vitaminas estudiadas para las espinacas, en lo que respecta a las pertenecientes al complejo B, se observa (Figura 1C) que la vitamina B9 es la más afectada al tratamiento térmico, seguido de la piridoxina mientras que la Riboflavina es la vitamina hidrosoluble menos afectada. La vitamina liposoluble (vitamina A) es la menos afectada debido al tratamiento térmico aplicado.

En las Figuras 1 A – C se observa que las vitaminas hidrosolubles son las más afectadas durante el tratamiento térmico en comparación de la vitamina A. Dentro de las vitaminas hidrosolubles, en la congelación (Figura 1A) se observa que la vitamina C es la más afectada, seguida de las pertenecientes al complejo B.

En el secado (Figuras 1B y 1C), se obtuvo que de las vitaminas pertenecientes al complejo B, la vitamina B9 (folatos), son los más afectados durante el tratamiento térmico y la Riboflavina es la menos afectada durante este procesamiento.

### **3.2.2 Determinación de la vida útil de alimentos congelados con base en el contenido de vitamina C**

Dentro de los procesos convencionales, la revisión del efecto de la congelación sobre la cantidad de vitamina presente en el alimento demostró ser la que menos afecta, por ello se evaluó la vida útil con base en la pérdida de vitamina C. En el caso de las verduras congeladas, se utiliza como un índice confiable y representativo para estimar el deterioro de la calidad en cualquier punto de la ruta de comercialización de un producto hasta su destino final: El consumidor. Además, si las cantidades de estas vitaminas se incluyen en la declaración nutricional, la vida útil del alimento está determinada por el componente más inestable (Berry, 2010).

Durante el procesamiento, distribución y almacenamiento de verduras congeladas, el ácido ascórbico se oxida a ácido deshidroascórbico (DHAA), que se hidroliza irreversiblemente en ácido 2,3 dicetogulónico, que no posee actividad de vitamina C. Esta oxidación se ve reforzada por el incremento de temperatura durante el almacenamiento en congelación. Por tanto, la retención de ácido ascórbico en productos congelados depende en gran medida de su historial de temperatura (Giannakourou & Taukis, 2003).

Para explicar el efecto de la temperatura sobre las reacciones de deterioro de alimentos, la ecuación de Arrhenius ha sido ampliamente usada debido a que es útil para describir la dependencia de la constante de reacción respecto a la temperatura en el intervalo en que la mayoría de los alimentos son almacenados, es decir, en temperaturas de -30 a 0 °C para alimentos congelados (Salinas *et al.*, 2007). Por consiguiente, si se requiere evaluar la influencia de la temperatura en la cinética de deterioro es necesario establecer los valores de los parámetros cinéticos tales como la constante de velocidad de degradación y energía de activación.

Finalmente, es necesario considerar varios criterios para determinar la cinética de deterioro y la vida de anaquel. Por objetivos de este trabajo se evaluó la pérdida de nutrimentos (vitamina C), es decir, cuando su contenido fue inferior de 50 %, aun cuando el alimento sea sensorialmente aceptado.

En 1999, Kmiecik & Lisiewska sometieron hojas de cebollín a congelación (-20 y -30 °C) y evaluaron el contenido de vitamina C, cada 3 meses durante 1 año, estos datos se presentan en la Tabla 17.

**Tabla 17.** Contenido de vitamina C (mg/100 g) en cebollines congelados (Kmiecik & Lisiewska, 1999)

Tiempo de almacenamiento (días)	Temperatura de congelación	
	-20 °C	-30 °C
0	63	61
90	40	61
180	31	56
270	23	52
365	14	48

Para los datos de la Tabla 17 se realizó un tratamiento que corresponde a un modelo cinético de primer orden expresado mediante la siguiente ecuación diferencial (Bajaj & Singhal, 2020):

$$-\frac{dC}{dt} = kC \quad [\text{Ec. 1}]$$

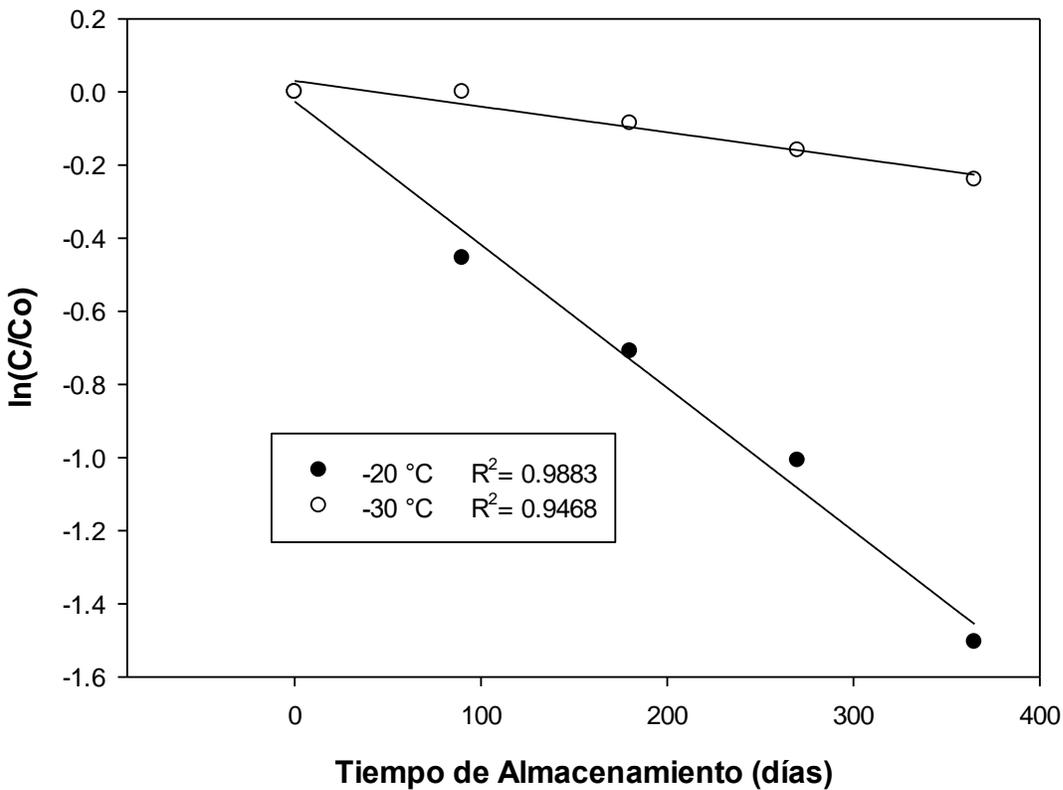
En donde  $dC/dt$  es la velocidad de degradación y  $k$  es la constante de velocidad de degradación ( $\text{días}^{-1}$ ),  $C$  es el valor del parámetro a cualquier tiempo  $t$ . La integración de esta ecuación conduce a (Bajaj & Singhal, 2020):

$$-\ln \frac{C}{C_0} = kt \quad \text{ó} \quad C = C_0 \exp(-kt) \quad [\text{Ec. 2}]$$

donde  $C_0$  es el valor del parámetro al tiempo cero.

Con la expresión anterior es posible evaluar la constante de velocidad de pérdida mediante la regresión lineal del par:  $X = t$  (días) y  $Y = \ln(C/C_0)$ .

La interpretación de los datos se presenta en la Figura 2.



**Figura 2.** Rapidez de pérdida de la vitamina C en un modelo cinético de primer orden para los cebollines almacenados a -20 °C y -30 °C

Calculada la constante de velocidad de degradación, se determinó la vida media, que se establece como la vida de anaquel recomendada para el parámetro específico, en este caso, es el tiempo necesario para que la vitamina C presente en el alimento alcance el 50 % de su valor inicial. Esta variable se expresa en tiempo (días), calculado mediante la expresión (Bajaj & Singhal, 2020):

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{k} \quad [\text{Ec. 3}]$$

Los resultados obtenidos, de la forma antes descrita, para la constante de velocidad de degradación y vida útil, se sintetizan en la Tabla 18.

**Tabla 18.** Resumen evaluación cinética para degradación vitamina C en cebollines congelados (a partir de los datos reportados por Kmiecik & Lisiewska, 1999)

Temperatura (°C)	k (días <sup>-1</sup> )	t <sub>1/2</sub> (días)
-20	41x10 <sup>-4</sup>	168.16
-30	66x10 <sup>-5</sup>	1054.79

Para conocer la Energía de activación (Ea) a partir de los datos obtenidos en la Tabla 18, se empleó la siguiente ecuación (Blasco *et al.*, 2004):

$$\ln \frac{k_1}{k_2} = \frac{Ea}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad [\text{Ec. 4}]$$

Donde Ea es la energía de activación; R es la constante universal de los gases (8.314x10<sup>-3</sup> kJ/mol K); T<sub>1</sub> y T<sub>2</sub> son las temperaturas conocidas (K) y k<sub>1</sub> y k<sub>2</sub> son las constantes de velocidad obtenidas anteriormente.

