

Azúcar vítreo: La química detrás de la elaboración de caramelos

Glassy Sugar: The Chemistry Behind Candy Making

*Christopher Jasiel Salazar López^a, Laura García Curiel^b,
Jesús Guadalupe Pérez Flores^c, Emmanuel Pérez Escalante^d,
Marisa Rivera Arredondo^e, Juan Ramírez Godínez^f, Nayeli Vélez Rivera^g*

Abstract:

Sugar confections face technological and sensory challenges due to the chemical and physical transformations of sucrose, its interactions with water, and storage conditions. This review synthesizes recent advances in the chemistry, processing, and preservation of hard and soft candies, highlighting key transformations such as sucrose inversion, caramelization, Maillard reactions, and glass transition. Controlling the amorphous state and water activity delays recrystallization and texture loss, whereas excess moisture and light accelerate deterioration. High-barrier packaging and reformulation with sugar alcohols, fibers, and plant-based ingredients improve stability, offering healthier and more sustainable options without compromising sensory quality.

Keywords:

Sucrose, crystallization, caramelization, texture, packaging.

Resumen:

Los dulces de azúcar enfrentan desafíos tecnológicos y sensoriales por las transformaciones químicas y físicas de la sacarosa, sus interacciones con el agua y las condiciones de almacenamiento. Esta revisión sintetiza avances recientes sobre la química, el procesamiento y la conservación de dulces duros y blandos, destacando transformaciones como la inversión de la sacarosa, la caramelización, las reacciones de Maillard y la transición vítrea. Controlar el estado amorfo y la actividad del agua retrasa la recrystallización y la pérdida de textura, mientras que el exceso de humedad y la luz aceleran el deterioro. Los envases de alta barrera y las reformulaciones con alcoholes de azúcar, fibras e ingredientes vegetales mejoran la estabilidad, aportando opciones más saludables y sostenibles sin comprometer la calidad sensorial.

Palabras Clave:

Sacarosa, cristalización, caramelización, textura, envasado.

Introducción

La tecnología del caramelo integra conocimientos químicos, fisicoquímicos y de ingeniería de procesos que determinan la calidad sensorial y la estabilidad de estos productos. Entre las transformaciones más estudiadas se

encuentran la inversión de la sacarosa, la caramelización, la reacción de Maillard y la transición vítrea. La inversión de la sacarosa, inducida por calor o agentes ácidos, genera glucosa y fructosa, modificando el dulzor, la viscosidad y la temperatura de ebullición de la mezcla, lo que impacta directamente en la textura final [1].

a, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0009-0001-1046-6176>, Email: sa383247@uaeh.edu.mx

b, Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0001-8961-2852>, Email: laura.garcia@uaeh.edu.mx

c, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-9654-3469>, Email: jesus_perez@uaeh.edu.mx

d, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-4268-9753>, Email: emmanuel_perez@uaeh.edu.mx

e, Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato, <https://orcid.org/0000-0001-5306-2027>, Email: mriveraa@utsoe.edu.mx

f, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0001-7718-0546>, Email: juan_ramirez@uaeh.edu.mx

g, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0001-6890-2340>, Email: nayeli_vez@uaeh.edu.mx

La caramelización, por su parte, se produce durante el calentamiento de los azúcares y conduce a la formación de compuestos responsables de aroma y color, cuyo perfil depende de la temperatura y el tiempo de procesamiento [2,3]. La reacción de Maillard, que involucra azúcares reductores y aminoácidos, también contribuye a la complejidad aromática y cromática de los caramelos, modulada por la concentración y el tipo de azúcar presente [2,3].

Finalmente, la transición vítrea de los azúcares amorfos determina la textura y la estabilidad, ya que define si el producto se mantiene en estado vítreo o progresa hacia la cristalización, este estado vítreo es necesario para la producción de caramelos [4–6]. El agua y sus interacciones con los sólidos son otro factor decisivo en la estabilidad de los caramelos. La actividad de agua regula la seguridad microbiológica y la conservación, mientras que la higroscopicidad de los ingredientes condiciona la absorción de humedad ambiental y fenómenos como pegajosidad y recristalización [7,8]. La migración de humedad entre diferentes fases o con el entorno acelera la pérdida de textura y modifica el perfil sensorial, siendo un reto central en la prolongación de la vida útil [9,10]. El control de estos fenómenos mediante formulación, adición de espesantes o el empleo de sistemas de envasado con barreras adecuadas ha demostrado mejorar la conservación del producto [11–13].

Los defectos tecnológicos en la elaboración de caramelos, como la cristalización no controlada, los cambios indeseados de textura o la pérdida de color, afectan de manera directa la aceptabilidad del consumidor. La cristalización excesiva compromete la apariencia y la sensación en boca, mientras que la sorción de humedad acelera la degradación durante el almacenamiento [14–16]. La pérdida de textura, asociada a variaciones de temperatura y a la migración de agua, altera la dureza y la masticabilidad [17,18]. Asimismo, las modificaciones cromáticas responden a la estabilidad térmica de los colorantes y a las interacciones con otros ingredientes, lo que ha impulsado el desarrollo de alternativas naturales con mayor resistencia y valor agregado [4,19]. En paralelo, herramientas de inteligencia artificial, como la visión por computadora han comenzado a aplicarse en la detección automatizada de defectos, favoreciendo un control de calidad más preciso [20].

