



FACULTAD CIENCIAS DE LA VIDA Y TECNOLOGÍAS

CARRERA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

**PLANIFICACIÓN PARA EL TRABAJO DE TITULACIÓN EN LA MODALIDAD
ARTICULO CIENTÍFICO REQUISITO PARA OPTAR EL TITULO DE
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

TEMA:

EFECTO DE LA ENZIMA TRANSGLUTAMINASA SOBRE LAS PROPIEDADES
FISICOQUÍMICAS DEL QUESO FRESCO ELABORADO CON LECHE DE VACA.

AUTOR:

TIGUA BARREZUETA EMANUEL JOSHUE

TUTOR:

ING. JOSE LUIS COLOMA HUREL. PhD

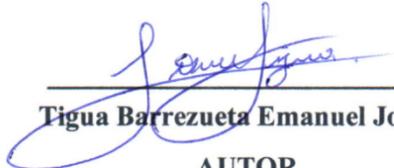
MANTA – MANABÍ – ECUADOR

2025 – 1

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Tigua Barrezueta Emanuel Joshue C.I. 1350589006, declaro por la presente que soy el autor intelectual del trabajo de investigación titulado “EFECTO DE LA ENZIMA TRANSGLUTAMINASA SOBRE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL QUESO FRESCO ELABORADO CON LECHE DE VACA.”. Confirmando que he contribuido de manera significativa a la concepción, el diseño, la ejecución y la interpretación del estudio presentado. A este respecto, he participado activamente en la redacción del manuscrito y en su revisión crítica. En cada fase del desarrollo de este trabajo, me he esforzado por asegurar la precisión y la integridad de cada parte del estudio.

Quiero enfatizar que el contenido de este estudio es original, no ha sido plagiado de ninguna otra fuente y todas las referencias utilizadas para la investigación están debidamente citadas en el documento, por tanto, me comprometo a mantener los principios de ética e integridad en la investigación y asumo total responsabilidad por el contenido de este estudio.



Tigua Barrezueta Emanuel Joshue
AUTOR

Manta, 15 de Agosto, 2025

	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-04-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO BAJO LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	REVISIÓN: 1 Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor(a) de la Facultad de Ciencias de la Vida y Tecnologías de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría del estudiante Tigua Barrezueta Emanuel Joshue, legalmente matriculado/a en la carrera de Ingeniería Agroindustrial período académico 2025-2026, cumpliendo el total de 16 horas, cuyo tema del proyecto es "Efecto de la enzima transglutaminasa sobre las propiedades fisicoquímicas del queso fresco elaborado con leche de vaca".

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Lugar, 6 de agosto de 2025.

Lo certifico,



PhD José Luis Coloma Hurel
Docente Tutor
Área: Agroindustria

Nota 1: Este documento debe ser realizado únicamente por el/la docente tutor/a y será receptado sin enmendaduras y con firma física original.

Nota 2: Este es un formato que se llenará por cada estudiante (de forma individual) y será otorgado cuando el informe de similitud sea favorable y además las fases de la Unidad de Integración Curricular estén aprobadas.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesaria para culminar con éxito esta etapa tan importante en mi vida.

A mi madre, por su amor incondicional, apoyo constante y sacrificio, que han sido la base de mi formación personal y profesional.

A mi hermana y a mi hermano, por su compañía, motivación y palabras de aliento que me impulsaron a seguir adelante en los momentos difíciles.

A mis compañeros de clase, especialmente a Xiomara, Pierina y Kerly, cuyo apoyo incondicional durante este último semestre fue fundamental para alcanzar el éxito en mis estudios. Agradezco especialmente su ayuda durante los análisis de laboratorio, que hizo posible completar esta etapa con resultados satisfactorios.

A mis profesores, por compartir sus conocimientos y guiarme a lo largo de mi formación, y especialmente a mi tutor, por su orientación, paciencia y apoyo constante durante la elaboración de este trabajo de titulación.

A la empresa que me abrió las puertas para realizar mis practicas preprofesionales, brindándome la oportunidad de aprender y crecer en el ámbito laboral, y que además confío en mí al integrarme como parte de su equipo de trabajo.

A todos quienes, de una u otra manera, aportaron con su ayuda y apoyo en este proceso, mi más sincero agradecimiento.

Tigua Barrezueta Emanuel Joshue

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía constante y mi fuerza en los momentos de incertidumbre, por enseñarme que con fe y perseverancia todo es posible.

A mi madre, por su amor incondicional y su ejemplo de sacrificio, que me enseñó a luchar con valentía y nunca rendirme ante los desafíos de la vida.

A mi hermana y hermano, por ser mi alegría, mi apoyo y mis cómplices de cada paso, por recordarme siempre que no estoy solo en este camino.

A mi abuelita, cuyo recuerdo y enseñanza sigue iluminando mi vida, inspirándome a ser mejor cada día y a valorar los pequeños momentos de amor y ternura.

A mi familia mas cercana, por ser mi refugio y mi motor, por darme confianza, la fuerza y el cariño que hicieron posible alcanzar esta meta.

Tigua Barrezueta Emanuel Joshue

Efecto de la enzima transglutaminasa sobre las propiedades fisicoquímicas del queso fresco elaborado con leche de vaca

Effect of the enzyme transglutaminase on the physicochemical properties of fresh cheese made from cow's milk

Tigua Barrezueta Emanuel Joshue, Coloma Hurel José Luis.

Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Facultad de Ciencias de la Vida y Tecnología, Manta, Ecuador

Resumen: El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la enzima transglutaminasa (TG) en distintas propiedades fisicoquímicas del queso fresco. Se desarrollaron 45 unidades experimentales de 200 g cada una, bajo un diseño bifactorial completamente al azar, con tres niveles de TG (0, 10 y 20 U/g) y cinco tiempos de almacenamiento (0, 7, 14, 21 y 28 días). Se analizaron las variables de rendimiento, pérdida de peso, proteína, pH, color, capacidad de retención de agua (CRA) y perfil de textura. Los resultados evidenciaron que la adición de 20 U/g mejoró el rendimiento (23 %), pero también incrementó la pérdida de peso (33,13 %), posiblemente por una menor CRA. En cambio, 10 U/g ofreció un equilibrio óptimo entre retención de agua, contenido proteico y firmeza textural, especialmente entre los días 14 y 28 de almacenamiento. Se concluye que la enzima TG influye significativamente ($p < 0,05$) en la calidad del queso fresco, y se recomienda explorar futuras formulaciones que combinen enzimas o evalúen distintas condiciones de almacenamiento para optimizar su aplicación tecnológica.

Palabras clave: Transglutaminasa, propiedades fisicoquímicas, queso fresco

Abstract: The aim of this study was to evaluate the effect of the enzyme transglutaminase (TG) on different physicochemical properties of fresh cheese. 45 experimental units of 200 g each were developed, under a completely randomized two-factor design, with three levels of TG (0, 10 and 20 U/g) and five storage times (0, 7, 14, 21 and 28 days). The variables of yield, weight loss, protein, pH, color, water retention capacity (CRA) and texture profile were analyzed. The results showed that the addition of 20 U/g improved performance (23%), but also increased weight loss (33.13%), possibly due to lower CRA. In contrast, 10 U/g offered an optimal balance between water retention, protein content, and textural firmness, especially between days 14 and 28 of storage. It is concluded that the TG enzyme significantly influences ($p < 0.05$) the quality of fresh cheese, and it is recommended to explore future formulations that combine enzymes or evaluate different storage conditions to optimize their technological application.

Keywords: Transglutaminase, physicochemical properties, fresh cheese

1. INTRODUCCIÓN

La leche y sus derivados han sido utilizados como alimentos debido a su elevado valor nutritivo. Dentro de estos, el queso fresco se destaca como un producto popular en Latinoamérica, caracterizado por su sabor suave, ligeramente salado y una textura desmenuzable (Gadotti et al. 2020). Este producto se obtiene mediante la coagulación de la leche, proceso que puede realizarse empleando cuajo o a través de la acidificación directa. Desde una perspectiva fisicoquímica, el queso se considera un sistema tridimensional tipo gel, compuesto principalmente por caseína, la cual forma un complejo de caseinato fosfato cálcico que retiene glóbulos de grasa, agua, lactosa, proteínas solubles, vitaminas y otras sustancias presentes en la leche (Menéndez 2018).