Despejando la Energía de activación se obtiene:

$$Ea = \left( \frac{\ln \frac{k_1}{k_2}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} \right) (R) \quad [\text{Ec. 5}]$$

$$k_1 = k_{-20\text{ }^\circ\text{C}} = 41 \times 10^{-4}$$

$$k_2 = k_{-30\text{ }^\circ\text{C}} = 66 \times 10^{-5}$$

Sustituyendo:

$$Ea = \left( \frac{\ln \frac{41 \times 10^{-4}}{66 \times 10^{-5}}}{\frac{1}{243.15 \text{ K}} - \frac{1}{253.15 \text{ K}}} \right) \left( 8.314 \times 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{molK}} \right)$$

$$Ea = 93.97 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

Con los valores de la energía de activación y la constante de velocidad de degradación para una temperatura determinada, es posible establecer la constante de velocidad de degradación para cualquier temperatura mediante la Ley de Arrhenius (Blasco *et al.*, 2004). A partir de la ecuación 4, se calcularon constantes de velocidad de degradación ( $k_2$ ) para la vitamina C en los cebollines a distintas temperaturas de congelación y con ello poder estimar la vida útil (cuando el contenido de vitamina C fue inferior de 50 %) con la ecuación 3. Estos resultados se presentan en la Tabla 19.

**Tabla 19.** Vida útil de los cebollines congelados a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	k (días <sup>-1</sup> )	t <sub>1/2</sub> (días)
-5	50x10 <sup>-3</sup>	13.84
-10	22x10 <sup>-3</sup>	30.82
-15	98x10 <sup>-4</sup>	70.82
-18	59x10 <sup>-4</sup>	118.50
-20	41x10 <sup>-4</sup>	168.16
-30	66x10 <sup>-5</sup>	1054.79

Ea = 93.97 kJ/molK

En 2011, Goncalves y colaboradores determinaron la energía de activación y la constante de velocidad de degradación de la vitamina C para brócoli congelado a 15 °C. Los datos se presentan en la Tabla 20 junto con los obtenidos anteriormente para los cebollines.

**Tabla 20.** Parámetros cinéticos para la vitamina C presente en alimentos sometidos a congelación

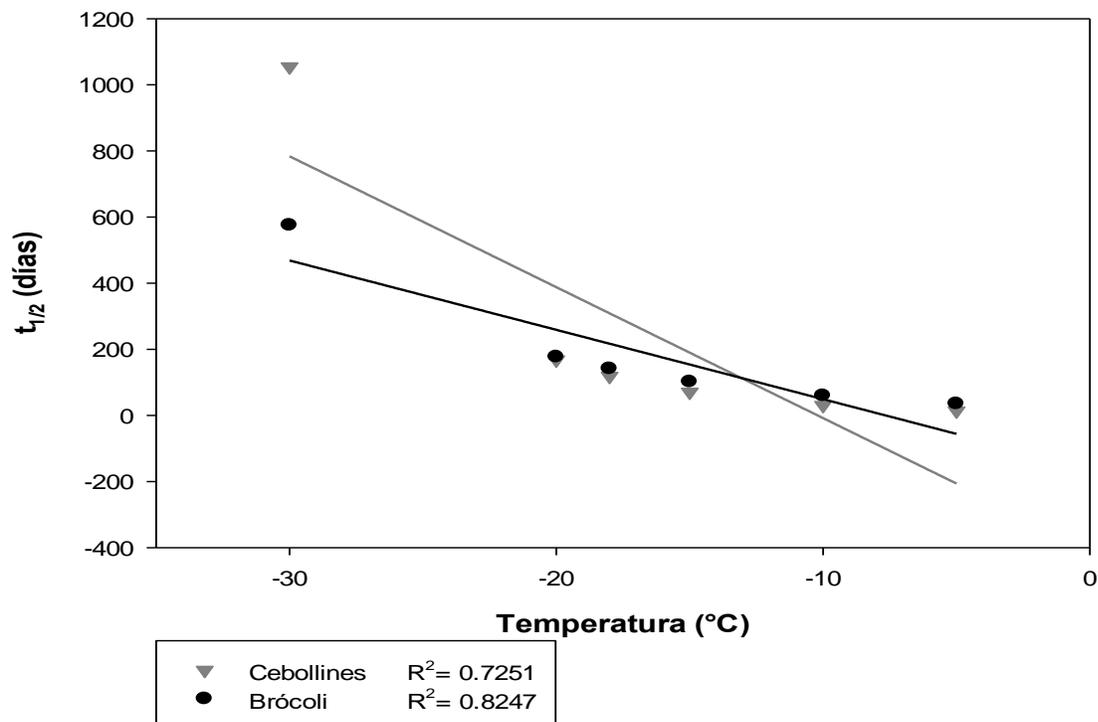
Alimento	Ea (kJ/mol)	K (1/días)
Cebollines	93.97	- 20 °C (41x10 <sup>-4</sup> )
		- 30 °C (66x10 <sup>-5</sup> )
Brócoli	60.24	-15 °C (68x10 <sup>-4</sup> )

A partir de estos datos y utilizando la ecuación 3, se estimó la vida útil de estos alimentos a diferentes temperaturas de congelación, tomando como referencia, las temperaturas empleadas en los cebollines. En la Tabla 21 se presentan los resultados obtenidos.

**Tabla 21.** Determinación de la vida útil de brócoli a diferentes temperaturas de congelación

Temperatura (°C)	k (días <sup>-1</sup> )	t <sub>1/2</sub> (días)
-5	19x10 <sup>-3</sup>	35.78
-10	12x10 <sup>-3</sup>	59.79
-15	68x10 <sup>-4</sup>	101.91
-18	49x10 <sup>-4</sup>	141.75
-20	39x10 <sup>-4</sup>	177.42
-30	12x10 <sup>-4</sup>	575.58

Los datos presentados en las Tablas 19 y 21 muestran que la vida útil (t<sub>1/2</sub>) de los brócolis y los cebollines aumenta conforme la temperatura de almacenamiento disminuye, dicha interpretación se muestra en la Figura 3.



**Figura 3.** Gráfica de vida de anaquel de cebollines y brócoli congelados basados en el 50 % de pérdida de Vitamina C

### **Vida útil de los alimentos analizados**

En la Figura 3 se observa que el modelo propuesto para el brócoli obtiene un mayor coeficiente de determinación ( $R^2= 0.82$ ) comparado con el obtenido para los cebollines ( $R^2= 0.72$ ), es decir, el modelo propuesto se ajusta mejor a los datos experimentales para brócoli, por lo que es un modelo cuyas estimaciones se acoplan bastante bien a la variable real (Martínez, 2005).

Se observa en las Tablas 19 y 21 que, conforme disminuye la temperatura de almacenamiento, la vida media del alimento aumenta. De los dos alimentos analizados, los cebollines son los que tienen menor vida útil a  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  con 13 días. En el caso del brócoli, después de un mes de congelación a  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  pierde 50 % de vitamina C. Esta temperatura es muy perjudicial y ocurre con frecuencia en la cadena de congelación real. Los factores que mayormente afectan el contenido de vitamina C a estas temperaturas son: Presencia de iones metálicos (Fe y Cu) e interacciones vitamina-vitamina (Berry, 2010).

Con base en USDA (2021), los cebollines contienen 1.60 mg de Hierro, y 0.17 mg de Cobre por cada 100 g, comparado con el brócoli (0.73 y 0.05 mg de Hierro y Cobre, respectivamente). Según Berry (2010), mientras más contenido de iones Cu y Fe estén presentes en el alimento, la oxidación de ácido ascórbico se verá mayormente favorecida puesto que funcionan como catalizadores, gran número de reacciones de autoxidación en realidad son reacciones catalizadas por metales especialmente cuando existe presencia de oxígeno en el medio.

Por otro lado, en la interacción vitamina-vitamina, el ácido ascórbico tiene mayor inestabilidad en presencia de ácido fólico, es decir, son vitaminas antagónicas, por lo que un mayor contenido de este puede conducir a una degradación más rápida de vitamina C (Berry, 2010). Los cebollines presentan mayor contenido de ácido fólico comparado con el brócoli con 105 y 63  $\mu\text{g}$  por cada 100 g, respectivamente (USDA, 2021).

Con esta aproximación, se obtuvo que a  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  los cebollines tardan 35 meses en disminuir 50 % el contenido de vitamina C y en el brócoli 19 meses.

La comparación entre los diferentes vegetales verdes demostró que el tejido vegetal afecta significativamente la rapidez de pérdida de vitamina C. Las condiciones de temperatura posteriores al procesamiento y las fluctuaciones de temperatura determinan la tasa de degradación de la calidad y la vida útil de las verduras congeladas (Giannakourou & Taukis, 2003).

Las pérdidas de vitamina C pueden ocurrir durante el almacenamiento congelado de alimentos, y Berry (2010) demostró que la oxidación del ácido ascórbico es más rápida en hielo que en líquido.