Durante la última década, la reformulación de caramelos con sustitutos de azúcar, polialcoholes, fibras o ingredientes naturales ha adquirido protagonismo como respuesta a demandas de salud y sostenibilidad. El uso de harinas vegetales, polisacáridos o geles naturales

permite modificar la textura e incorporar compuestos bioactivos de interés nutricional [21,22].

Los polialcoholes ofrecen alternativas de bajo índice glucémico y reducido aporte calórico, mientras que los productos libres de azúcar muestran mayor aceptación entre consumidores preocupados por el impacto metabólico de la sacarosa [11,23]. A ello se suma una tendencia hacia formulaciones con etiquetas limpias, aprovechamiento de recursos orgánicos y prácticas sostenibles en el proceso productivo [24,25]. Estas innovaciones han transformado el campo de la confitería, ampliando las posibilidades de formulación y alineando la producción de caramelos con las expectativas de consumidores y la industria alimentaria.

La investigación sobre el caramelo abarca un amplio espectro que va desde las transformaciones químicas de los azúcares hasta los desafíos de estabilidad, los defectos de calidad y la reformulación. No obstante, gran parte de este conocimiento permanece disperso en estudios altamente especializados, lo que limita su integración y aplicación tanto en ámbitos académicos como productivos. En este sentido, una revisión narrativa que reúna los aportes recientes permite articular con mayor claridad los fundamentos científicos y los avances tecnológicos del área, favoreciendo su uso en la enseñanza, así como en el diseño, optimización y control de procesos dentro de la confitería.

Con base en lo anterior, el objetivo de esta contribución es sintetizar la literatura publicada en la última década relativa a los fenómenos químicos, fisicoquímicos y tecnológicos implicados en la elaboración de caramelos. Para ello, se presenta una revisión que organiza y contrasta la información disponible sobre las transformaciones de los azúcares, la interacción con el agua, los defectos de calidad, la vida útil y las recientes tendencias de reformulación. El propósito es ofrecer un panorama actualizado que facilite la enseñanza, impulse la innovación en la industria y oriente el desarrollo de productos con mejores niveles de calidad, estabilidad y aceptación.

Estado amorfo y estado cristalino de la sacarosa

La sacarosa puede presentarse en dos estados físicos con propiedades contrastantes: el cristalino, caracterizado por una red molecular ordenada y estable, y el amorfo, definido por un arreglo desordenado que carece de periodicidad. Como su nombre puede sugerir, el estado vítreo es aquel que formará sólidos amorfos similares a los de un vidrio [26].

El procesamiento de los caramelos está diseñado para obtener el producto en el estado vítreo de la sacarosa, ya que se considera como un sistema estable cinéticamente y con baja movilidad molecular [27]. Esta diferencia estructural condiciona su comportamiento en matrices alimentarias, en particular en los productos de confitería, donde la estabilidad, la textura y la vida útil dependen en gran medida de la proporción relativa de cada fase [28,29].

La Figura 1 muestra la estructura química de la molécula de sacarosa y sus representaciones en estado cristalino y en estado vítreo, ilustrando el contraste entre la organización geométrica de los cristales y la disposición irregular propia de la fase amorfa.

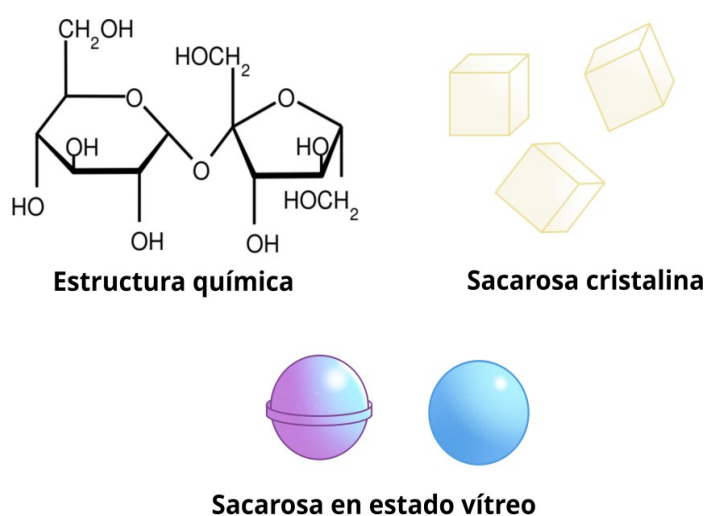


Figura 1. Representación de la sacarosa en diferentes estados físicos

El estado cristalino se asocia con baja higroscopicidad, solubilidad definida y texturas duras y quebradizas, rasgos valorados en caramelos sólidos. No obstante, su tendencia a recrystalizar durante el almacenamiento puede producir gránulos perceptibles que afectan la aceptabilidad sensorial [30,31]. El azúcar cristalino se caracteriza por su solubilidad lenta, menor capacidad de retención de agua y mayor estabilidad química, además de conferir dureza y fragilidad a los productos [32].

Por otro lado, la sacarosa en estado amorfo presenta mayor solubilidad y velocidad de disolución, lo que intensifica la percepción del dulzor y permite elaborar productos más suaves o masticables. Este estado aporta una textura blanda y una rápida disolución, pero su carácter desordenado lo hace más susceptible a la absorción de humedad y a la pérdida de estabilidad durante la vida útil [29,33,34].