No obstante, el queso fresco enfrenta retos importantes en cuanto a su estabilidad y calidad. A menudo, propiedades como la firmeza y la retención de agua no son consistentes debido a factores como las variaciones en el proceso de coagulación, el pH de la leche y la concentración de caseína (Tornadijo et al. 1998). Estas limitaciones tecnológicas impactan negativamente en la vida útil del producto y su aceptación en el mercado, subrayando la necesidad de innovación que permitan mejorar la producción y calidad de este tipo de queso.

La aplicación de herramientas biotecnológicas puede ayudar a solventar los problemas mencionados anteriormente. La transglutaminasa es una enzima presente en diversos organismos, incluyendo tejidos animales, vegetales y microorganismos. Su principal función es entrelazar proteínas mediante la formación de enlaces covalentes entre residuos de lisina y glutamina. Este entrecruzamiento modifica las propiedades de las proteínas, mejorando su capacidad de gelificación, estabilidad térmica y retención de agua, entre otras (Vasić et al. 2023). La transglutaminasa ha encontrado aplicaciones en productos como surimi (Zhong et al. 2023), carnes (Yang y

Zhang 2019), pastas secas (Ramos et al. 2023), productos lácteos (Taghi et al. 2018) y panificados (Amante et al. 2020), debido a su capacidad para mejorar la firmeza, elasticidad, viscosidad, retención al calor y retención de agua a través de su reacción enzimática (García et al. 2019).

Durante la transformación de la leche en queso, las caseínas desarrollan una red proteica denominada coágulo o gel, cuya formación tiene dos etapas, la enzimática en la que el cuajo hidroliza las κ -caseínas desestabilizando las micelas, y una fase de coagulación en la que dichas micelas se agregan formando la red tridimensional que retiene agua y grasa, dando lugar al coágulo (Taghi et al. 2018). Este proceso depende de factores como el pH, la concentración de calcio, la cantidad de caseína, el tratamiento térmico aplicado y las proteínas presentes (Britten y Giroux 2022). La transglutaminasa interviene en el proceso de gelificación estableciendo enlaces entre las α -, β - y κ -caseínas, y además facilita el entrecruzamiento entre la β -lactoglobulina y la α -lactoalbúmina en la cuajada, lo que potencialmente mejora las propiedades fisicoquímicas del queso y su rentabilidad (Aaltonen et al. 2014).

Debido al potencial que presenta esta enzima, diversos estudios se han centrado en su impacto sobre las proteínas lácteas y en las propiedades físicas de los geles resultantes de la acidificación (Hovjecki et al. 2021, Han et al. 2019, Jaros et al. 2010). Se ha observado que, en geles formados por cuajo, la acción de esta enzima se ve influenciada por factores de procesamiento como la temperatura de coagulación, la concentración de la enzima y el pH inicial de la leche, lo que resalta la importancia de optimizar dichos parámetros para su aplicación efectiva en la producción de quesos (Özer et al. 2012).

Escobar et al. (2014) investigaron el efecto de la transglutaminasa en el rendimiento del queso Dambo Uruguayo, un queso de mediana humedad elaborado con leche de vaca. Se evaluó con tres concentraciones de

enzima y el momento de adición. Se obtuvo un mayor rendimiento al agregar la enzima junto con el cuajo, logrando un aumento del 6%, en términos de extracto seco, presentaron una mejora significativa con un aumento del 4 – 6% y en cuantos a proteínas se incrementó la recuperación proteica en los meses 3 y 4 del estudio, en comparación con un queso sin la enzima.

La investigación realizada por Salunke y Metzger (2024) sobre la adición de transglutaminasa en la producción de queso mozzarella imitación concluye que este enzima afecta significativamente las propiedades del queso. Los quesos imitaciones elaborados con concentrado de proteína de leche y concentrado de caseína micelar tratados con transglutaminasa mostraron una mayor viscosidad durante la fabricación, lo que sugiere una mejora en la cohesión de las proteínas. Además, la adición de la enzima incrementó la firmeza de los quesos, dando así un producto más sólido (Seyed et al. 2021).

Estos antecedentes destacan la importancia de evaluar la enzima en el mejoramiento de la calidad del queso fresco que se comercializa en Ecuador, para el desarrollo de innovaciones tecnológicas que permitan optimizar procesos productivos.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo principal conocer el efecto de la enzima transglutaminasa en las propiedades fisicoquímicas del queso fresco elaborado a partir de leche de vaca.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación tuvo lugar en la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí en Manta. La leche cruda fue adquirida de la finca Santa Ana (Manabí, Ecuador) y la enzima transglutaminasa con actividad enzimática 100 U/g fue adquirida en Akersunder & WonderLand Herbs. Se trabajó con unidades experimentales de 200 g.

Para la elaboración del queso fresco, se utilizó leche cruda como materia prima. Antes del proceso de pasteurización, se

llevó a cabo la incubación de la enzima transglutaminasa a 30 °C durante 1 hora, aplicando las cantidades estipuladas de acuerdo con el diseño experimental (Tabla 1). Finalizada la incubación, la leche fue pasteurizada a 65 °C durante 15 minutos (Böhme et al. 2020) y, posteriormente, se permitió el enfriamiento hasta alcanzar 38 °C para facilitar la acción del cuajo. La mezcla se dejó reposar durante 40 minutos para promover la formación de la cuajada. Una vez formado el gel, se procedió al corte de la cuajada y al escaldado con agua caliente a 65 °C. Tras eliminar el exceso de suero, se adicionó 2 % de sal con relación al peso inicial de la leche y se realizó el moldeado del queso, aplicando un prensado manual. Finalmente, los quesos fueron almacenados a una temperatura controlada a 10 °C. El desmoldado se efectuó 12 horas después, momento en el cual se llevaron a cabo los análisis correspondientes conforme a los tratamientos establecidos en la Tabla 1.

Diseño experimental

La presente investigación tuvo un diseño experimental bifactorial, completamente al azar. El factor A corresponde a las unidades de actividad enzimática con 3 niveles, mientras que el factor B corresponde al tiempo de almacenamiento a 10 °C con 5 niveles.

Cada combinación de niveles de los factores A y B dio lugar a un tratamiento específico, permitiendo evaluar el comportamiento del producto bajo distintas condiciones de aplicación enzimática y almacenamiento. El Factor A correspondió a las unidades de actividad enzimática de transglutaminasa, con tres niveles definidos: 0 unidades (sin adición de enzima), 10 unidades y 20 unidades, aplicadas en función de la cantidad de proteína presente en la formulación.

Por su parte, el Factor B representó el tiempo de almacenamiento a 10 °C, con cinco niveles: 0 días (día de elaboración), 7 días, 14 días, 21 días y 28 días. Esta

combinación factorial (3×5) dio lugar a un total de 15 tratamientos, cada uno evaluado por triplicado, sumando así 45 unidades experimentales.

Las variables dependientes analizadas fueron: rendimiento, perfil de textura, pérdida de peso, capacidad de retención de agua, color, contenido de proteína y pH. Estas variables permitieron evaluar integralmente los efectos de la aplicación

Tabla 1. Formulación de los tratamientos

Trat.	Simbología	Descripción
T1	A1B1	0 U en el día 0.
T2	A1B2	0 U después de 7 días de almacenamiento.
T3	A1B3	0 U después de 14 días de almacenamiento.
T4	A1B4	0 U después de 21 días de almacenamiento.
T5	A1B5	0 U después de 28 días de almacenamiento.
T6	A2B1	10 U en el día 0.
T7	A2B2	10 U después de 7 días de almacenamiento.
T8	A2B3	10 U después de 14 días de almacenamiento.
T9	A2B4	10 U después de 21 días de almacenamiento.
T10	A2B5	10 U después de 28 días de almacenamiento.
T11	A3B1	20 U en el día 0.
T12	A3B2	20 U después de 7 días de almacenamiento.

enzimática y del almacenamiento sobre la calidad tecnológica, nutricional y fisicoquímica del producto.

Cabe recalcar que por cada tratamiento se realizó análisis por triplicado, teniendo de este modo un total de 45 unidades experimentales.