Los principales factores que afectan la calidad final de las verduras congeladas son: Materia prima, procesamiento, incluyendo el tratamiento de escaldado y método de congelación, distribución, almacenamiento y manipulación domiciliaria después del procesamiento (Giannakourou & Taukis, 2003).

Por último, las pérdidas en vitamina C no solo están relacionadas con cada paso del proceso, sino que también difieren entre especies y cultivares cuando se procesan en las mismas condiciones.

### **3.3. Efecto de las tecnologías emergentes en la cantidad de vitaminas**

En la Western Kentucky University de Estados Unidos de América (WKU EE. UU.), se realizó un estudio a través de encuestas a expertos en alimentos para conocer el alcance que tienen las nuevas tecnologías emergentes en la industria alimentaria.

El estudio se centró en:

1. Procesamiento de alta presión
2. Campo eléctrico pulsado
3. Luz pulsada
4. Irradiación
5. Ultrasonido
6. Campos magnéticos oscilantes
7. Tecnologías de plasma atmosférico frío

Las principales razones para elegir alguno de estos fueron:

1. Mejor calidad sensorial
2. Contenido de nutrientes en el producto terminado

Los resultados concluyeron que los más utilizados y preferidos por los expertos en alimentos son: Procesamiento de alta presión (35.6 %), seguido de campo eléctrico pulsado (20 %) (Khouryieh, 2021).

Jermann y colaboradores (2015) estudiaron las aplicaciones comerciales de tecnologías nuevas y emergentes, su potencial de crecimiento y para comparar el nivel de desarrollo tecnológico en todo el mundo en diferentes países y continentes. Se llevaron a cabo dos tipos de encuestas: La primera fue aplicada en Norteamérica (Estados Unidos, Canadá y México) y la segunda aplicada en Europa. Los resultados de la encuesta aplicada en Norteamérica arrojaron una mayor preferencia hacia la irradiación en productos frescos (71 %) seguido de la irradiación aplicada en carnes y aves de corral (67 %), debido a que la radiación es más adecuada para productos sólidos. Sin embargo, los resultados de la encuesta aplicada en Europa arrojaron una mayor preferencia al Campo Eléctrico Pulsado y el calentamiento óhmico.

Con base en los estudios mencionados anteriormente (Jermann *et al.*, 2015; Khouryieh, 2021), este trabajo se enfocó en alimentos procesados por altas presiones e irradiación.

En las Tablas 22 – 27 se presenta la comparación en el contenido de vitaminas presente en 100 g de alimento crudo y en el alimento procesado mediante tecnologías emergentes. Los datos se expresan en base seca para tener una base uniforme y poder realizar una comparación entre alimentos, el cálculo se realizó a partir del contenido de humedad reportado en las bases de datos y en los artículos científicos que se revisaron durante la presente investigación (Anexo I). Al igual que en el caso de procesos térmicos, para expresar la pérdida de vitamina se consideró el - 100 % - para el contenido de vitamina reportado en el alimento crudo.

Para los alimentos pertenecientes al grupo de frutas y verduras irradiados, se consideró el mismo contenido de humedad que el obtenido para alimentos crudos para

el cálculo en base seca, debido a que Bisht *et al.* (2021) concluyeron que el contenido de humedad no se ve afectado para frutas y verduras irradiadas en un intervalo de 0.5 – 10.0 kGy (kilogray).

Soris *et al.* (2017) encontraron que las leguminosas pierden un porcentaje mínimo de humedad durante el proceso de irradiación a 10 kGy, por lo que se utilizó la humedad calculada por ellos para las lentejas y los frijoles negros, haciendo una corrección con base en la humedad reportada por la USDA (2021) para el alimento crudo.

Por otra parte, para los alimentos: Huevo e hígado de pollo, se consideró la humedad reportada para el alimento crudo debido a la falta de estudios en donde se evalúe su comportamiento.

No hay estudios que registren la variación del contenido de humedad en los alimentos analizados en este documento mediante altas presiones, sin embargo, con base en Cava *et al.* (2020) en el cual se analizó la salchicha curada en seco a diferentes presiones, se determinó que el contenido de humedad no presenta diferencia notable entre las muestras tratadas con HPP y las de control, por lo tanto, para el cálculo en base seca de los alimentos analizados en este trabajo, se utilizaron las mismas humedades obtenidas para el alimento crudo.

**Tabla 22.** Contenido de Vitamina A ( $\mu\text{g}$ ) presente en 100 g de alimento expresado en base seca. Tecnologías emergentes (Adaptado de Kilcast, 1994; Sebastiao *et al.*, 2002; Arvanitoyannis & Stratakos, 2010; Khattak & Rahman, 2016; Zhang *et al.*, 2016; USDA, 2021)

	Crudo	Alta Presión	Irradiación
Cebollines	2344.09	1209.79	1913.47
Espinaca	5453.49	2814.55	4451.69
Hígado de Pollo	14025.53	7238.58	12622.98
Huevo Completo	661.16	341.22	542.15

En la Tabla 22 se observa que el procesamiento de alta presión es el que más afecta el contenido de vitamina A con un promedio de 48.39 % de pérdida. En la irradiación, existe disminución de 10.00 % - 18.37 % en el contenido de vitamina A presente en los alimentos con relación en el contenido del alimento crudo.

**Tabla 23.** Contenido de Vitamina B1 (mg) presente en 100 g de alimento expresado en base seca. Tecnologías emergentes (Adaptado de Sancho *et al.*, 1999; Dionisio *et al.*, 2009; USDA, 2021)

	Crudo	Alta Presión	Irradiación
Brócoli	0.66	0.66	0.65
Champiñones	1.07	1.07	1.07

En la Tabla 23 se presenta la variación del contenido de tiamina en las tecnologías emergentes estudiadas. El contenido de Tiamina no se ve afectado durante el proceso de altas presiones, sin embargo, durante el proceso de irradiación existe un porcentaje de pérdida de 2.82 % y 3.70 % para el brócoli y los champiñones, respectivamente.

**Tabla 24.** Contenido de Vitamina B2 (mg) presente en 100 g de alimento expresado en base seca. Tecnologías emergentes (Adaptado de Kilcast, 1994; Sancho *et al.*, 1999; Villavicencio *et al.*, 2000; Estrada *et al.*, 2005; Khattak & Rahman, 2016; Aylangan *et al.*, 2017; Firouzi *et al.*, 2021; USDA, 2021)

	Crudo	Alta Presión	Irradiación
Cebollines	1.24	1.18	1.09
Brócoli	1.09	1.05	0.96
Champiñones	5.29	5.05	4.66
Espinaca	2.20	2.09	1.93
Espárragos	2.07	1.99	1.82
Frijoles Negros	0.22	0.21	0.19
Lentejas	0.23	0.22	0.20
Hígado de Pollo	7.57	7.23	5.53
Huevo completo	1.89	1.80	1.60

En la Tabla 24 se observa que la irradiación es la técnica que más afecta el contenido de Riboflavina en intervalo de 11.84 % - 27.02 %. De los alimentos estudiados para esta vitamina pertenecientes a los tres grupos de alimentos, el grupo de alimentos de origen animal es el más afectado: Hígado de pollo (27.02 %) y huevo completo (15.10 %).

El procesamiento mediante altas presiones tiene menor impacto en la vitamina B2, con un porcentaje de pérdida de 4.26 % - 4.76 %.

**Tabla 25.** Contenido de Vitamina B6 (mg) presente en 100 g de alimento expresado en base seca. Tecnologías emergentes (Adaptado de Kilcast, 1994; Sancho *et al.*, 1999; Villavicencio *et al.*, 2000; Estrada *et al.*, 2005; Khattak & Rahman, 2016; Aylangan *et al.*, 2017; Firouzi *et al.*, 2021; USDA, 2021)

	Crudo	Alta Presión	Irradiación
Espinaca	2.27	2.26	1.83
Espárragos	1.34	1.32	1.07
Frijoles Negros	0.32	0.32	0.27
Lentejas	0.59	0.59	0.50
Hígado de Pollo	3.63	3.61	3.12

En la Tabla 25 se compara la variación en el contenido de vitamina B6 en los alimentos estudiados a través de los procesamientos no térmicos. Con la aplicación de irradiación, los alimentos tienen un porcentaje de pérdida de 13.95 % - 19.78 %, siendo el hígado de pollo el de menor pérdida y los espárragos los que sufren mayor afectación en el contenido de este nutriente.