El análisis de estas formas se ha apoyado en técnicas como la calorimetría diferencial de barrido, utilizada para identificar la transición vítrea y los puntos de fusión, y la resonancia magnética nuclear de baja resolución, aplicada para monitorear movilidad molecular y contenido de agua. Estos métodos han permitido relacionar el estado físico de la sacarosa con su desempeño tecnológico en confitería y han mostrado cómo parámetros como la temperatura de transición vítrea (T_g) determinan la estabilidad frente a la cristalización [15,35].

En confitería, el control del equilibrio entre fases amorfas y cristalinas constituye una estrategia tecnológica para ajustar la textura, la apariencia y la conservación. La incorporación de jarabes de glucosa o de trehalosa contribuye a retrasar la cristalización, manteniendo matrices vítreas estables y evitando defectos como la granulosis [36,37]. El caramelo suele presentar una fase continua de azúcar amorfo en la que se dispersan sólidos lácteos con proteína y glóbulos de grasa; sin embargo, la adición de sacarosa cristalina interrumpe esta continuidad y genera productos con textura quebradiza o granulada, descrita como short texture, como ocurre en los caramelos cristalizados tipo fudge [38]. En caramelos macizos, una fracción cristalina adecuada asegura firmeza y brillo, mientras que en productos blandos o gomosos el predominio de la fase amorfa favorece la masticabilidad y la uniformidad de la textura [14,39].

La comprensión de estas transiciones ha dado lugar a estrategias de reformulación que buscan prolongar la estabilidad sin comprometer la experiencia sensorial. Entre ellas destacan la cocrystalización con otros azúcares o compuestos bioactivos, que permite modificar la higroscopicidad y las características de disolución, así como el control de la actividad de agua durante el almacenamiento para preservar la matriz vítrea [40,41]. La evidencia disponible confirma que controlar el estado físico de la sacarosa constituye una estrategia central en la elaboración de caramelos.

Transición vítrea

La transición vítrea (T_g) es un cambio térmico característico de materiales amorfos, como los azúcares, en el que el sistema pasa de un estado rígido y quebradizo a otro con mayor movilidad molecular y comportamiento gomoso. Este proceso no ocurre en un punto único, sino en un intervalo de temperaturas en el que disminuye la viscosidad y aumenta la difusión molecular. En el caso de los caramelos, mantener a la sacarosa y demás azúcares en estado vítreo resulta esencial para obtener una matriz estable que retarde la cristalización y conserve las

propiedades texturales durante el almacenamiento [11,42,43].

El valor de T_g depende de la composición del sistema y de factores externos. La humedad actúa como plastificante y reduce drásticamente la T_g al incrementar la movilidad de las moléculas de azúcar; por cada incremento en el contenido de agua, la temperatura de transición se desplaza hacia valores más bajos, lo que eleva la susceptibilidad a la pegajosidad y la recristalización [44,45]. Factores como la flexibilidad de las cadenas orgánicas, su peso molecular y posibles interacciones entre ellas influyen en la temperatura de transición; asimismo, la presencia de diferentes carbohidratos en una matriz alimentaria puede modificarla [42]. También la incorporación de plastificantes como glicerol o azúcares de bajo peso molecular disminuye T_g , mientras que ingredientes como maltodextrinas o proteínas pueden aumentarla al restringir la movilidad dentro de la matriz [46,47]. Retomando la influencia de los carbohidratos, se ha señalado el papel de los de bajo peso molecular (glucosa, fructosa y sacarosa) como un factor determinante en la estabilidad de los caramelos [48]. De igual manera, las condiciones de procesamiento, como la temperatura y el método de secado, modifican la microestructura y, con ello, la T_g del producto final [49,50].

El control de la transición vítrea es decisivo en la calidad de los caramelos. El ajuste inadecuado de la temperatura durante el procesamiento tiende a afectar atributos como la pegajosidad y la adhesión de los dulces, lo cual se considera un defecto de calidad [51]. Asimismo, almacenar los productos por debajo de la T_g prolonga su vida útil, mientras que hacerlo por encima genera pérdida de dureza, pegajosidad y rechazo por parte del consumidor [14,52]. En caramelos blandos, la relación entre T_g , la composición de azúcares y el contenido de grasa determina la masticabilidad, mientras que en los productos duros condiciona la resistencia mecánica y la estabilidad frente al agrietamiento [36,53].

La comprensión de este fenómeno ha motivado estrategias de reformulación y de envasado orientadas a prolongar la vida útil. La selección de matrices azucaradas con T_g más elevada, el uso de agentes protectores como trehalosa o maltodextrina y la aplicación de empaques con alta barrera a la humedad son prácticas que reducen los cambios indeseados durante el almacenamiento [54,55]. De esta forma, la transición vítrea no solo explica la estabilidad física de los caramelos, sino que constituye un parámetro de control que conecta el diseño de formulaciones con la conservación del producto final.

El diagrama de la Figura 2 muestra la relación entre la temperatura y la movilidad molecular, diferenciando el estado vítreo (rígido, quebradizo y estable), la región de transición (T_g) y el estado gomoso (blando, pegajoso y con mayor movilidad). Esta representación ilustra cómo la posición relativa de la temperatura de almacenamiento respecto a la T_g condiciona la estabilidad, textura y vida útil de los caramelos.