A continuación, en la Tabla 1 se muestra los tratamientos realizados con las combinaciones de las variables de estudio.

T13	A3B3	20 U después de 14 días de almacenamiento.
T14	A3B4	20 U después de 21 días de almacenamiento.
T15	A3B5	20 U después de 28 días de almacenamiento.

Nota. Elaborado por autor propio.

Análisis fisicoquímicos

• Rendimiento

Se determinó el rendimiento del queso en base al peso del queso preparado en relación con el peso de la leche utilizada. Para conocer el peso se usó una báscula de mesa electrónica (CAS Weighing). El rendimiento en porcentaje se determinó con la Ecuación 1.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{peso del queso (g)}}{\text{peso de la leche (g)}} * 100$$

• Perfil de textura

El perfil de textura de las muestras de queso se midió con el analizador de textura (Shimadzu EZLX, Japones). Se realizó con una celda de carga de 500 N y una sonda cilíndrica. La velocidad previa a 1.0 mm/s, la velocidad de prueba fue de 5 s. Se determinó la cohesividad, gomosidad, elasticidad, adhesividad y masticabilidad (Ceren 2023).

• Pérdida de peso

La pérdida de peso se determinó tomando el peso del queso cada 7 días durante 28 días mediante la ecuación 2 empleando una balanza analítica de precisión (SARTORIUS TE2145).

$$PP(\%) = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100$$

En donde P_i corresponde al peso inicial del queso registrado en el día 0, y P_f representa el peso final del queso en el día correspondiente según el diseño experimental (7, 14, 21 o 28 días).

- **Capacidad de retención de agua (CRA)**

La capacidad de retención de agua (CRA) de las muestras se determinó siguiendo la metodología de Ceren (2023) con modificaciones. Se centrifugó 5g de muestra a 4000 rpm durante 30 minutos. La capacidad de retención de agua se calculó mediante la ecuación 3 como se indica a continuación.

$$CRA(\%) = 1 - \frac{W_c}{W_i} * 100$$

En donde W_c representa el peso del suero liberado luego de la centrifugación y W_i es el peso inicial de la muestra antes del tratamiento.

- **Color**

El color de las muestras de queso se midió en el espacio de color CIELAB, utilizando un colorímetro (CR – 400 Head). Para realizar la lectura se colocó la muestra en un espacio iluminado y se analizó directamente con el equipo (Rossi et al. 2024).

En donde, L^* se refiere a la luminosidad, a^* representa las coordenadas rojo/verde (+a indica rojo, -a indica verde), y b^* corresponde a las coordenadas amarillo/azul (+b indica amarillo, -b indica azul), permitiendo así una evaluación objetiva y cuantitativa del color del queso.

- **Proteína**

El contenido de proteína fue medido mediante el método de Kjeldahl siguiendo la metodología de la AOAC Ed. 22, 2023; 2001.11 NTE INEN 465:1980.

- **pH**

El pH se midió con un pH – metro digital (Milwaukee pH600, Romania). Se preparó una solución con 10 g del queso diluido en 100 ml de agua destilada. Luego para la lectura se colocó el pH – metro directamente en la solución registrando el valor de pH obtenido.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza al 5% (Tabla 2). En caso de existir diferencia significativa entre las muestras se realizó un análisis de comparación de medidas de Tukey ($p < 0.05$). El análisis estadístico se realizó con la ayuda del software Infostat 2019.

Tabla 2. Análisis de varianza (ANOVA)

F. Variación		G.L.
Total	$(t * r - 1)$	44
Tratamientos	$(t - 1)$	14
Repeticiones	$(r - 1)$	2
Factor A	$(FA - 1)$	2
Factor B	$(FB - 1)$	4
Factor A*B	$(FA * FB)$	15
Error experimental	$(t - 1)(r - 1)$	28

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de la enzima TG en el rendimiento

La adición de transglutaminasa (TG) en la elaboración del queso fresco tuvo un efecto positivo sobre el rendimiento, evidenciándose una relación directamente proporcional entre la concentración enzimática y el rendimiento final del producto. En este estudio, el tratamiento con 20 U obtuvo el mayor porcentaje de

rendimiento (23 %), superando a los tratamientos de 10 U/g (19 %) y al control sin enzima (17 %) (Tabla 3).

Este aumento puede atribuirse a la capacidad de la TG para inducir la formación de enlaces covalentes entre residuos de glutamina y lisina en las proteínas de la leche, lo que genera una red proteica más densa y estable. Esta red reduce la pérdida de sólidos y mejora la retención tanto de agua como de proteínas durante la coagulación y el desuerado (Darwish 2022, García-Gómez et al. 2019).

De forma similar, Escobar et al. (2014) reportaron un incremento en el rendimiento del queso Dambo, pasando de 16,2 % a 21,5 % al aplicar transglutaminasa, atribuido a una mayor compactación de la red de caseínas y mejor retención de humedad. Por su parte, Akal (2023) observó en quesos de suero un aumento progresivo en el rendimiento conforme se incrementaba la dosis enzimática, alcanzando valores cercanos al 25 % con la mayor concentración de enzima utilizada.

El mecanismo común propuesto por estos autores señala que la acción de la TG genera una estructura proteica más cohesionada, con poros más pequeños, lo que disminuye la expulsión del suero durante el prensado. Además, esta estructura mejora la retención de componentes nutritivos, lo que contribuye directamente al aumento del rendimiento (Böhme et al. 2020, Ceren 2023).

Tabla 3. Efecto de la enzima TG en el rendimiento de queso fresco.

Concentración de enzima TG (U)	Rendimiento (%)
0	17
10	19
20	23

Los rendimientos fueron calculados a partir de un único lote de producción para cada concentración de enzima TG

Efecto de la enzima TG en la pérdida de peso

La pérdida de peso representa una variable crítica en la calidad y estabilidad del queso fresco, especialmente durante el almacenamiento. En el presente estudio, se observó que el tratamiento sin adición de transglutaminasa (TG) presentó una pérdida de peso significativamente menor ($p < 0.05$) en comparación con los tratamientos con 10 U y 20 U de TG, especialmente durante los primeros 7 días de almacenamiento (Tabla 4). Este resultado sugiere que, si bien la enzima favoreció una mayor retención inicial de agua, esta no se mantuvo durante el almacenamiento.

Esta tendencia se mantuvo a lo largo del periodo experimental, con valores crecientes de pérdida de peso conforme avanzaron los días. En particular, los tratamientos con 10 U y 20 U mostraron pérdidas acumuladas del 29.35 % y 33.13 % respectivamente al día 28, en contraste con el control que alcanzó solo un 16.28 %. Cabe destacar que, mientras el tratamiento con 10 U tendió a estabilizarse luego del día 21, el tratamiento con 20 U continuó mostrando incrementos significativos, lo que sugiere una mayor sensibilidad a la deshidratación progresiva cuando se utiliza una mayor concentración enzimática.

Aunque diversos estudios han reportado efectos positivos de la TG sobre la retención de humedad en productos lácteos, los resultados obtenidos en este trabajo se contraponen a dicha tendencia. Un ejemplo es el estudio de Darwish (2022) y Ceren (2023), quienes documentaron una menor pérdida de peso en quesos frescos tratados con TG, atribuida a una red proteica más compacta que limitaba la migración de agua. Del mismo modo, Danesh et al. (2018) observaron que la reticulación inducida por TG mejoró la retención de humedad en queso blanco iraní bajo en grasa.

Sin embargo, como señalan Taghi et al. (2018), en algunos casos la intensa reticulación inducida por la TG puede provocar una contracción temprana del gel proteico, especialmente si se aplica en altas concentraciones. Esta contracción genera mayor expulsión de suero y, por tanto, una mayor pérdida de peso.

Probablemente, las concentraciones utilizadas en el presente estudio dieron como resultado un exceso de reticulación enzimática que promovió una matriz proteica demasiado rígida, incapaz de retener el agua durante el almacenamiento.