**Tabla 26.** Contenido de Vitamina B9 ( $\mu\text{g}$ ) presente en 100 g de alimento expresado en base seca. Tecnologías emergentes (Adaptado de Sancho *et al.*, 1999; Villavicencio *et al.*, 2000; Estrada *et al.*, 2005; Verlinde *et al.*, 2008; Khattak & Rahman, 2016; Aylangan *et al.*, 2017; Pinela *et al.*, 2019; Firouzi *et al.*, 2021; USDA, 2021)

	Crudo	Alta Presión	Irradiación
Cebollines	1129.03	1012.74	927.53
Brócoli	588.79	528.14	478.09
Espinaca	2255.81	2023.47	1831.74
Espárragos	764.71	685.94	620.94
Frijoles Negros	498.88	493.14	396.40
Lentejas	522.13	516.12	417.28
Huevo Completo	194.22	151.22	157.70

En la Tabla 26 se muestra el contenido de ácido fólico en los alimentos en función de tecnologías emergentes, se aprecia que los folatos son mayormente afectados por el proceso de irradiación en intervalo de 17.85 % - 20.54 %, siendo los frijoles negros y las lentejas los alimentos con mayor afectación 20.54 % y 20.08 %, respectivamente.

En la aplicación de altas presiones se observa una mayor afectación en el huevo completo (22.14 %), seguido de los alimentos evaluados pertenecientes al grupo de frutas y verduras, los cuales tienen en promedio un porcentaje de pérdida de 10.30 %.

Finalmente, los frijoles y las lentejas son el grupo con menor afectación con un porcentaje de pérdida de 1.15 % en el contenido de folatos totales.

**Tabla 27.** Contenido de Vitamina C (mg) presente en 100 g de alimento expresado en base seca. Tecnologías emergentes (Adaptado de Sancho *et al.*, 1999; Khattak & Rahman, 2016; USDA, 2021)

	Crudo	Alta Presión	Irradiación
Cebollines	624.73	561.88	544.14
Brócoli	833.65	749.79	726.10

En la Tabla 27 se compara el contenido de vitamina C presente en el alimento crudo y en el alimento sometido a las tecnologías emergentes (alta presión e irradiación).

Los alimentos sometidos tanto a altas presiones como los irradiados presentan un porcentaje de pérdida muy similar 10.06 % y 12.06 %, respectivamente. En esta vitamina al igual que en las otras vitaminas hidrosolubles estudiadas, se hace notable que la irradiación afecta en mayor proporción el contenido de estos nutrientes, en comparación con la aplicación de altas presiones.

### **Comportamiento de las vitaminas en alimentos procesados con tecnologías emergentes**

En las Tablas 22 – 27, se muestra que las vitaminas hidrosolubles estudiadas son afectadas en menor porcentaje comparadas con la vitamina liposoluble (vitamina A).

En el caso de la vitamina A (Tabla 22) se obtiene que las altas presiones afectan 20 – 30 % más que la irradiación, contrario al comportamiento de las vitaminas hidrosolubles (Tablas 23 – 27) en las cuales, la irradiación provoca un mayor porcentaje (20 – 80 %) de pérdida que la aplicación de altas presiones.

La irradiación de alimentos es un proceso en frío para la conservación de alimentos. En consecuencia, el material se expone a una cantidad de energía cuidadosamente controlada en forma de partículas o rayos de muy alta velocidad por lo que organizaciones mundiales de renombre como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Instituto de Tecnólogos de Alimentos han confirmado la eficacia de este proceso (Firouzi *et al.*, 2021). Las vitaminas son sensibles a la irradiación gamma y el nivel de degradación depende de la cantidad de agua, oxígeno, temperatura y pH del material

alimenticio (Bashir *et al.*, 2021). La sensibilidad a la irradiación de las vitaminas liposolubles es mayor en comparación con las vitaminas solubles en agua. Entre las vitaminas liposolubles, la vitamina A es la segunda vitamina más radiosensible, precedida por la vitamina E. El contenido de vitamina presente en el alimento disminuye significativamente a medida que aumenta la dosis (Catunescu *et al.*, 2019).

Aunque en general, se ha demostrado una mayor retención de las características sensoriales y los compuestos funcionales para los alimentos tratados mediante altas presiones hidrostáticas que en los tratados con métodos tradicionales, varios estudios de investigación han mostrado cambios en la calidad y concentración de compuestos bioactivos después de la aplicación de altas presiones y durante el almacenamiento. Estas modificaciones se han atribuido a la actividad enzimática residual que provoca la oxidación y degradación de algunos compuestos generando sabores desagradables, modificación del color y pérdida de calidad (principalmente vitaminas liposolubles debido a la oxidación de lípidos); disrupción celular que facilita la interacción entre enzimas indeseables y sus sustratos; oxígeno disuelto residual que puede causar oxidación (Sancho *et al.*, 1999; Ascencio *et al.*, 2021). La utilización de altas presiones no afecta significativamente o afecta solo ligeramente el contenido de vitaminas de los productos de frutas y verduras, excepto en combinaciones de presión y temperatura extremas, a presión constante, el aumento de temperatura favorece la degradación de las vitaminas (Oey *et al.*, 2008).

### 3.3.1. Impacto de la matriz alimentaria sobre la estabilidad de las vitaminas

Se elaboró la Tabla 28 con la finalidad de estudiar la dependencia de las condiciones de los procesos no térmicos con la pérdida de vitaminas, para poder evaluar el impacto de la matriz alimentaria en la pérdida de este nutriente.

**Tabla 28.** Porcentaje de pérdida de vitaminas (%) y condiciones de procesamiento, aplicados a los alimentos evaluados. Tecnologías emergentes (Kilcast, 1994; Sancho *et al.*, 1999; Villavicencio *et al.*, 2000; Sebastiao *et al.*, 2002; Estrada *et al.*, 2005; Verlinde *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2016; Aylangan *et al.*, 2017; Pinela *et al.*, 2019; Firouzi *et al.*, 2021)

	A		B1		B2		B6		B9		C	
	HPP (600 MPa 30 min)	I (10 kGy)	HPP (600 MPa / 30 min)	I (5 kGy)	HPP (600 MPa / 30 min)	I	HPP (400 MPa / 30 min)	I	HPP (400 MPa / 30 min)	I (5 kGy)	HPP (400 MPa / 30 min)	I (7.5 kGy)
<b>Cebollines</b>	48.39	18.37 (10 kGy)	NE		4.35	12.17 (7.5 kGy)	NE		10.30	17.85	10.06	12.90
<b>Brócoli</b>	NE		0.00	2.87	4.27	11.97 (7.5 kGy)	NE		10.30	18.80	10.06	12.90
<b>Champiñones</b>	NE		0.00	3.70	4.48	11.94 (7.5 kGy)	NE		NE		NE	
<b>Espinaca</b>	48.39	18.37 (10 kGy)	NE		4.76	12.17 (7.5 kGy)	0.51	19.49 (2 kGy)	10.30	18.80	NE	
<b>Espárragos</b>	NE		NE		4.26	12.06 (7.5 kGy)	1.10	19.78 (2 kGy)	10.30	18.80	NE	
<b>Frijoles Negros</b>	NE		NE		4.66	12.28 (5 kGy)	0.71	16.32 (5 kGy)	1.15	20.54	NE	
<b>Lentejas</b>	NE		NE		4.74	11.84 (1 kGy)	0.56	15.79 (5 kGy)	1.15	20.08	NE	
<b>Hígado de Pollo</b>	48.39	10.00 (5 kGy)	NE		4.49	27.02 (10 kGy)	0.59	13.95 (5 kGy)	NE		NE	
<b>Huevo Completo</b>	48.39	18.00 (5 kGy)	NE		4.60	15.10 (10 kGy)	NE		22.14	18.80	NE	

HPP: Procesamiento por Altas Presiones

I: Irradiación Gamma

NE: No Evaluado

kGy: kilogray

MPa: Megapascal

En la Tabla 28 se muestra que las condiciones mayormente empleadas en la aplicación de altas presiones para los alimentos estudiados es 400 MPa / 30 min y 600 MPa / 30 min, esto debido a que estudios han demostrado que en intervalos superiores a 400 MPa no se observa un aumento medible en la actividad microbiana (Valdramidis *et al.*, 2009).

Se recolectaron más datos acerca de las condiciones aplicadas a los alimentos sometidos a altas presiones por lo que se puede evaluar si existe diferencia significativa en el porcentaje de pérdida de vitamina B2 obtenido entre los alimentos estudiados con aplicación de presión de 600 MPa / 30 min. Se realizó un ANOVA de una vía, en la cual se demostró evidencia estadística para concluir que hay al menos un alimento cuyo porcentaje de pérdida de vitamina B2 es significativamente diferente para condiciones de 600 MPa / 30 min y para identificar qué alimento o alimentos son distintos, se realizó la prueba de Tukey.

En la Tabla 29 se muestran los resultados obtenidos a través de la prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ) en donde:  $q_{\alpha = 0.05}(9, 18) = 4.96$  y la diferencia honestamente significativa (HDS= 0.06).