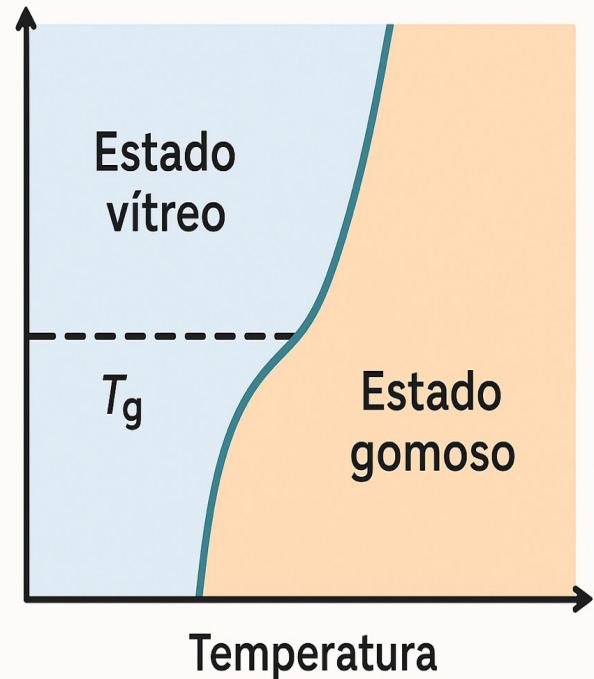


Figura 2. Representación esquemática de la transición vítrea en sistemas azucarados

Temperatura, humedad y formación de la matriz vítrea en caramelos

Durante la cocción de soluciones saturadas de sacarosa, el incremento de temperatura concentra progresivamente los sólidos, reduce el contenido de agua y define etapas que determinan la textura final del caramelo. Estas fases, identificadas tradicionalmente como hilo, bola suave, bola firme, bola dura, punto de quebrado suave y punto de quebrado duro, se distinguen tanto por la temperatura alcanzada como por el comportamiento de la mezcla en pruebas de enfriamiento en agua. El control de estas etapas es decisivo para reproducir texturas específicas en caramelos blandos, duros o intermedios, y para garantizar uniformidad en la producción industrial [16,43]. Estas etapas corresponden a umbrales térmicos bien definidos que, además de modular las propiedades físicas del producto, condicionan su aceptación sensorial por parte del consumidor.

Tal como se muestra en la Tabla 1, cada etapa refleja un equilibrio particular entre concentración de azúcares, contenido de agua y viscosidad de la solución.

Tabla 1. Etapas de cocción del azúcar en la producción de caramelos

Temperatura de ebullición (°C)	Contenido aprox. de agua (%)	Etapas	Descripción
106–112	17.5–27.5	Hilo (thread)	El jarabe forma hilos finos que se disipan rápidamente al caer en agua fría; útil para recubrimientos ligeros y glaseados.
112–116	14–17.5	Bola suave (soft-ball)	Al enfriar en agua, forma una bola blanda que no mantiene su forma; base de caramelos blandos y masas maleables.
118–120	11–12.5	Bola firme (firm-ball)	Genera una bola que conserva forma pero se deforma con facilidad; adecuada para fudges y rellenos plásticos.
121–130	7.5–11	Bola dura (hard-ball)	Produce una bola compacta y ligeramente flexible; empleada en turrónes y toffees con masticabilidad firme.
132–143	4–7	Quebrado suave (soft-crack)	Solidifica en hilos duros pero maleables que pueden estirarse; preámbulo del estado vítreo estable en almacenamiento.
149–154	2–3	Quebrado duro (hard-crack)	Origina hilos frágiles y quebradizos; típico de caramelos duros y paletas, con baja humedad residual y matriz vítreo.

Nota: rangos de temperatura, contenido aproximado de agua y características del producto resultante [16,39,59].

En la fase de hilo, el elevado contenido de humedad produce jarabes fluidos apropiados para glaseados o confituras. Conforme avanza la evaporación hacia las etapas de bola suave y bola firme, se obtienen consistencias plásticas utilizadas en caramelos blandos y fudges, donde la textura depende de la incorporación controlada de aire y grasas [39]. En términos operativos, la etapa de hilo se observa alrededor de 110–113 °C (230–235 °F), cuando el jarabe forma “hilos” al caer; la bola suave aparece cerca de 112–115 °C (234–240 °F) y

da una masa maleable idónea para fudge y caramelos tipo toffee; la bola firme, en 115–120 °C (240–248 °F), proporciona estructuras que conservan la forma con mayor resistencia, adecuadas para rellenos plásticos o productos masticables [16,39].

En la etapa de bola dura, la matriz adquiere una consistencia más estable y densa, característica de productos como el turrón o ciertos tipos de toffee, en los que la elasticidad moderada evita la fractura prematura. La progresión hacia los puntos de quebrado implica una reducción marcada de la humedad y una transición hacia un estado vítreo, en el cual la dureza y fragilidad definen a los caramelos macizos y paletas. Mantener el agua residual por debajo de 3 % en estas etapas asegura la formación de una matriz amorfa estable, resistente al almacenamiento y con menor susceptibilidad a la recrystalización [16,56]. En particular, la bola dura se ubica típicamente entre 120–124 °C (248–256 °F), confiriendo una textura compacta y moldeable; el quebrado suave, entre 124–132 °C (256–270 °F), genera hilos duros, pero aún extensibles, necesarias para taffy; y el quebrado duro, entre 132–149 °C (270–300 °F), produce matrices vítreas frágiles propias de paletas y caramelos duros [15,16,39].