Tabla 4. Efecto de la enzima TG en la pérdida de peso de queso fresco durante 28 días de almacenamiento

Día	0 U	10 U	20 U
0	0 Aa	0 Aa	0 Aa
7	5.32 ± 1.08 Ba	16.05 ± 1.13 Bb	13.83 ± 2.30 Bb
14	11.76 ± 1.49 Ca	24.15 ± 1.32 Cb	23.30 ± 2.35 Cb
21	13.19 ± 1.41 Ca	29.22 ± 1.75 Db	27.93 ± 3.23 Db
28	16.28 ± 0.81 Da	29.35 ± 1.70 Db	33.13 ± 0.87 Eb

Los resultados corresponden a un solo batch de producción y se expresan como media ± desviación estándar. Letras mayúsculas diferentes en columnas y minúsculas en filas indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Efecto de la enzima TG en la proteína

El contenido de proteína del queso fresco fue afectado significativamente ($p < 0.05$) por la concentración de transglutaminasa (TG) y por el tiempo de almacenamiento (Tabla 5). El tratamiento con 10 U mostró los valores más altos de proteína en todos los días evaluados, alcanzando su punto máximo al día 21 (17.46%), en comparación con los tratamientos de 0 U (12.22%) y 20 U (13.21%), diferencias que fueron estadísticamente significativas ($p < 0.05$). Esto sugiere que la aplicación de TG en dosis moderada potencia la retención de proteínas en la matriz del queso, mientras que una mayor dosis (20 U) no ofreció el mismo efecto, posiblemente debido a una reticulación excesiva.

Razeghi y Yazdanpanah (2020) señalaron un comportamiento similar al utilizar TG en queso blanco, encontrando que concentraciones intermedias generaban una red proteica más eficiente para la retención de sólidos, mientras que dosis elevadas reducían este efecto. Esta observación coincide con nuestros hallazgos, donde el tratamiento con 10 U de TG fue más eficaz

en la retención de proteínas en el queso que 20 U de TG ($p < 0.05$).

De igual forma, Darwish (2022) explicó que la acción de la TG, al formar enlaces covalentes entre residuos de glutamina y lisina, da lugar a una red proteica más estable y densa, lo cual contribuye a una mayor retención de proteínas durante la coagulación. Esto se refleja en el aumento significativo ($p < 0.05$) observado en los tratamientos con TG respecto al control.

En estudios similares, Darnay et al. (2021) demostraron que la TG favorece la estabilización de proteínas solubles en matrices lácteas, lo que puede relacionarse con el aumento sostenido de proteína en el tratamiento con 10 U. Sin embargo, Jaros et al. (2010) advirtieron que una excesiva reticulación puede generar redes demasiado compactas que dificultan la incorporación de proteínas, lo que explicaría los valores más bajos obtenidos con 20 U en los primeros días del ensayo.

Finalmente, se observó una leve disminución del contenido proteico al día

28 en todos los tratamientos, posiblemente por la pérdida de nitrógeno soluble o alteraciones microestructurales con el tiempo. Este comportamiento fue también

descrito por Parra et al. (2020), quienes reportaron una reducción gradual del contenido proteico en quesos almacenados por periodos prolongados.

Tabla 5. Efecto de la enzima TG en el contenido de proteína de queso fresco durante 28 días de almacenamiento.

Día	0 U	10 U	20 U
0	11.22 ± 0.41 Aa	12.19 ± 0.36 Ab	10.62 ± 0.08 Aa
7	12.51 ± 0.69 Bb	16.49 ± 0.44 Cc	11.15 ± 0.03 Aba
14	12.49 ± 0.50 Bb	15.01 ± 0.22 Bc	11.67 ± 0.08 Ba
21	12.22 ± 0.38 Ba	17.46 ± 0.54 Dc	13.21 ± 0.34 Cb
28	11.44 ± 0.39 Aa	15.28 ± 0.34 Bc	13.29 ± 0.57 Cb

Los resultados corresponden a un solo batch de producción y se expresan como media ± desviación estándar de triplicados (n=3). Letras mayúsculas diferentes en columnas y minúsculas en filas indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Efecto de la enzima TG en el pH

El comportamiento del pH del queso fresco varió de manera estadísticamente significativa ($p < 0.05$) entre tratamientos a lo largo de los 28 días de almacenamiento (Tabla 6). El grupo tratado con 10 U de TG presentó el mayor descenso, alcanzando un pH final de 5.97, mientras que el grupo con 20 U se mantuvo más estable con 6.50, y el grupo control (0 U) presentó el valor más alto al finalizar, con 6.87.

Durante los primeros 7 días, el tratamiento con 10 U pasó de 6.60 a 6.73, y aunque inicialmente aumentó, posteriormente mostró una caída progresiva del pH, lo que indica una posible mayor actividad fermentativa o acumulación de ácidos orgánicos. En cambio, el tratamiento con 20 U partió de 6.83 y se mantuvo relativamente constante hasta el día 14 (6.67), para luego disminuir ligeramente a 6.50 al día 28. Este patrón sugiere que una mayor concentración de TG podría formar redes proteicas más densas que limiten la difusión de metabolitos y la acción microbiana.

Estos resultados coinciden con los hallazgos de Chen et al. (2020), quienes

señalaron que la acción de la transglutaminasa sobre las caseínas genera una estructura más compacta y menos permeable, lo que puede interferir con la acidificación natural del queso. Por su parte, Seyed et al. (2021) observaron en queso quark fresco una reducción del pH más acentuada con dosis moderadas de TG, lo que respalda el comportamiento del tratamiento con 10 U en este estudio.

Además, Velazquez-Dominguez et al. (2023) explican que la reticulación excesiva promovida por TG puede modificar la microestructura del queso, reduciendo la disponibilidad de agua libre y dificultando la movilidad de bacterias y enzimas responsables de la acidificación. Este fenómeno es coherente con la mayor estabilidad observada en el tratamiento con 20 U. De tal modo que la adición de transglutaminasa afectó de forma diferencial la evolución del pH en el queso fresco, evidenciando que dosis más altas tienden a preservar la estabilidad del pH, mientras que dosis intermedias (10 U) promovieron una reducción más intensa del pH (hasta 5.97, $p < 0.05$) durante el almacenamiento.

Tabla 6. Efecto de la enzima TG en el pH de queso fresco almacenado durante 28 días de almacenamiento

Día	0 U	10 U	20 U
0	6.67 ± 0.06 Ba	6.60 ± 0.17 Ca	6.83 ± 0.06 Ca
7	6.30 ± 0.10 Aa	6.73 ± 0.06 Cb	6.77 ± 0.06 BCb
14	6.73 ± 0.06 Bb	6.27 ± 0.06 Ba	6.67 ± 0.12 Bb
21	6.43 ± 0.06 Aa	6.20 ± 0.10 Aba	6.37 ± 0.06 Aa
28	6.87 ± 0.06 Bc	5.97 ± 0.06 Aa	6.50 ± 0.10 Ab

Los resultados corresponden a un solo batch de producción y se expresan como media ± desviación estándar de triplicados (n=3). Letras mayúsculas diferentes en columnas y minúsculas en filas indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Efecto de la enzima TG en la capacidad de retención de agua (CRA)

La capacidad de retención de agua (CRA) mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos y a lo largo del período de almacenamiento (Tabla 7). En el día 0, el tratamiento control (0 U) presentó la mayor CRA (77%), en comparación con los tratamientos con 10 U (69%) y 20 U (71%). No obstante, esta tendencia se modificó con el tiempo de almacenamiento.

A partir del día 14, el tratamiento con 10 U evidenció un incremento sostenido en la CRA, alcanzando un 84%, significativamente superior al control (77%) y al tratamiento con 20 U (69%). Esta mayor retención se mantuvo hasta el día 28, donde el tratamiento con 10 U conservó un 83% de CRA, superando nuevamente al control (75%) y al tratamiento con 20 U (76%).

Este comportamiento sugiere que la dosis de 10 U favorece la formación de una red proteica más estable y elástica, capaz de retener agua de forma más eficiente. De acuerdo con Akal (2023), concentraciones moderadas de transglutaminasa permiten una reticulación adecuada entre proteínas, mejorando la estructura del gel sin afectar negativamente su hidratación. Por su parte, O'Sullivan et al. (2022) destacan que la TG promueve la formación de enlaces

covalentes que fortalecen la matriz proteica, reduciendo la pérdida de humedad.