**Tabla 29.** Prueba Tukey de porcentaje de pérdida de vitamina B2 durante el procesamiento de altas presiones a condiciones de 600 MPa / 30 min

	Cebollines	Brócoli	Champiñones	Espinaca	Espárragos	Frijoles Negros	Lentejas	Hígado de Pollo	Huevo Completo
Cebollines									
Brócoli									
Champiñones									
Espinaca									
Espárragos									
Frijoles Negros									
Lentejas									
Hígado de Pollo									
Huevo Completo									

Sombreado rojo: Existe diferencia significativa en el porcentaje de pérdida de vitamina B2 entre las parejas evaluadas ( $\alpha = 0.05$ )

Sombreado verde: No existe diferencia significativa en el porcentaje de pérdida de vitamina B2 entre las parejas evaluadas ( $\alpha = 0.05$ )

Con la prueba de Tukey, se concluye que entre todos los alimentos evaluados existe una diferencia significativa en el porcentaje de pérdida de Riboflavina, excepto entre brócoli y espárragos; espinacas y lentejas; champiñones e hígado de pollo.

Al igual que en el caso de la vitamina B2, se obtuvieron los datos necesarios de condiciones por lo que se pudo realizar un ANOVA de una vía para evaluar si existe diferencia significativa en el porcentaje de pérdida de vitamina B9 obtenido entre los alimentos estudiados con aplicación de presión de 400 MPa / 30 min. A partir de ésta, se demostró evidencia estadística para concluir que hay al menos un alimento cuyo porcentaje de pérdida de vitamina B9 es significativamente diferente para condiciones de 400 MPa / 30 min.

En la Tabla 30 se muestran los resultados obtenidos de la prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ) en donde:  $q_{\alpha = 0.05} (7,14) = 4.83$  y la diferencia honestamente significativa (HDS= 4.39).

**Tabla 30.** Prueba Tukey de porcentaje de pérdida de vitamina B9 durante el procesamiento de altas presiones a condiciones de 400 MPa / 30 min

	Cebollines	Brócoli	Espinaca	Espárragos	Frijoles Negros	Lentejas	Huevo completo
Cebollines							
Brócoli							
Espinaca							
Espárragos							
Frijoles Negros							
Lentejas							
Huevo Completo							

Sombreado rojo: Existe diferencia significativa en el porcentaje de pérdida de vitamina B9 entre las parejas evaluadas ( $\alpha = 0.05$ )

Sombreado verde: No existe diferencia significativa en el porcentaje de pérdida de vitamina B9 entre las parejas evaluadas ( $\alpha = 0.05$ )

A partir de los resultados estadísticos, se concluye que no existe una diferencia significativa en el porcentaje de pérdida de vitamina B9 entre alimentos pertenecientes al mismo grupo de alimentos, sin embargo, entre grupos de alimentos si existe una diferencia significativa, siendo el alimento perteneciente al grupo de origen animal (huevo

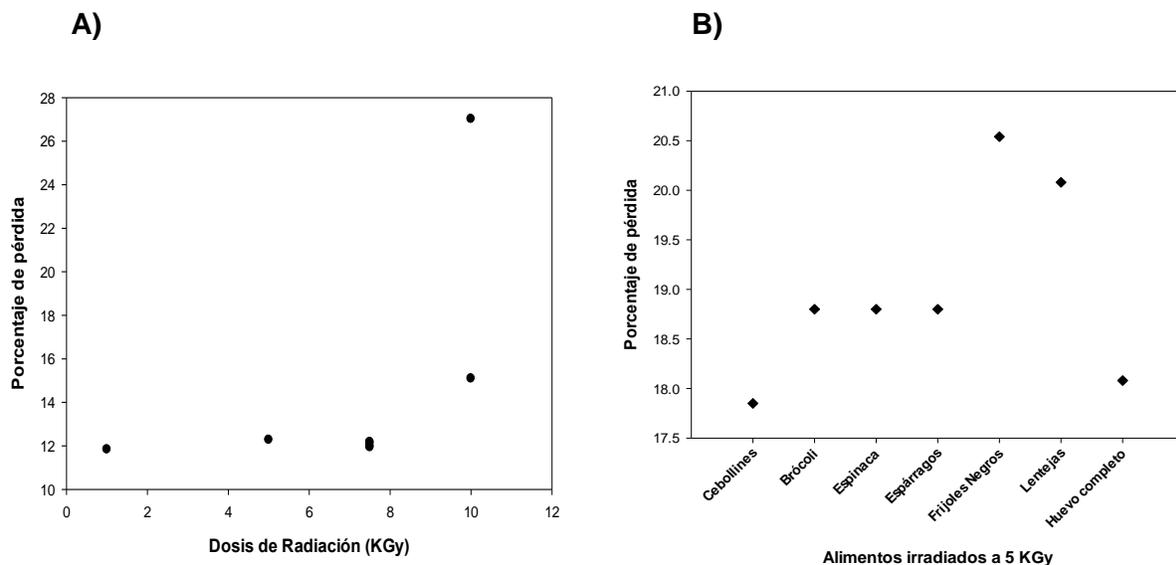
completo) el que mostró mayor diferencia en comparación a los pertenecientes de los grupos: Leguminosas y de frutas y verduras.

Con base en los análisis de varianza (Tablas 29 y 30), se observa que, manteniendo la presión constante, la matriz alimentaria es un factor que va a influir en el porcentaje de pérdida que se obtenga a través del procesamiento mediante altas presiones.

Para condiciones de 400 MPa / 30 min, en alimentos pertenecientes a un mismo grupo de alimentos, no existirá diferencia honestamente significativa en el porcentaje de pérdida, únicamente existirá diferencia entre alimentos de diferente grupo.

Para condiciones de 600 MPa / 30 min, todos los alimentos tendrán diferencia honestamente significativa en el porcentaje de pérdida de vitamina sin importar al grupo de alimentos al que pertenecen.

Para explicar el comportamiento de las vitaminas mediante la aplicación de diferentes dosis de irradiación y para discutir si la matriz es un factor que influye en su comportamiento cuando se aplica una misma dosis de radiación, se elaboraron las Figuras 4A y 4B, respectivamente.



**Figura 4.** Porcentaje de pérdida de los alimentos estudiados para A) vitamina B2 durante el proceso de irradiación a diferentes dosis y B) vitamina B9 durante el proceso de irradiación a 5 kGy en distintos alimentos

En la Figura 4A se observa un aumento significativo en el porcentaje de pérdida a partir de la aplicación de una radiación gamma de 10 kGy, de 1 a 7.5 kGy se tiene un comportamiento constante.

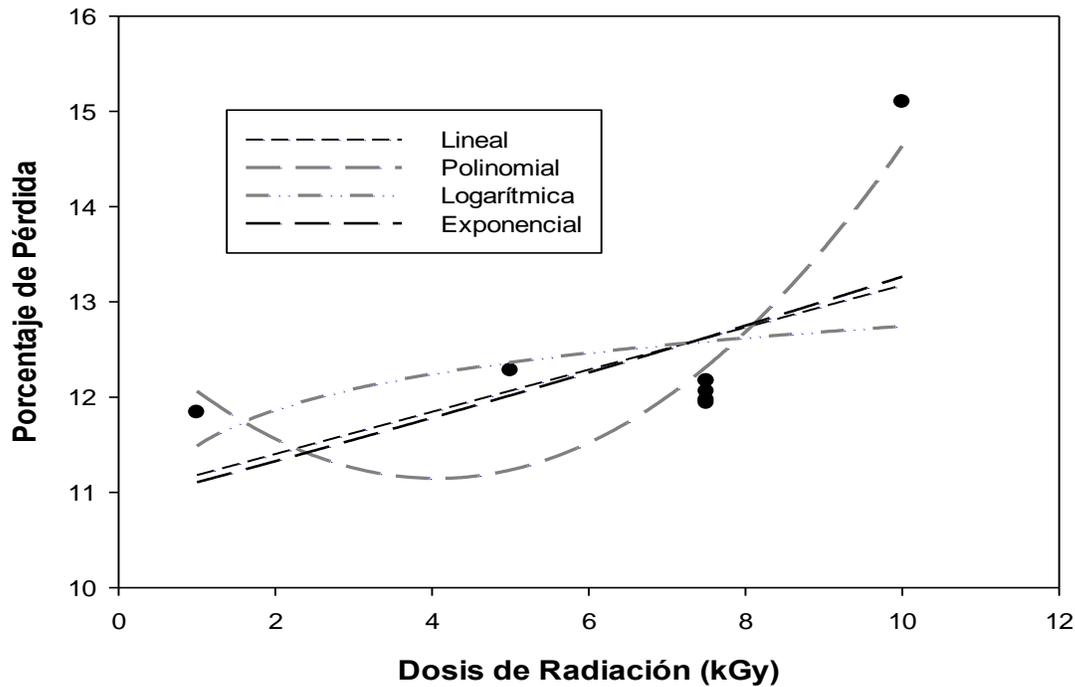
La matriz alimentaria es un factor importante en el porcentaje de pérdida obtenido en la vitamina B9 (Figura 4B), siendo los alimentos pertenecientes al grupo de cereales y legumbres (frijoles negros y lentejas) los más afectados durante el proceso de irradiación. El huevo y los alimentos pertenecientes al grupo de frutas y verduras tienen un comportamiento similar en el porcentaje de pérdida.