En relación con la influencia en textura y estructura, cada salto térmico reduce la humedad y aumenta la concentración de azúcar, modificando cohesividad, elasticidad y dureza. El tránsito de bola suave a bola dura implica disminuciones de agua que transforman la masticabilidad en rigidez; en caramelos duros, contenidos de humedad superiores a ~2 % deterioran la textura y favorecen pegajosidad y pérdida de integridad [16]. Así, las condiciones de cocción determinan la posición del sistema respecto a la transición vítreo (T_g), con impacto directo en fragilidad, estabilidad frente a cristalización y vida útil [15,56].

De esta manera, la relación entre temperatura de cocción, humedad y estructura resultante constituye un marco de referencia útil tanto para la práctica artesanal como para el control industrial, donde ligeras variaciones en los parámetros térmicos pueden modificar de forma notable la textura y la aceptabilidad del producto final [57,58]. La literatura reciente también documenta aplicaciones formulativas (p. ej., productos sin sacarosa, uso de estabilizantes o extractos vegetales) que aprovechan estos rangos térmicos para alcanzar perfiles específicos de dureza y masticabilidad sin comprometer la matriz vítreo [43,55,58].

Finalmente, la Tabla 1 muestra como el aumento de temperatura eleva la concentración de sólidos disueltos y la temperatura de ebullición (boiling-point elevation),

desplazando el sistema hacia el dominio vítreo; por ello, el control fino de temperatura y humedad determina la reproducibilidad y calidad sensorial [16,43].

Clasificación y elaboración de caramelos

El caramelo macizo, también denominado caramelo duro, constituye un grupo de productos caracterizados por su textura rígida y quebradiza. Estas propiedades derivan de la cocción de soluciones supersaturadas de sacarosa y de glucosa a temperaturas elevadas (Tabla 1), donde el agua se elimina casi por completo y la mezcla adquiere una estructura vítrea amorfa. A diferencia de los caramelos blandos, en los que la incorporación de grasas, lácteos o hidrocoloides favorece una textura flexible, los caramelos macizos mantienen una matriz sólida estable a temperatura ambiente [20,59].

Los caramelos macizos abarcan diferentes subtipos según su composición y proceso de elaboración. Los caramelos duros tradicionales, como los de frutas o menta, se caracterizan por su estructura compacta y resistencia al ablandamiento. Por otro lado, los caramelos blandos, aunque parten de una base similar de azúcares, incorporan jarabes de maíz, grasas u otros ingredientes que disminuyen la rigidez, dando lugar a productos como los toffees. Una tercera categoría corresponde a los caramelos masticables, en los que predominan agentes gelificantes que otorgan elasticidad y resistencia al mordisco, como ocurre en gomas o caramelos con textura de gel [42]. Entre las variantes de caramelo macizo destacan los llamados “rompemuelas”, formados por múltiples capas de caramelo alrededor de un núcleo, habitualmente de chicle, lo que genera una textura especialmente dura [60]. Además, la formulación puede incluir ácidos orgánicos, como el cítrico, que ajustan el pH, intensifican el color y el sabor y promueven la inversión parcial de la sacarosa [43].

En la producción industrial, la mezcla inicial de azúcar, jarabe de glucosa y agua se calienta en recipientes al vapor hasta su completa disolución, para luego transferirse a ollas de cocción al vacío. El proceso térmico alcanza temperaturas de 120 a 150 °C, con un punto de referencia en 145 °C en el que ocurren reacciones de caramelización. El producto se concentra hasta alcanzar un 70–80 % de sólidos y posteriormente se moldea en caliente, alrededor de 85 °C. El enfriamiento se realiza de manera controlada en un rango de 40 a 28 °C, lo que previene la pegajosidad y favorece la estabilidad del producto durante el almacenamiento [61].

Durante la fabricación, variables como el tiempo de cocción, la humedad relativa, la velocidad de enfriamiento

y el pH determinan la textura final. El tiempo óptimo de cocción se sitúa entre 10 y 30 minutos, con un promedio de 20 minutos para obtener un equilibrio entre rigidez y masticabilidad. La concentración y sobresaturación de la solución de sacarosa influyen en la tendencia a cristalizar durante el enfriamiento, razón por la cual se minimiza la agitación para mantener el estado amorfo del azúcar en este tipo de confitería [62].

El contraste con los caramelos blandos se observa en la distinta intensidad de las transformaciones térmicas. En el caramelo macizo predominan la caramelización y las reacciones de Maillard, que confieren una textura dura y quebradiza. En el caramelo blando, por el contrario, la menor severidad del calentamiento, sumada a la presencia de grasas, proteínas lácteas o hidrocoloides como gelatina, agar o carragenina, genera productos maleables, adhesivos y de mayor flexibilidad [63]. Estas diferencias reflejan la influencia conjunta de la formulación y de las condiciones de proceso en la microestructura final y, en consecuencia, en las propiedades sensoriales y mecánicas de cada tipo de caramelo.