En contraste, el tratamiento con 20 U mostró una caída abrupta en la CRA el día 7 (57%), lo que podría atribuirse a una excesiva formación de enlaces cruzados. Según Böhme et al. (2020), una sobredosificación de TG puede provocar la contracción de la red proteica y la expulsión de suero, disminuyendo la capacidad del gel para retener agua. Este efecto fue igualmente descrito por Hovjecki et al. (2021) en productos lácteos fermentados con altas dosis de TG. Esta menor CRA puede reflejarse en una mayor pérdida de peso del producto, lo cual es relevante desde el punto de vista tecnológico y comercial, ya que afecta el rendimiento y la calidad percibida del queso fresco.

En resumen, la dosis de 10 U de transglutaminasa demostró ser la más efectiva para mejorar la capacidad de retención de agua, especialmente entre los días 14 y 28, validando su potencial como aditivo funcional. Por el contrario, el uso excesivo de la enzima (20 U) puede comprometer esta propiedad y generar pérdida de humedad, con impactos directos en el peso final del producto y su aceptación por parte del consumidor.

Tabla 7. Efecto de la enzima TG en la capacidad de retención de agua (CRA) de queso fresco durante 28 días de almacenamiento

%CRA (Capacidad de retención de agua)			
DIA	0 U/g	10 U/g	20 U/g
0	77±1.15 ABa	69±3.06 Aa	71±11.72 BCa
7	73±2.31 Ab	68±4 Ab	57±1.15 Aa
14	77±4.16 ABb	84±3.46 Bc	69±1.15 Ba
21	80±2 Ba	79±1.15 Ba	75±2.31 Ca
28	75±1.15 ABa	83±1.15 Bb	76±2 Ca

Los resultados corresponden a un solo batch de producción y se expresan como media± desviación estándar de triplicados (n=3). Letras mayúsculas diferentes en columnas y minúsculas en filas indican diferencias significativas ($p<0.05$).

Efecto de la enzima TG en el color

Se observaron diferencias significativas ($p<0.05$) en los parámetros de color L^* , a^* y b^* entre los tratamientos con distintas concentraciones de transglutaminasa (TG) y durante los diferentes tiempos de almacenamiento (Tabla 8). En términos de luminosidad (L^*), el tratamiento con 20 U mostró consistentemente valores más altos (hasta 94.16 al día 0 y 93.6 al día 28), indicando que el queso tratado con mayor concentración de TG mantuvo una apariencia más clara durante todo el periodo de almacenamiento. En contraste, el tratamiento con 10 U presentó una reducción significativa en la luminosidad al día 7 (88.44), lo que puede sugerir una mayor opacidad o cambios en la superficie del queso, mientras que el control (0 U) mantuvo valores intermedios sin cambios bruscos.

Este efecto en la luminosidad puede estar asociado a las modificaciones estructurales provocadas por la TG en la matriz proteica del queso. La enzima cataliza enlaces isopeptídicos entre proteínas, principalmente caseínas, lo que genera una red proteica más densa y compacta (García-Gómez et al., 2019). Esta red compacta puede alterar la forma en que la luz se dispersa y refleja en la superficie del queso, incrementando la claridad (mayor L^*) en concentraciones más elevadas de TG. Sin embargo, en concentraciones intermedias

(10 U), la estructura puede presentar heterogeneidades que favorecen la dispersión irregular de luz, disminuyendo la luminosidad momentáneamente, especialmente en fases tempranas del almacenamiento (Chen et al., 2020).

En cuanto al parámetro a^* (que indica la tonalidad rojo-verde), los valores negativos reflejan predominancia de tonalidades verdes en los quesos. Los tratamientos con TG mostraron diferencias significativas ($p<0.05$) con respecto al control, donde el valor menos negativo de a^* en 10 U (-1.55 al día 7) indica un ligero desplazamiento hacia tonos menos verdes o más rojizos en comparación con 0 y 20 U. Este fenómeno podría estar relacionado con cambios en la microestructura y retención de pigmentos o compuestos naturales presentes en la leche o generados durante el procesamiento, los cuales pueden interaccionar con la red proteica modificada por TG (Santoso et al., 2024).

Respecto al parámetro b^* (amarillo-azul), el control mostró valores significativamente más altos (18.24 al día 0), lo que sugiere una tonalidad más amarilla en comparación con los tratamientos con TG (14.37 y 14.49 para 10 y 20 U, respectivamente). Esta reducción en la intensidad del color amarillo en los tratamientos con TG puede explicarse por la interacción de la enzima con los

compuestos responsables del color, como los carotenoides y riboflavina, que son solubles en la fase proteica (Razeghi y Yazdanpanah, 2020). La formación de enlaces cruzados puede encapsular o modificar la disponibilidad de estos pigmentos, disminuyendo la percepción del amarillo en el queso.

Además, la evolución del color durante el almacenamiento indica que la red proteica modificada por TG puede influir en la estabilidad cromática del queso. Estudios como los de Taghi et al. (2018) y García-Gómez et al. (2019) han mostrado que la reticulación inducida por TG no solo afecta la textura, sino también la capacidad de

retener pigmentos y compuestos volátiles que contribuyen a las características visuales y sensoriales del queso.

Se observa que la aplicación de la enzima transglutaminasa genera cambios significativos ($p < 0.05$) en los parámetros de color del queso fresco, principalmente en la luminosidad y tonalidad amarilla, debido a la modificación de la estructura proteica y la interacción con pigmentos. Estos cambios son dependientes de la concentración de TG y el tiempo de almacenamiento, y deben ser considerados para optimizar la calidad visual y aceptación del producto final.

Tabla 8. Efecto de la enzima TG en el color del queso fresco durante 28 días de almacenado.

		0 U	10 U	20 U
Día 0	L	93.19 ± 0.5 Aab	92.9 ± 0.31 Aa	94.16 ± 0.06 Ab
	a	-3.17 ± 0.15 Aa	-2.15 ± 0.08 Ab	-3.31 ± 0.1 Aa
	b	18.24 ± 0.87 Ab	14.37 ± 0.34 Aa	14.49 ± 0.16 Aa
Día 7	L	93.18 ± 0.65 Ab	88.44 ± 1.98 Aa	93 ± 0.19 Ab
	a	-2.78 ± 0.08 Bb	-1.55 ± 0.13 Ac	-3.02 ± 0.12 ABa
	b	17.48 ± 0.47 Aa	17.29 ± 2.24 Aa	15.32 ± 0.58 Aa
Día 14	L	92.25 ± 0.74 Aa	91.12 ± 1.69 Aa	92.36 ± 1.28 Aa
	a	-2.83 ± 0.02 ABa	-1.99 ± 0.37 Aa	-2.97 ± 0.48 ABa
	b	18.38 ± 1.2 Aa	16.44 ± 0.39 Aa	15.88 ± 1.26 Aa
Día 21	L	93.23 ± 0.32 Aa	89.82 ± 3.48 Aa	93.9 ± 0.72 Aa
	a	-2.88 ± 0.15 ABa	-1.54 ± 0.99 Aa	-2.96 ± 0.07 ABa
	b	19.33 ± 0.86 Aa	17.62 ± 2.8 Aa	15.92 ± 0.4 Aa
Día 28	L	92.24 ± 1.15 Aa	90.17 ± 2.44 Aa	93.6 ± 0.64 Aa
	a	-2.79 ± 0.12 Ba	-2.08 ± 0.12 Ab	-2.63 ± 0.23 Ba
	b	19.31 ± 0.63 Aa	18.15 ± 1.21 Aa	16.22 ± 0.81 Aa

Los resultados corresponden a un solo batch de producción y se expresan como media ± desviación estándar de triplicados ($n=3$). Letras mayúsculas diferentes en columnas y minúsculas en filas indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Efecto de la enzima TG en el perfil de textura

La cohesividad del queso fresco presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) tanto entre tratamientos con distintas concentraciones de transglutaminasa (TG) como a lo largo de los días de almacenamiento (Tabla 9). Al inicio (día 0), el queso sin TG (0 U) mostró una

cohesividad de 0.641, significativamente mayor que la cohesividad inicial del tratamiento con 20 U (0.087), que fue notablemente baja. Sin embargo, a partir del día 7 y hasta el día 28, los tratamientos con TG, especialmente el de 20 U, mostraron una marcada mejora en cohesividad, alcanzando valores superiores a 0.58 y estabilizándose cerca de 0.64-0.68. En

contraste, el tratamiento sin TG presentó fluctuaciones en la cohesividad sin un patrón claro de aumento, indicando una estructura menos estable durante el almacenamiento.