### **3.3.2. Propuesta de modelo matemático para predecir la pérdida de vitaminas**

Debido a que los datos que se consolidaron (Tabla 28) cubrían las condiciones de irradiación para la Riboflavina, se intentó proponer un modelo matemático para explicar la pérdida de esta vitamina en los alimentos estudiados, sometidos a esta tecnología emergente.

Una vez que se ha realizado un experimento y se tiene una tabla de datos, se puede hacer una gráfica con ellos, la cual facilitará la interpretación de los resultados. Para realizar la interpretación de los datos experimentales se utilizó el análisis gráfico el cual consiste en descubrir la relación matemática existente entre la variable dependiente y la independiente para proporcionar un modelo matemático que relacione dichas variables (Oda, 2005; Manzur, 2009).

Se graficaron (Figura 5) las diferentes líneas de tendencia con el fin de seleccionar la ecuación que más se adaptara al comportamiento de los datos obtenidos. Dichas ecuaciones se presentan en la Tabla 31.



**Figura 5.** Comparación de las diferentes regresiones propuestas para el modelo matemático

**Tabla 31.** Ecuaciones regresivas de predicción de vitamina B2 en alimentos sometidos a irradiación

Regresión	Ecuación	Coefficiente de determinación (R <sup>2</sup> )
Lineal	Y = 0.2215x + 10.96	0.2952
Polinomial	Y = 0.0986x <sup>2</sup> - 0.7985x + 12.763	0.7890
Exponencial	Y = 11.104e <sup>0.0166x</sup>	0.3004
Logarítmica	Y = 0.5461ln(x) + 11.486	0.1356

Para evaluar la correlación que existe entre los ocho pares de datos analizados en la Figura 5, se utilizó la prueba de coeficiente de correlación de Pearson ( $r_p$ ) que permite identificar la forma en la que se asocian las dos variables cuantitativas continuas.

Se determinó el valor del coeficiente de correlación de Pearson calculado ( $r_p$  calculado) mediante la siguiente fórmula (Reynaga, 2007):

$$r_p = \frac{n \sum xy - [(\sum x)(\sum y)]}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

Los cálculos condujeron al siguiente resultado:

$$r_p = \frac{(8)(676.56) - [(53.50)(99.53)]}{\sqrt{[(8)(407.25) - (53.50)^2][(8)(1246.50) - (99.53)^2]}} = +0.54$$

Por último y con el fin de emplear en forma práctica la magnitud de  $r_p$  como indicador del grado de correlación o asociación entre las variables se da como resultado una correlación positiva moderada con base en la Tabla presentada en el Anexo II.

En la Figura 5 se observa que para dosis menores de 8 kGy, el porcentaje de pérdida se mantiene razonablemente constante alrededor de 12 %, sin embargo, para dosis mayores de 10 kGy el porcentaje de pérdida aumenta hasta 15 %.

Con base en la Figura 5 y las ecuaciones de la Tabla 31, se observa que modelo matemático que podría ser más apropiado para predecir la pérdida de vitamina B2 de los alimentos estudiados sometidos a irradiación (Figura 4A), es el comportamiento polinomial de grado 2, el cual tiene un coeficiente de determinación de 0.7890. Por lo tanto, el modelo que podría predecir la pérdida de Riboflavina para los alimentos irradiados estudiados se representa:

$$\text{Porcentaje de pérdida} = 0.098(KGy)^2 - 0.7985(KGy) + 12.763$$

El modelo matemático propuesto no es confiable para predecir el porcentaje de pérdida de vitamina B2 en los alimentos, puesto que no se presentan los datos mínimos necesarios por lo que estadísticamente no se puede analizar. Debido a que la ecuación propuesta es cuadrática, es necesario mínimo siete niveles de radiación para obtener una estadística confiable (Miller y Miller, 2002).

Este modelo propuesto, al ser una estimación de datos publicados tiene un coeficiente de determinación de 0.7890 debido a que no se puede considerar todos los casos posibles encontrados en la práctica como: Dimensiones de corte, proceso empleado (la tecnología de irradiación se puede llevar a cabo a temperatura ambiente “no térmico” o con la aplicación de calor “térmico”), condiciones en el equipo, por mencionar algunos. Además de la temperatura, se deben tener otros parámetros como la humedad, el pH o

composición química del alimento para poder explicar las diferencias experimentales (Kondjoyan *et al.*, 2018).

La pérdida promedio de vitamina B en los productos, es resultado de combinaciones complejas de variaciones de tiempo y temperatura en todo el proceso, por ello, en ocasiones diferentes procesos o condiciones de procesamiento pueden conducir a modelos matemáticos similares en donde la pérdida promedio de vitamina B sea la misma (Kondjoyan *et al.*, 2018).

## CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos de la revisión bibliográfica y de las bases de datos consultadas se ha demostrado que los alimentos pertenecientes al grupo de frutas y verduras son los que contienen la mayor cantidad de vitaminas, seguido de los granos y cereales, así como, los alimentos de origen animal es el grupo de alimentos que contiene el menor contenido de este nutriente.

Las operaciones más usadas en los alimentos son: Cocción, secado y congelación. Las tecnologías emergentes aplicadas son: Altas presiones e irradiación.

El procesamiento convencional de alimentos afecta considerablemente el contenido de vitaminas. La operación que más afecta su contenido es el secado, seguido de la cocción y finalmente la congelación.

La vida útil de los alimentos está determinada por el contenido de vitamina C debido a que es la vitamina más inestable. En el caso de los alimentos congelados la vida media aumenta conforme disminuye la temperatura de congelación. De igual forma, se corrobora que los iones metálicos presentes en la composición promueven la oxidación de ácido ascórbico lo que ocasiona que la vida útil se reduzca.

Durante la aplicación de procesamientos no térmicos, también conocidas como tecnologías emergentes, las vitaminas liposolubles se ven mayormente afectadas con la aplicación de altas presiones, mientras que las vitaminas hidrosolubles son mayormente afectadas con la irradiación. Para ambas tecnologías emergentes, el porcentaje de pérdida que se obtiene es menor en comparación con la aplicación de procesos convencionales (procesamiento térmico).

No fue posible proponer un modelo matemático para la predicción de la pérdida de Riboflavina a través de la aplicación de irradiación gamma debido a que no se recabaron los datos suficientes.

Finalmente, las variables que más afectaron el contenido de vitaminas presente en los alimentos estudiados fueron: Tipo de procesamiento, temperatura, matriz alimentaria y composición química.

## REFERENCIAS

- Aguilar, J. (2012). Métodos de conservación de alimentos. Estado de México: Red Tercer Milenio.
- Alibas, I., Yilmaz, A., Asik, B. & Erdogan, H. (2021). Influence of drying methods on the nutrients, protein content and vitamin profile of basil leaves. *Journal of Food Composition and Analysis*, 96: 103758. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103758>
- ANSES-CIQUAL. (2021). Table de composition nutritionnelle des aliments. [En línea]. (Actualizado al 21 de mayo de 2021).
- Disponible en:
- <https://ciqual.anses.fr/> [Último acceso el 21 de mayo de 2021].
- Arvanitoyannis, I. & Stratakos, A. (2010). Chapter 7 - Irradiation of Poultry and Eggs. **En** I. Arvanitoyannis ed. *Irradiation of Food Commodities: Techniques, Applications, Detection, Legislation, Safety and Consumer Opinion*. Londres: Academic Press, 223 – 264. ISBN: 978-0-12-374718-1
- Ascencio, F., Yildiz, S., Leyva, D., Soto, M., Welti, J., Singh P., Lavilla, M. & Escobedo, Z. (2021). HHP Influence on Food Quality and Bioactive Compounds: A Review of the Last Decade. *Innovative Food Processing Technologies*, 1, 87 – 111. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22984-3>
- Aylangan, A., Ic, E. & Ozyardimci, B. (2017). Investigation of gamma irradiation and storage period effects on the nutritional and sensory quality of chickpeas, kidney beans and green lentils. *Food Control*, 80, 428 – 434. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.04.005>
- Bajaj, S. & Singhal, R. (2020). Degradation kinetics of vitamin B12 in model systems of different pH and extrapolation to carrot and lime juices. *Journal of Food Engineering*, 272, 109800. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109800>
- Bashir, K., Swer, T., Rani, S., Jan, K. & Jan, S. (2021). Effect of Irradiation on Food Components. *Innovative Food Processing Technologies*, 2, 71 – 78. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.23034-5>