Vida útil de los caramelos

La estabilidad de los caramelos durante el almacenamiento depende de factores intrínsecos de la matriz azucarada y de las condiciones externas a las que se expone el producto. La interacción entre humedad, composición de azúcares, pH, temperatura y tipo de envasado determina la conservación de la textura, el color y las propiedades sensoriales a lo largo del tiempo [14,64,65]. La formulación también resulta determinante, ya que los azúcares presentan un carácter higroscópico que favorece la captación de humedad, lo que reduce la crocancia o induce pegajosidad, mientras que la inclusión de frutas deshidratadas o rellenos lácteos incrementa la susceptibilidad al deterioro microbiológico [66].

El contenido de agua y la actividad de agua regulan tanto la seguridad microbiológica como la tendencia a la recrystalización. Niveles superiores al 2–3 % de humedad residual en caramelos duros promueven fenómenos de pegajosidad, pérdida de dureza y aparición de defectos en la superficie [16,43]. En paralelo, el pH influye en la estabilidad microbiológica, ya que valores más ácidos reducen la viabilidad de microorganismos, prolongando la conservación del producto [64]. El control de la temperatura y la humedad relativa se considera decisivo: temperaturas elevadas aceleran la cristalización y alteran la textura, mientras que exposiciones prolongadas a bajas temperaturas inducen endurecimiento de la matriz; por otra parte, la humedad ambiental elevada provoca reblandecimiento y aglomeración, en contraste con ambientes secos que generan rigidez excesiva [14,56,67].

La radiación lumínica, en particular la ultravioleta, constituye otro factor de degradación, ya que induce cambios en pigmentos y compuestos aromáticos, acelerando la pérdida de color e intensidad sensorial en caramelos elaborados con colorantes naturales o sintéticos [68].

La prolongación de la vida útil requiere sistemas de protección que reduzcan la interacción con el ambiente. El uso de películas con alta barrera al vapor de agua y al oxígeno evita procesos de absorción de humedad y oxidación de compuestos aromáticos, manteniendo el perfil sensorial durante periodos prolongados [43]. El envasado en atmósfera modificada se ha mostrado eficaz para limitar reacciones de oxidación y retener compuestos volátiles, mientras que recubrimientos comestibles a base de polisacáridos o proteínas ofrecen una alternativa biodegradable con capacidad de retener humedad y de incorporar antioxidantes naturales [69,70]. Estas innovaciones, además de mejorar la conservación, se alinean con tendencias de sostenibilidad en la industria confitera [13].

La evaluación de la vida útil de caramelos integra diferentes herramientas analíticas. Las pruebas de textura permiten cuantificar dureza, elasticidad y cohesividad, parámetros que cambian a lo largo del almacenamiento y reflejan pérdida de calidad [71]. La medición de la actividad de agua constituye un indicador directo del riesgo de crecimiento microbiano y de las transiciones físicas de la matriz; valores por debajo de 0.6 aseguran estabilidad microbiológica [72]. Asimismo, la determinación de la temperatura de transición vítrea mediante calorimetría diferencial de barrido y resonancia magnética nuclear de baja resolución permite correlacionar la microestructura con la pérdida de estabilidad física [43]. Finalmente, las pruebas aceleradas de vida útil mediante modelos de predicción, como el método Q10, ofrecen estimaciones rápidas del tiempo de conservación en diferentes condiciones de almacenamiento [7,13].

Además de estas técnicas, el análisis de estabilidad puede integrar dimensiones sensoriales, microbiológicas, físicas y químicas, lo que permite anticipar cambios de textura, color, sabor o inocuidad vinculados con variaciones en formulación, humedad o envasado [66]. El uso de diseños de mezcla y modelos predictivos de deterioro ha permitido establecer formulaciones con contenido de azúcares que maximizan la vida útil, identificando la humedad crítica como parámetro limitante y definiendo condiciones óptimas de almacenamiento sin comprometer atributos sensoriales [13].

Los factores relacionados con la formulación, el almacenamiento y el envasado interactúan de manera dinámica, determinando la duración y la estabilidad de los caramelos. La evidencia reciente confirma que controlar parámetros como la actividad de agua, la transición vítrea y la protección frente a la humedad y la luz constituye una estrategia eficaz para prolongar su conservación sin afectar la aceptabilidad sensorial. La Tabla 2 sintetiza estos aspectos al organizar los factores intrínsecos, extrínsecos y tecnológicos, junto con sus mecanismos y referencias, lo que proporciona un marco práctico para comprender cómo cada variable incide en la vida útil y para orientar tanto la investigación como la innovación en confitería.