El aumento progresivo en cohesividad en los quesos tratados con TG se puede explicar por la continua formación y reorganización de la red proteica durante el almacenamiento, lo que confiere mayor resistencia a la deformación y cohesión interna del producto (Velazquez-Dominguez et al., 2023; García-Gómez et al., 2019; Taghi et al., 2018). Esta propiedad es crucial para la textura, ya que una mayor cohesividad está relacionada con una mejor sensación en boca y mayor resistencia a la fragmentación (Pham et al., 2021).

En estudios similares, Darwish (2022) reportó que la TG mejora la cohesividad en quesos frescos debido a la mayor

reticulación proteica, lo que coincide con los resultados aquí obtenidos, especialmente para el tratamiento de 20 U después de la primera semana. Además, Darnay et al. (2021) observaron que la TG estabiliza la matriz proteica en productos lácteos fermentados, aumentando la cohesividad y mejorando las propiedades reológicas.

Algunos autores también mencionan que esto se debe a que la aplicación de transglutaminasa influye positivamente en la cohesividad del queso fresco, con un efecto más evidente a concentraciones elevadas y tras un periodo de almacenamiento, siendo resultados consistentes con los mecanismos en los que TG fortalece la red proteica, mejorando la textura y calidad del producto final (Aaltonen et al., 2014; Böhme et al., 2020).

Tabla 9. Efecto de la enzima TG en la cohesividad del queso fresco durante 28 días de almacenamiento.

	0 U	10 U	20 U
Día 0	0.641 ± 0.084 Ab	0.513 ± 0.177Ab	0.087 ± 0.02 Aa
Día 7	0.595 ± 0.133 Aa	0.662 ± 0.044 Aa	0.587 ± 0.13 Ba
Día 14	0.421 ± 0.09 Aa	0.646 ± 0.054 Ab	0.688 ± 0.026 Bb
Día 21	0.509 ± 0.132 Aa	0.633 ± 0.061 Aa	0.658 ± 0.117 Ba
Día 28	0.698 ± 0.058 Aa	0.646 ± 0.061 Aa	0.639 ± 0.032 Ba

Los resultados corresponden a un solo batch de producción y se expresan como media± desviación estándar de triplicados (n=3). Letras mayúsculas diferentes en columnas y minúsculas en filas indican diferencias significativas (p<0.05).

La gomosidad presentó diferencias significativas (p<0.05) entre los tratamientos con distintas concentraciones de transglutaminasa (TG) y a lo largo del tiempo de almacenamiento (Tabla 10). Al inicio (día 0), el queso sin TG mostró una gomosidad más alta (6.30) en comparación con los tratamientos con 10 U (3.39) y 20 U (1.46), indicando que la adición de TG reduce la gomosidad inicial, especialmente a concentraciones altas.

Durante el almacenamiento, el tratamiento con 10 U mostró un aumento constante y significativo en gomosidad, alcanzando valores máximos de 22.66 al día 28, lo que indica que la TG favorece la formación de una textura más gomosa con el tiempo. El tratamiento con 20 U también presentó un incremento notable, aunque más gradual, alcanzando 20.88 en el último día, mientras que el control (0 U) mantuvo valores relativamente estables cerca de 10.

Este comportamiento se puede explicar porque la enzima TG cataliza la formación de enlaces cruzados entre las proteínas del queso, especialmente entre las caseínas y proteínas del suero, lo que modifica la matriz proteica para hacerla más resistente y elástica, incrementando la gomosidad (Chen et al., 2020). La formación de esta red proteica más compacta y elástica resulta en un queso con mayor cohesión y textura gomosa.

Resultados similares fueron reportados por Darwish (2022), quien encontró que la transglutaminasa incrementa la gomosidad en quesos frescos permitiendo que el producto mantenga una textura firme y elástica durante el almacenamiento. Además, Taghi et al. (2018) señalaron que la aplicación de TG en productos lácteos induce modificaciones en la textura que incluyen un aumento en la gomosidad,

atribuible a la formación de una red proteica tridimensional más estable.

Finalmente, García-Gómez et al. (2019) demostraron que el efecto de TG en la textura depende de la concentración y el tiempo, lo que concuerda con los resultados observados en este estudio, donde tanto la dosis como el almacenamiento influyen en la evolución de la gomosidad del queso.

Esto indica que la adición de transglutaminasa, especialmente en concentraciones de 10 y 20 U, promovió una estructura proteica más estable y elástica en el queso fresco, lo que resultó en un incremento progresivo y significativo de la gomosidad durante el almacenamiento, consolidando su utilidad tecnológica para mejorar la textura en productos lácteos frescos.

Tabla 10. Efecto de la enzima TG en la gomosidad del queso fresco durante 28 días de almacenamiento.

	0 U	10 U	20 U
Día 0	6.301 ± 0.68 Ac	3.393 ± 0.74 Ab	1.463 ± 0.262 Aa
Día 7	11.5 ± 1.269 Ab	16.982 ± 1.905 Bc	4.221 ± 1.123 Ba
Día 14	10.348 ± 1.252 Aa	20.976 ± 3.147 BCb	8.301 ± 0.857 Ca
Día 21	10.872 ± 3.668 Aa	20.73 ± 0.494 BCb	10.311 ± 1.078 Ca
Día 28	10.7 ± 0.739 Aa	22.664 ± 1.014 Cb	20.883 ± 0.941 Db

Los resultados corresponden a un solo batch de producción y se expresan como media ± desviación estándar de triplicados (n=3). Letras mayúsculas diferentes en columnas y minúsculas en filas indican diferencias significativas (p<0.05).

La elasticidad del queso fresco fue influenciada de manera significativa (p<0.05) por la concentración de transglutaminasa (TG) y el tiempo de almacenamiento (Tabla 11). Al inicio (día 0), el tratamiento con 0 U presentó el mayor valor de elasticidad (0.83), seguido por el tratamiento con 10 U (0.774), mientras que el tratamiento con 20 U registró un valor considerablemente inferior (0.10), lo cual probablemente se deba a un error involuntario.

A partir del día 7 y durante el resto del período de almacenamiento, el tratamiento con 20 U mostró un aumento sostenido en

la elasticidad, alcanzando valores de 0.841 el día 7 y manteniéndose entre 0.74 y 0.85 hasta el día 28, superando en algunos momentos al control. En cambio, el tratamiento sin enzima mostró variaciones menos pronunciadas, manteniéndose entre 0.62 y 0.75.

Este patrón puede explicarse por la acción catalítica progresiva de la transglutaminasa, la cual promueve la formación de enlaces covalentes entre residuos de glutamina y lisina en las proteínas de la leche. Esta reticulación favorece una red más firme y resiliente, aumentando la elasticidad del producto con el tiempo (Jaros et al., 2010;

Darnay et al., 2021). De hecho, Seyed et al. (2021) encontraron resultados similares en queso quark, donde tratamientos con TG superiores a 10 U produjeron estructuras más elásticas tras periodos prolongados de maduración.

Se puede determinar que, aunque la aplicación de 20 U de TG generó una disminución inicial en la elasticidad, con el paso del almacenamiento este tratamiento resultó en una matriz proteica más elástica y estructuralmente estable, evidenciando que el efecto de la enzima se manifiesta de manera más favorable con el tiempo.

Tabla 11. Efecto de la enzima TG en la elasticidad del queso fresco durante 28 días de almacenamiento.

	0 U	10 U	20 U
Día 0	0.83 ± 0.011 Ac	0.774 ± 0.024 Ab	0.1 ± 0.003 Aa
Día 7	0.68 ± 0.157 Aa	0.782 ± 0.075 Aa	0.841 ± 0.02 Ba
Día 14	0.628 ± 0.053 Aa	0.816 ± 0.026 Aa	0.858 ± 0.129Ba
Día 21	0.75 ± 0.002 Aa	0.794 ± 0.039 Aa	0.823 ± 0.051 Ba
Día 28	0.755 ± 0.005 Aa	0.802 ± 0.037 Aa	0.74 ± 0.038 Ba

Los resultados corresponden a un solo batch de producción y se expresan como media± desviación estándar de triplicados (n=3). Letras mayúsculas diferentes en columnas y minúsculas en filas indican diferencias significativas (p<0.05).