- Bernas, E. & Jaworska, G. (2016). Vitamins profile as an indicator of the quality of frozen *Agaricus bisporus* mushrooms. *Journal of Food Composition and Analysis*, 49, 1 – 8. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.03.002>
- Berry, P. (2010). Stability of vitamins during food processing and storage. *Chemical Deterioration and Physical Instability of Food and Beverages*, 539-560. ISBN: 978-1-84569-495-1
- Bisht, B., Bhatnagar, P., Gururani, P., Kumar, V., Singh, M., Sinhmar, R., Rathi, N. & Kumar, S. (2021). Food irradiation: Effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables – a review. *Trends in Food Science & Technology*. 114, 372 – 385. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.002>
- Blasco, R., Esteve, M., Frígola, A. & Rodrigo, M. (2004). Ascorbic acid degradation kinetics in mushrooms in a high-temperature short-time process controlled by a thermoresistometer. *LWT - Food Science and Technology*, 37(2), 171 – 175. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2003.08.003>
- Cava, R., García, J. & Ladero, L. (2020). Effect of high hydrostatic pressure processing and storage temperature on food safety, microbial counts, colour and oxidative changes of a traditional dry-cured sausage. *LWT - Food Science and Technology*, 128, 109462. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109462>
- Castillo, P. y Miranda L. (2009). Cinética de la degradación de la vitamina C en el jugo concentrado y congelado de maracuyá. (Actualizado al 03 de marzo de 2009)  
Disponible en:  
<https://bit.ly/3rPz2zw> [Último acceso el 15 de julio de 2021]
- Catunescu, G., Muntean, M., Marian, O., David, A. & Rotar, A. (2019). Comparative effect of gamma irradiation, drying and freezing on sensory, and hygienic quality of parsley leaves. *LWT – Food Science and Technology*, 115, 108448. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108448>

- Chazi, C. (2006). Las Vitaminas. La Granja. Revista de Ciencias de la Vida, 4, 51 – 54.  
<https://doi.org/10.17163/lgr.n4.2005.07>
- Chen, X., Li, T., He, K., Geng, Z. & Wan, X. (2021). Dietary green tea powder supplementation enriched egg nutrients and physicochemical property in an indigenous chicken breed. Poultry Science, 100(1), 388 – 395.  
<https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.10.001>
- Combs, G. & McClung, J. (2017). The Vitamins. Fundamental Aspects in Nutrition and Health (5th. Ed.). Oxford: Academic Press. ISBN: 9780128029831
- Corradini, M. & Peleg, M. (2006). Prediction of vitamins loss during non-isothermal heat processes and storage with non-linear kinetic models. Trends in Food Science & Technology, 17(1), 24 – 34. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.09.004>
- Deák, T. (2014a). Food Technologies: Pasteurization. Encyclopedia of Food Safety, 3, 219 – 224. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-378612-8.00257-2>
- Deák, T. (2014b). Food Technologies: Sterilization. Encyclopedia of Food Safety, 3, 245 – 252. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-378612-8.00258-4>
- Dionisio, A., Takassugui, R. & Oetterer, M. (2009). Ionizing radiation effects on food vitamins. Brazilian Archives of Biology and Technology, 52 (5).  
<https://doi.org/10.1590/S1516-89132009000500026>
- Estrada, Y., Swanson, B. & Barbosa, G. (2005). Advances in the use of high hydrostatic pressure for processing cereal grains and legumes. Trends in Food Science & Technology, 16 (5), 194 – 203. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2004.10.005>
- FDA. (2018). La Irradiación de alimentos: Lo que usted debe saber. [En línea] (Actualizado al 01 de abril de 2018).  
Disponible en:  
<https://bit.ly/3u6ho8V> [Último acceso el 26 de marzo de 2021].
- Fellows, P. (2017). Food Processing technologies: Principles and practices. (3rd ed.). Cambridge, MA: Woodhead Publishing, Elsevier. 271 – 285. ISBN: 1-85573-533-4

- Firouzi, S., Khorshidi, A., Soltani, J., Zia, S., Amani, M. & Reza, M. (2021). Evaluation of gamma and electron radiations impact on vitamins for onion preservation. *Applied Radiation and Isotopes*, 167, 109442. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109442>
- Giannakourou, M. & Taukis, P. (2003). Kinetic modelling of vitamin C loss in frozen green vegetables under variable storage conditions. *Food Chemistry*, 83(1), 333 – 41. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(03\)00033-5](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00033-5)
- Goncalves, E., Abreu, M., Brandao, T. & Silva, C. (2011). Degradation kinetics of colour, vitamin C and drip loss in frozen broccoli (*Brassica oleracea* L. ssp. *Italica*) during storage at isothermal and non-isothermal conditions. *International Journal of Refrigeration*, 34(8), 2136 – 2144. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.06.006>
- Hernández, H., Moreno, L. & Villanueva, S. (2019). Current status of emerging food processing technologies in Latin America: Novel non-thermal processing. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 58, 102233. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102233>
- Ibarz, A. y Barbosa-Cánovas, G. (2005). *Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos*. España: Ediciones Muldi-Prensa. ISBN: 84-8476-163-0
- Jayas, D. (2016). *Food Dehydration. Reference Module in Food Science*. ISBN: 978-0-08-100596-5
- Jermann, C., Koutchma, T., Margas, E., Leadley, C. & Ros, V. (2015). Mapping trends in novel and emerging food processing technologies around the world. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 31, 14 – 27. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.06.007>
- John, D. & Ramaswamy, H. (2018). Pulsed light technology to enhance food safety and quality: a mini-review. *Current Opinion in Food Science*, 23, 70 – 79. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.06.004>

- Kasisviswanathan M., Marella, C. & Sunkesula, V. (2019). Food Freezing Technology. **En:** M. Kutz. ed. Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering. (Third Edition). New York: Academic Press, 389 – 415. ISBN: 978-0-12-814803-7
- Khattak, K. & Rahman, T. (2016). Effect of gamma irradiation on the vitamins, phytochemicals, antimicrobial and antioxidant properties of Ziziphus mauritiana Lam. leaves. Radiation Physics and Chemistry, 127, 243 – 248. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.07.001>
- Khouryieh, H. (2021). Novel and emerging technologies used by the U.S. food processing industry. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 67, 102559. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102559>
- Kilcast, D. (1994). Effect of irradiation on vitamins. Food Chemistry, 49(2), 157 – 164. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(94\)90152-X](https://doi.org/10.1016/0308-8146(94)90152-X)
- King, J y de Pablo, S. (1987). Pérdida de vitaminas durante el procesamiento de los alimentos. Revista Chilena de Nutrición, 15(3), 143 – 152. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182016000100012>
- Kmiecik, W. & Lisiewska, Z. (1999). Effect of pretreatment and conditions and period of storage on some quality indices of frozen chive (*Allium schoenoprasum* L.). Food Chemistry, 67(1), 61 – 66. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(99\)00111-9](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00111-9)
- Kondjoyan, A., Portanguen, S., Duchene, C. Mirade, P. & Gandemer, G. (2018). Predicting the loss of vitamins B3 (niacin) and B6 (pyridoxamine) in beef during cooking. Journal of Food Engineering, 238, 44 – 53. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.06.008>
- Korus, A. (2020). Changes in the content of minerals, B-group vitamins and tocopherols in processed kale leaves. Journal of Food Composition and Analysis, 89, 103464. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103464>
- Latham, M. (2002). Vitaminas. **En:** M. Latham. ed. Nutrición humana en el mundo en desarrollo. Roma:FAO, capítulo 11. ISBN: 92-5-303818-7

- Leskova, E., Kubikova, J., Kovacikova, E., Kosicka, M., Porubska, J. & Holcikova, K. (2006). Vitamin losses: Retention during heat treatment and continual changes expressed by mathematical models. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19(4), 252 – 276. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2005.04.014>
- Manzur, A. (2009). Análisis gráfico. Parte I. Escalas lineales y logarítmicas. *Revista ContactoS: UAM*, 75(1), 40 – 52. <https://bit.ly/3sllLJa>
- Martínez, E. (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. *Anuario Jurídico y Económico Escorialense*, 38, 315 – 332. ISSN: 1133-3677
- Merve. T. & Seid, J. (2019). Influence of Food Processing Operations on Vitamins. *Encyclopedia of Food Chemistry*, 2, 129 – 139. ISBN: 978-0-08-100596-5
- Miller, N. y Miller, J. (2002). *Estadística y Quimiometría para Química Analítica*. (4ta. Ed.). Madrid: Pearson Educación, S.A., 111 – 146. ISBN: 84-205-3514-1
- Molledo, A., Jiménez, S., Álvarez, C., Manyani, T. Ramos, M. & Custodio, E. (2021). Raw versus cooked food matching: nutrient intake using the 2015/16 Kenya Integrated Household Budget Survey. *Journal of Food Composition and Analysis*, 102, 103879. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103879>
- Moreira, R. & Castell, M. (2021). 2.01 Fundamentals of Food Irradiation. *Innovative Food Processing Technologies*, 2, 1 – 18. ISBN: 978-0-12-815782-4
- Mousakhani, A., Amiri, A., Nasrollahzadeh, F., Wiktor, A., Nilghaz, A., Pratap A. & Mousavi, A. (2021). Electro-based technologies in food drying - A comprehensive review. *LWT*, 145, 111315. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111315>
- Oda, B. (2005). *Introducción al análisis gráfico de datos experimentales* (3a. edición). México: Facultad de Ciencias, UNAM, 45 – 57. ISBN: 970-32-1150-X
- Oey, I., Plancken, I., Van Loey, A. & Hendrickx, M. (2008). Does high pressure processing influence nutritional aspects of plant based food systems? *Trends in Food Science & Technology*, 19(6), 300 – 308. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.09.002>