Tabla 2. Factores que condicionan la vida útil de los caramelos

Categoría	Factor	Efecto sobre la vida útil	Mecanismo implicado	Ref.
Formulación (intrínsecos)	Composición de azúcares	Determina la tendencia a la recristalización y la transición vítrea	Propiedades higroscópicas y movilidad molecular	[16,43]
	Ingredientes añadidos (frutas deshidratadas, rellenos lácteos)	Incrementan el riesgo microbiológico	Aportan agua disponible y nutrientes para microorganismos	[66]
	pH	Afecta la estabilidad microbiológica y la velocidad de inversión de azúcares	Ambientes ácidos reducen la viabilidad microbiana; pH bajo acelera la inversión	[43,64]
Almacenamiento (extrínsecos)	Humedad relativa	Causa pegajosidad, reblandecimiento o rigidez excesiva	Sorción de agua en ambientes húmedos; desecación en ambientes secos	[14,67]
	Temperatura	Acelera cristalización o endurecimiento de la matriz	Influencia sobre Tg y movilidad molecular	[16,56]
	Radiación lumínica	Provoca pérdida de color e intensidad sensorial	Degradación de pigmentos y compuestos aromáticos	[68]
Envasado y conservación (tecnológicos)	Barrera al vapor de agua y oxígeno	Mantiene textura y perfil sensorial	Reducción de sorción de agua y oxidación de volátiles	[43]
	Atmósfera modificada	Prolonga frescura y estabilidad	Limitación de oxidación y pérdida de volátiles	[69]
	Recubrimientos comestibles	Extienden la vida útil e incorporan antioxidantes	Retención de humedad y liberación de compuestos bioactivos	[70]
Evaluación y control	Textura, actividad de agua, Tg	Permiten predecir estabilidad y detectar defectos	Métodos analíticos (DSC, RMN, pruebas de dureza)	[15,72]

Conclusiones y perspectivas

Las transformaciones químicas y físicas de los azúcares, su interacción con el agua y las condiciones de almacenamiento se identificaron como los principales determinantes de la calidad, estabilidad y aceptación de los caramelos. Esta revisión integró evidencia sobre inversión de la sacarosa,

caramelización, reacción de Maillard, transición vítrea y fenómenos de sorción de humedad, así como sobre los defectos asociados a la cristalización y los factores que condicionan la vida útil del producto.

El análisis permitió observar que el control del estado amorfo y de la temperatura de transición vítrea es esencial para retrasar la recristalización y preservar la textura, mientras que la gestión adecuada de la humedad y la protección frente a la luz disminuyen el deterioro del color y las variaciones indeseadas en consistencia. Asimismo, el uso de envases de alta barrera, atmósferas modificadas y recubrimientos comestibles contribuye significativamente a mantener el perfil sensorial. Las estrategias de reformulación mediante polialcoholes, fibras o extractos vegetales ofrecen además alternativas con valor nutricional añadido y mayor sostenibilidad. En conjunto, estos elementos confirman que la estabilidad de los caramelos depende de la interacción dinámica entre formulación, procesamiento y almacenamiento, lo que constituye un marco integral para la enseñanza y la innovación en confitería.

Respecto a las perspectivas, se plantea que futuras investigaciones podrían centrarse en el desarrollo de modelos predictivos avanzados, en la implementación de herramientas de inteligencia artificial para el monitoreo y el control de calidad, y en la incorporación de ingredientes funcionales que respondan a tendencias de salud y sostenibilidad. Estas líneas de trabajo permitirían ampliar las posibilidades de formulación y prolongar la vigencia comercial de los caramelos.