La Tabla 12 muestra que no se observaron diferencias estadísticamente significativas (p<0.05) en la adhesividad del queso fresco entre tratamientos en la mayoría de los días evaluados, excepto en los días 14 y 28, donde el tratamiento control (0 U) presentó valores más negativos (-0.086 y -0.081, respectivamente), lo que indica una menor adherencia del producto en comparación con los tratamientos que contenían transglutaminasa. En contraste, los tratamientos con 10 y 20 U de TG mostraron valores de adhesividad cercanos a cero o incluso positivos, lo que sugiere

una mayor interacción del queso con la superficie de contacto durante las mediciones.

La adición de transglutaminasa no generó un impacto estadísticamente claro y sostenido sobre la adhesividad del queso, aunque sí se evidenciaron tendencias hacia una mayor adherencia superficial en tratamientos con enzima, particularmente a partir del día 14. Esta variabilidad puede depender tanto de la dosis enzimática como de las condiciones de almacenamiento y la humedad residual.

Tabla 12. Efecto de la enzima TG en la adhesividad del queso fresco durante 28 días de almacenamiento.

	0 U	10 U	20 U
Día 0	-0.002 ± 0.001 Ba	0.014 ± 0.018 Ba	0.02 ± 0.005 Ba
Día 7	-0.02 ± 0.03 Ba	-0.004 ± 0.001 ABa	0.01 ± 0.021 ABa
Día 14	-0.086 ± 0.015 Aa	-0.008 ± 0.008 ABb	-0.003 ± 0.001 ABb
Día 21	-0.007 ± 0.003 Ba	-0.008 ± 0.006 Aa	-0.007 ± 0.005 Aa
Día 28	-0.081 ± 0.008 Aa	-0.008 ± 0.005 ABb	-0.005 ± 0.001 ABb

Los resultados corresponden a un solo batch de producción y se expresan como media± desviación estándar de triplicados (n=3). Letras mayúsculas diferentes en columnas y minúsculas en filas indican diferencias significativas (p < 0,05).

La Tabla 13 muestra diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en la masticabilidad. El tratamiento con 10 U alcanzó los valores más altos de masticabilidad durante todo el período, incrementando de 11.62 a 18.20 unidades entre el día 0 y el día 28. Por otro lado, el tratamiento con 20 U presentó un patrón de aumento progresivo, pasando de 2.37 el día 0 a 15.50 el día 28, mientras que el control mantuvo valores más bajos y estables, oscilando entre 5.23 y 9.76.

Este incremento en la masticabilidad se puede atribuir al efecto estructurante de la transglutaminasa sobre las proteínas de la leche, las cuales, al ser entrecruzadas, generan una matriz proteica más rígida y elástica (Razeghi y Yazdanpanah 2020). Esta red mejora la resistencia del producto a la deformación, haciendo que se requiera mayor esfuerzo para romperlo durante la masticación. Como lo describen Pham et al. (2021), una estructura más cohesiva favorece un perfil mecánico más firme y elástico, lo cual repercute directamente en una mayor masticabilidad.

Akal (2023) también respalda esta observación al indicar que dosis intermedias de TG tienden a mejorar significativamente esta propiedad, mientras que dosis altas podrían generar efectos no lineales. Esto se observa parcialmente en los datos del tratamiento con 20 U, donde los valores iniciales fueron bajos, pero se incrementaron con el tiempo, posiblemente debido a una maduración más prolongada de la red proteica, que logró consolidarse hacia el final del almacenamiento.

En síntesis, la adición de transglutaminasa afectó positivamente la masticabilidad del queso fresco, particularmente en la dosis de 10 U, que mostró un efecto inmediato y sostenido. El tratamiento con 20 U también mejoró esta propiedad, aunque su efecto fue más progresivo. Estos hallazgos confirman que la acción de la enzima TG puede optimizar la textura masticable del queso fresco, haciendo que su estructura responda de forma más firme y elástica durante el consumo.

Tabla 13. Efecto de la enzima TG en la masticabilidad del queso fresco durante 28 días de almacenamiento.

	0 U	10 U	20 U
Día 0	5.238 ± 0.639 Aa	11.616 ± 1.52 Ab	2.373 ± 1.222 Aa
Día 7	8.345 ± 1.872 Aab	13.335 ± 2.489 ABb	3.561 ± 1.005 Aa
Día 14	7.694 ± 0.495 Aa	17.13 ± 2.748 BCb	7.087 ± 0.915 ABa
Día 21	8.154 ± 2.77 Aa	16.945 ± 1.728 BCb	9.588 ± 2.821 Bab
Día 28	9.765 ± 0.447 Aa	18.203 ± 1.606 Cb	15.498 ± 1.486 Cb

Los resultados corresponden a un solo batch de producción y se expresan como media ± desviación estándar de triplicados ($n=3$). Letras mayúsculas diferentes en columnas y minúsculas en filas indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

4. CONCLUSIÓN

La adición de transglutaminasa (TG) en la elaboración de queso fresco influye notablemente en sus propiedades fisicoquímicas y texturales a lo largo de 28 días de almacenamiento. La dosis de

20 U mostró el mayor rendimiento (23 %), atribuible a la retención inicial de agua y proteínas, aunque también presentó la mayor pérdida de peso al final del periodo (33.13 %). En

contraste, la concentración de 10 U resultó más equilibrada: mejoró la retención proteica (hasta 17.46 % al día 21), mantuvo buena capacidad de retención de agua (64 % al día 14) y presentó un comportamiento estable en parámetros como cohesividad, gomosidad y masticabilidad. El pH disminuyó significativamente ($p < 0,05$) en los tratamientos con enzima, especialmente con 10 U posiblemente por una mayor actividad proteolítica, mientras que el color no mostró variaciones críticas entre tratamientos. En conjunto, los hallazgos indican que la enzima TG, a una dosis intermedia,

permite mejorar la calidad integral del queso fresco sin comprometer su estabilidad durante el almacenamiento. Por tanto, se recomienda su uso como una herramienta tecnológica para optimizar productos lácteos frescos. Para estudios futuros, se sugiere evaluar diferentes combinaciones de TG con otros ingredientes funcionales, así como probar distintos tiempos de maduración y condiciones de conservación para entender mejor la dinámica estructural y microbiológica del queso tratado con esta enzima.

5. REFERENCIAS

- Aaltonen, T; Huuonen, I; Myllärinen, P. 2014. Controlled transglutaminase treatment in Edam cheese-making (en línea). *International Dairy Journal* (Serie 8th NIZO Dairy Conference) 38(2):179-182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2013.12.004>.
- Akal, C. 2023. Producción de queso de suero inducida por transglutaminasa: impacto de diferentes proporciones en el rendimiento, la textura y las propiedades sensoriales (en línea). *Lechería: revista para la mejora de la producción y procesamiento de la leche* 73(4):1-12. Disponible en <https://hrcaak.srce.hr/308263>.
- Amante, PR; Fante, CA; Pires, RL. 2020. Use of Transglutaminase in Bakery Products (en línea). *Journal of Culinary Science & Technology* 18(6):549-559. DOI: <https://doi.org/10.1080/15428052.2019.1681045>.
- Böhme, B; Moritz, B; Wendler, J; Hertel, TC; Ihling, C; Brandt, W; Pietzsch, M. 2020. Enzymatic activity and thermoresistance of improved microbial transglutaminase variants. *Amino acids* 52(2):313-326. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00726-019-02764-9>.
- Britten, M; Giroux, HJ. 2022. Rennet coagulation of heated milk: A review (en línea). *International Dairy Journal* 124:105179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105179>.
- Ceren, H. 2023. Transglutaminase induced whey cheese production: impact of different ratios on yield, texture, and sensory properties (en línea). *Mljekarstvo: časopis za unaprjeđenje proizvodnje i prerade mlijeka* 73(4):225-237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105179>.