- Palacios, L. (2013). Breve Historia de las Vitaminas. *Revista Médica Sanitas*, 16(3), 142 – 145. <https://doi.org/10.26852/issn.0123-4250>
- Pinela J., Morales, P., Cabo, S., Antonio, A., Carvalho, A., Oliveira, M., Cámara, M. & Ferreira, I. (2019). Stability of total folates/vitamin B9 in irradiated watercress and buckler sorrel during refrigerated storage. *Food Chemistry*, 274, 686 – 690. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.042>
- Rai, A., Zulkurnáin, A., Ume, R., Muhammad, A., Amirreza, N., Muhammad, I., Alaa, B., Zhi-Wei, L. & Rana, A. (2021). Pulsed electric field: A potential alternative towards a sustainable food processing. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 43 – 54. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.041>
- Reynaga, J. (2007). Lecturas de apoyo sobre Estadística Analítica. En *Salud Pública II* (pp. 18 – 28). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rigaux, C., Georgé, S., Albert, I., Renard, C. & Carlin, F. (2016). A mechanistic and probabilistic model estimating micronutrient losses in industrial food processing: Vitamin C and canned green beans, a case-study. *LWT – Food Science and Technology*, 69, 236 – 246. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.01.051>
- Ros, G., Periago, M. e Iniesta, M. (2008). Folatos: funcionalidad y salud. *Ciencia en la frontera: Revista de ciencia y tecnología de la UACJ*, 6, 11 – 40. ISSN: 2007-042X
- Russell, R. y Suter, P. (2016). Deficiencia y exceso de vitaminas y oligoelementos. **En:** D. Kasper, A. Fauci, S. Hauser, D. Longo, J. Jameson y J. Loscalzo. eds. Harrison. *Principios de Medicina Interna*, 19e. McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V., Capítulo 96e. ISBN: 978-607-15-1335-9
- Salinas, R., González, G., Pirovani, M. y Ulín F. (2007). Modelación del deterioro de productos vegetales frescos cortados. *Universidad y Ciencia*, 23(2), 1183 – 196. ISSN: 0186-2979

- Sancho, F., Lambert, Y., Demazeau, G., Largeteau, A., Bouvier, J. & Narbonne, J. (1999). Effect of ultra-high hydrostatic pressure on hydrosoluble vitamins. *Journal of Food Engineering*, 39(3), 247 – 253. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00143-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00143-5)
- Sarkar, T., Salauddin, M., Kumar, S. & Chakraborty, R. (2020). The impact of raw and differently dried pineapple (*Ananas comosus*) fortification on the vitamins, organic acid and carotene profile of dairy rasgulla (sweetened cheese ball). *Heliyon*, 6(10), e05233. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05233>
- Sebastiao, K., Almeida, L., Romanelli, M., Massae, P. & Villavicencio, A. (2002). Effect of gamma-irradiation on the levels of total and cis/trans isomers of beta-carotene in dehydrated parsley. *Radiation Physics and Chemistry*, 63(3-6), 333 – 335. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(01\)00626-0](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(01)00626-0)
- Serpa, A., Vásquez, D., Hincapié, G. y Castrillón, D. (2015). Comparación de dos técnicas de deshidratación de guayaba-pera (*Psidium guajava* L.) sobre los efectos del contenido de vitamina C y el comportamiento de las propiedades técnico-funcionales de la fibra dietaría. *Revista Lasallista de Investigación*, 12(1), 11 – 20. <https://doi.org/10.22507/rli.v12n1a1>
- Servín, M. (2013). *Nutrición Básica y Aplicada*. ENEO, UNAM. [En línea] (Actualizado a junio de 2013).
- Disponible en:
- <https://bit.ly/2SapX4H> [Último acceso el 13 de marzo de 2021].
- Soris, P., Paulpriya, K., Ramasamy, V. & Solomon, J. (2017). Effect of gamma irradiation on the nutritional and antinutritional qualities of *Vigna aconitifolia* (Jacq.) Marechal: An underutilized food legume. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 10, 30 – 37. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2017.02.002>
- Téllez, L., Ramírez, J., Pérez, L., Vázquez, M. y Simal, J. (2001). Aplicación de la alta presión hidrostática en la conservación de los alimentos. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 3(2), 66 – 80. ISSN: 1135-8122

- Terefe, N., Buckow, R. & Versteeg, C. (2015). Quality-related enzymes in plant-based products: Effects of novel Food processing technologies part 2: Pulsed electric field processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(1), 1 – 15. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.701253>
- Teuteberg, V., Kluth, I., Ploetz, M. & Krischek, C. (2021). Effects of duration and temperature of frozen storage on the quality and food safety characteristics of pork after thawing and after storage under modified atmosphere. *Meat Science*, 174, 108419. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108419>
- Tolonen, M. (1996). Vitamins. **En:** M. Tolonen. Ed. Vitamins and Minerals in Health and Nutrition. Woodhead Publishing, 99 – 147. ISBN: 978-1-85573-277-3
- U.S. Department of Agriculture. (2021). FoodData Central. [En línea]. (Actualizado al 21 de mayo de 2021).
- Disponible en:
- <https://fdc.nal.usda.gov/> [Último acceso el 21 de mayo de 2021].
- Valdramidis, V., Graham, W., Beattie, A., Linton, M., McKay, A., Fearon, A. & Patterson, M. (2009). Defining the stability interfaces of apple juice: Implications on the optimisation and design of High Hydrostatic Pressure treatment. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 10(4), 396 – 404. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2009.02.006>
- Verlinde, P., Oey, I., Hendrickx, M. & Loey, A. (2008). High-pressure treatments induce folate polyglutamate profile changes in intact broccoli (*Brassica oleraceae* L. cv. *Italica*) tissue. *Food Chemistry*, 111 (1), 220 – 229. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.03.065>
- Villavicencio, A., Mancini, J., Delincée, H. & Bognár, A. (2000). Effect of gamma irradiation on the thiamine, riboflavin and vitamin B6 content in two varieties of Brazilian beans. *Radiation Physics and Chemistry*, 57(3-6), 299-203. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(99\)00395-3](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(99)00395-3)

- Witten, S. & Aulrich, K. (2018). Effect of variety and environment on the amount of thiamine and riboflavin in cereals and grain legumes. *Animal Feed Science and Technology*, 238, 39 – 46. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.01.022>
- Yaman, M., Catak, J., Ugur, H., Gürbüz, M., Belli, I., Nur, S., Yildirim, H., Cengiz, S., Burak, B., Kismiroglu, C., Özgür, B. & Cihan, M. (2021). The bioaccessibility of water-soluble vitamins: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 552 – 563. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.056>
- Zhang, Y., Wang, G., Jin, Y., Deng, Y. & Zhao, Y. (2016). Effects of high hydrostatic pressure processing on purine, taurine, cholesterol, antioxidant micronutrients and antioxidant activity of squid (*Todarodes pacificus*) muscles. *Food Control*, 60, 189 – 195. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.07.044>

## ANEXO I.

Tabla 1A. Contenido de Humedad (%) considerada para los cálculos en base seca (Kilcast, 1994; Kmiecik & Lisiewska, 1999; Sancho *et al.*, 1999; Villavicencio *et al.*, 2000; Estrada *et al.*, 2005; Leskova *et al.*, 2006; Khattak & Rahman, 2016; Aylangan *et al.*, 2017; Sarkar 2020; Alibas *et al.*, 2021; Firouzi *et al.*, 2021; ANSES, 2021; USDA, 2021)

	Crudo	Cocido	Congelado	Secado	Alta Presión	Irradiación
Cebollines	90.70	90.80	90.80	2.00	90.70	90.70
Brócoli	89.30	92.50	91.50	6.60	89.30	89.30
Champiñones	92.40	91.10	93.30	9.50	92.40	92.40
Espinaca	91.40	92.80	91.60	6.20	91.40	91.40
Espárragos	93.20	93.40	94.20	6.90	93.20	93.20
Frijoles Negros	11.00	90.80	55.10	9.52	11.00	9.05
Lentejas	8.26	69.60	41.30	8.96	8.26	6.79
Hígado de Pollo	76.50	66.80	NR	5.20	76.50	76.50
Huevo completo	75.80	87.80	75.40	4.07	75.80	75.80

## ANEXO II.

Tabla 2A. Correlación entre dos variables (Reynaga, 2007)

Valores de $r_p$	Tipo y grado de correlación
-1	Negativa perfecta
$-1 < r_p \leq -0.8$	Negativa fuerte
$-0.8 < r_p < -0.5$	Negativa moderada
$-0.5 \leq r_p < 0$	Negativa débil
0	No existe
$0 < r_p \leq 0.5$	Positiva débil
$0.5 < r_p < 0.8$	Positiva moderada
$0.8 \leq r_p < 1$	Positiva fuerte
1	Positiva perfecta