- https://doi.org/10.15567/mljeka_rstvo.2023.0402.
- Chen, C-C; Chen, L-Y; Chan, D-S; Chen, B-Y; Tseng, H-W; Hsieh, J-F. 2020. Influencia de la transglutaminasa microbiana en las características fisicoquímicas y de reticulación (en línea). *Moléculas* 25(17):1-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25173992>.
- Danesh, E; Goudarzi, M; Jooyandeh, H. 2018. Transglutaminase-mediated incorporation of whey protein as fat replacer into the formulation of reduced-fat Iranian white cheese: physicochemical, rheological and microstructural characterization (en línea). *Journal of Food Measurement and Characterization* 12(4):2416-2425. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9858-5>.
- Darnay, L; Tóth, A; Csehi, B; Szepessy, A; Horváth, M; Pásztor-Huszár, K; Laczay, P. 2021. El efecto de la transglutaminasa microbiana sobre la viscosidad y la red proteica del kéfir elaborado con leche de vaca (en línea). *Fermentación* 7(4):1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation7040214>.
- Darwish, A. 2022. El efecto de la transglutaminasa en las propiedades fisicoquímicas, microestructurales y organolépticas del queso (en línea). *Revista sobre alimentación, agricultura y sociedad* 10(2):1-9. Disponible en <https://thefutureoffoodjournal.com/manuscript/index.php/FOFJ/article/download/577/287/1721>.
- Escobar, D; Arcia, P; Curutchet, A; Pelaggio, R; Urrestarazu, P; Márquez, R. 2014. Influencia de la transglutaminasa en el rendimiento de la producción de queso Dambo uruguayo (en línea). *INNOTEC* (9):24-30. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=606166714004>.
- Gadotti, C; Forghani, F; Diez-Gonzalez, F. 2020. Evaluación de tratamientos antimicrobianos simples y combinados para inhibir *Salmonella* en queso fresco (en línea). *Food Microbiology* 85:103286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.103286>.
- García-Gómez, B; Vázquez-Odériz, ML; Muñoz-Ferreiro, N; Romero-Rodríguez, MÁ; Vázquez, M. 2019. Interaction between rennet source and transglutaminase in white fresh cheese production: Effect on physicochemical and textural properties (en línea). *LWT* 113:108279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108279>.
- García, B; Romero, Á; Vázquez, L; Muñoz, N; Vázquez, M. 2019. Skim yoghurt with microbial transglutaminase: evaluation of consumer acceptance (en línea). *CyTA - Journal of Food* 17(1):280-287. DOI: <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1577304>.
- Han, Y; Mei, Y; Li, K; Xu, Y; Wang, F. 2019. Effect of transglutaminase on rennet-induced gelation of skim milk and soymilk mixtures (en línea). *Journal of the Science of Food and Agriculture*

- 99(4):1820-1827. DOI:
<https://doi.org/10.1002/jsfa.9375>.
- Hovjecki, M; Miloradovic, Z; Mirkovic, N; Radulovic, A; Pudja, P; Miocinovic, J. 2021. Rheological and textural properties of goat's milk set-type yoghurt as affected by heat treatment, transglutaminase addition and storage (en línea). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 101(14):5898-5906. DOI:
<https://doi.org/10.1002/jsfa.11242>.
- Jaros, D; Jacob, M; Otto, C; Rohm, H. 2010. Excessive cross-linking of caseins by microbial transglutaminase and its impact on physical properties of acidified milk gels (en línea). *International Dairy Journal* 20(5):321-327. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.11.021>.
- Menéndez, T. 2018. Fabricación de quesos en el mundo (en línea). s.l., Ciudad Educativa. Disponible en <https://elibro.net/es/lc/ulead/titulos/36700?prev=as>.
- O'Sullivan, M; Kelly, A; Fox, P. 2022. Influencia del tratamiento con transglutaminasa en algunas propiedades fisicoquímicas de la leche (en línea). *Revista de investigación láctea* 69(3):433-442. DOI:
<https://doi.org/10.1017/s0022029902005617>.
- Özer, B; Guyot, C; Kulozik, U. 2012. Simultaneous use of transglutaminase and rennet in milk coagulation: Effect of initial milk pH and renneting temperature (en línea). *International Dairy Journal* 24(1):1-7. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2011.10.002>.
- Parra, K; Martín, S; Montejano, J; Zárraga, R; Cardador, A. 2020. Evaluación de parámetros biológicos, texturales y fisicoquímicos del queso panela adicionado con probióticos (en línea). *Alimentos* 9(10):1-12. DOI:
<https://doi.org/10.3390/foods9101507>.
- Pham, T-H; Pham, K; Huynh, A; Thi, N; Trinh, K. 2021. Efecto de la transglutaminasa sobre las propiedades de calidad del queso fresco (en línea). *Revista Internacional de Ciencias Avanzadas y Aplicadas* 8(4):44-53. Disponible en <https://www.science-gate.com/IJAAS/Articles/2021/2021-8-4/1021833ijaas202104006.pdf>.
- Ramos, NJ da S; Rocha, EBM; Gusmão, TAS; Nascimento, A; Lisboa, HM; de Gusmão, RP. 2023. Optimizing gluten-free pasta quality: The impacts of transglutaminase concentration and kneading time on cooking properties, nutritional value, and rheological characteristics (en línea). *LWT* 189:115485. DOI:
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115485>.
- Razeghi, F; Yazdanpanah, S. 2020. Efectos de la transglutaminasa libre y encapsulada sobre las propiedades fisicoquímicas, texturales, microbianas, sensoriales y microestructurales del queso blanco (en línea). *Ciencia de los alimentos y nutrición* 8(7):3750-3758. DOI:
<https://doi.org/10.1002/fsn3.166>

3.

- Rossi, S; Gottardi, D; Siroli, L; Giordani, B; Vitali, B; Vannini, L; Patrignani, F; Lanciotti, R. 2024. Functional and biochemical characterization of pre-fermented ingredients obtained by the fermentation of durum wheat by-products (en línea). *Journal of Functional Foods* 116:106136. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jff.2024.106136>.
- Salunke, P; Metzger, LE. 2024. Transglutaminase Crosslinked Milk Protein Concentrate and Micellar Casein Concentrate: Impact on the Functionality of Imitation Mozzarella Cheese Manufactured on a Small Scale Using a Rapid Visco Analyzer (en línea). *Foods* 13(17):2720. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13172720>.
- Seyed, SA; Hesari, J; Peighambardoust, S; Peighambardoust, S. 2021. Efecto de transglutaminasa sobre los parámetros texturales, fisicoquímicos y microbianos del queso quark fresco (en línea). *Revista de ciencia láctea* 104(7):7489-7499. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19781>.
- Taghi, S; Koubaa, M; Barba, F; Greiner, R; George, S; Roohinejad, S. 2018. Recent advances in the application of microbial transglutaminase crosslinking in cheese and ice cream products: A review. *International journal of biological macromolecules* 107(Pt B):2364-2374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.10.115>.
- Tornadijo, ME; Marra, AI; Fontán, MCG; Prieto, B; Caraballo, J. 1998. La calidad de leche destinada a la fabricación de queso: calidad química (en línea). *Ciencia y Tecnología Alimentaria* 2(2):79-91. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72420204>.
- Vasić, K; Knez, Ž; Leitgeb, M. 2023. Transglutaminase in Foods and Biotechnology (en línea). *International Journal of Molecular Sciences* 24(15):12402. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms241512402>.
- Velazquez-Dominguez, A; Hiolle, M; Abdallah, M; Delaplace, G; Peixoto, PPS. 2023. Transglutaminase cross-linking on dairy proteins: Functionalities, patents, and commercial uses (en línea). *International Dairy Journal* 143:105688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105688>.
- Yang, X; Zhang, Y. 2019. Expression of recombinant transglutaminase gene in *Pichia pastoris* and its uses in restructured meat products. *Food chemistry* 291:245-252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.015>.
- Zhong, Q; Wang, Y; Tian, Y; Zhuang, Y; Yang, H. 2023. Effects of anthocyanins and microbial transglutaminase on the physicochemical properties of silver carp surimi gel (en línea). *Journal of Texture Studies* 54(4):541-549. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jtxs.12750>.