Referencias

- [1] Odinaev M, Akhmedov S, Djalilov N, Ganiev S, Kurbanov F. Preparation of fruit products and analysis of their chemical and organoleptic assessment. E3S Web Conf. 2023;389:03035. doi:10.1051/e3sconf/202338903035.
- [2] Bolkvadze N, Gvidani S, Uridia R, Tserodze N, Kavtaradze N, Tatiashvili L, et al. Formation of taste and aroma compounds by Maillard reaction during processing of food products. Georgian Sci. 2024;6(1). doi:10.52340/gi.2024.06.01.14.
- [3] Geng Y. Mechanism and examples of Maillard reaction. Int J Food Sci Agric. 2024;8(3):54–8. doi:10.26855/ijfsa.2024.03.008.
- [4] Dewi YSK, Putri DM, Fadly D, Rahmalia W. Innovation of goat's milk soft candy with annatto extract (Bixa orellana L.) as natural colorant and antioxidant. Indones Food Sci Technol J. 2023;7(1):9–16. doi:10.22437/iftsj.v7i1.29836.
- [5] Luo W, Tappi S, Wang C, Yu Y, Zhu S, Rocculi P. Study and optimization of high hydrostatic pressure (HHP) to improve mass transfer and quality characteristics of candied green plums (Prunus mume). J Food Process Preserv. 2018;42(12):e13769. doi:10.1111/jfpp.13769.
- [6] Mariana RU, Al Alif FJ, Kristiana RD, Muflihati I, Suhendriani S. Study on making jelly candy from the melon rind. TeknoBUGA J Teknol Busana Dan Boga. 2023;11(1):1–7. doi:10.15294/teknobuga.v11i1.34564.
- [7] Renumarn P, Choosuk N. Influence of packaging and storage conditions on the quality and shelf life of chewy Santol (Kraton-Yee) candies. E3S Web Conf. 2020;141:02002. doi:10.1051/e3sconf/202014102002.
- [8] Zavorokhina N, Shamilov S, Chugunova O, Tarasov A. Increasing the storage capacity of chocolates by reducing the activity of water in ganache fillings. Bull KSAU. 2024;6:188–97. doi:10.36718/1819-4036-2024-6-188-197.
- [9] Chughtaia MF, Hayat I, Rafiq N, Rafiq S, Qayyum S, Rashid Siddiqui N. Effect of sugar concentrations on the shelf life of pear candies. Jammu Kashmir J Agric. 2023;2(1):25–31. doi:10.56810/jkagri.002.01.0025.
- [10] Kondratiev NB, Osipov MV, Kazantsev EV, Bazhenova AE. Use of thickeners to reduce the rate of moisture migration during storage of candies with whipped bodies. Agrar Sci. 2025;398(9):158–64. doi:10.32634/0869-8155-2025-398-09-158-164.
- [11] Efe N, Dawson P. A review: sugar-based confectionery and the importance of ingredients. Eur J Agric Food Sci. 2022;4:1–8. doi:10.24018/ejfood.2022.4.5.552.
- [12] Maringka CT, Lo D, Indrawanto R. Sucrose and glucose reduction using fructo-oligosaccharides and xylitol in pectin jelly candy. BIO Web Conf. 2024;98:06002. doi:10.1051/bioconf/20249806002.
- [13] Spanemberg FEM, Korzenowski AL, Sellitto MA. Effects of sugar composition on shelf life of hard candy: optimization study using D-optimal mixture design of experiments. J Food Process Eng. 2019;42:e13213. doi:10.1111/jfpe.13213.
- [14] Netramai S, Kijchavengkul T, Sompoo P, Kungnimit W. Effect of intrinsic and extrinsic factors on moisture sorption characteristics of hard candy. J Food Process Preserv. 2018;42:e13599. doi:10.1111/jfpp.13599.
- [15] Ozel B, Berk B, Uguz SS, Grunin L, Oztop MH. Correlation of low field nuclear magnetic resonance relaxation with composition and glass transition of hard candies. Front Food Sci Technol. 2024;4:1263380. doi:10.3389/frfst.2024.1263380.
- [16] Souiy Z, Amri Z, Sharif H, Souiy A, Cheraief I, Hamden K, et al. Use of D-optimal mixture design in optimizing formulation of a nutraceutical hard candy. Int J Food Sci. 2023;2023:1–12. doi:10.1155/2023/7510452.
- [17] Kuzu S, Ozel B, Uguz SS, Dogdu S, Marangoz MA, Grunin L, et al. Investigating the crystallinity of hard candies prepared and stored at different temperatures with low field NMR relaxometry. J Sci Food Agric. 2025;105:489–97. doi:10.1002/jsfa.13847.
- [18] Nguyen TBK, Cao HKN, Nguyen TDLH, Doan TPD, Phan TD, Le MT, et al. Improvement of gummy candy structure by gelling ingredients and cooling temperature. Vietnam J Chem. 2025;63:126–37. doi:10.1002/vjch.202400211.
- [19] Dhawan K, Rasane P, Singh J, Kaur S, Kaur D, Avinash H, et al. Effect of spice incorporation on sensory and physicochemical properties of matcha-based hard candy. ACS Omega. 2023;8:29247–52. doi:10.1021/acsomega.3c02574.
- [20] Wang J, Li Z, Chen Q, Ding K, Zhu T, Ni C. Detection and classification of defective hard candies based on image processing and convolutional neural networks. Electronics. 2021;10:2017. doi:10.3390/electronics10162017.

- [21] Qi NA, Hasnan NZN, Basha RK, Alyas ND, et al. Physicochemical properties, bioactive compounds degradation kinetics, and microbiological counts of fortified pomegranate gummy candy during ambient storage. *Ind J Teknol Manaj Agroindustri*. 2023;12:103–17. doi:10.21776/ub.industria.2023.012.02.1.
- [22] Silva ISO, Viana EDS, Soares SE, Chaves RS, Reis RC. Development and characterization of green banana-based fondant icing. *Cienc Agrotecnologia*. 2021;45:e011221. doi:10.1590/1413-7054202145011221.
- [23] Baranova Z, Nikonovich S, Tarasenko N, Baranova E, Kucherova S. New fat ingredients in confectionery for a healthy diet. *E3S Web Conf*. 2021;296:07002. doi:10.1051/e3sconf/202129607002.
- [24] Chystiukhina AO. Research of new trends in the confectionery business. *Bus Inf*. 2024;9:260–6. doi:10.32983/2222-4459-2024-9-260-266.
- [25] Kobets A, Puhach A, Volovyk I, Puhach V. Features of structural improvement of the cooking appliance for confectionery mass. *East-Eur J Enterp Technol*. 2024;1:81–8. doi:10.15587/1729-4061.2024.297409.
- [26] Duarte R, Zurita R, Rojas M, Robalino J. Arte y ciencia en caramelo. In: *IV Seminario Internacional de Gastronomía. Libro de Memorias*. Riobamba: Facultad de Salud Pública, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo; 2019.
- [27] Obas F-L, Wang M, Thomas LC, Schmidt SJ. Characterization of the glass transition of commercial confections selected from each sugar cooking stage. *J Food Meas Charact*. 2024;18:6156–77. doi:10.1007/s11694-024-02637-0.
- [28] Thorat AA, Forny L, Meunier V, Taylor LS, Mauer LJ. Effects of chloride and sulfate salts on the inhibition or promotion of sucrose crystallization in initially amorphous sucrose–salt blends. *J Agric Food Chem*. 2017;65:11259–72. doi:10.1021/acs.jafc.7b04746.
- [29] Voelker AL, Verbeek G, Taylor LS, Mauer LJ. Effects of emulsifiers on the moisture sorption and crystallization of amorphous sucrose lyophiles. *Food Chem X*. 2019;3:100050. doi:10.1016/j.fochx.2019.100050.
- [30] Borji A, Borji F-E, Jourani A. Sugar industry: effect of dextran concentrations on sucrose crystallization in aqueous solutions. *J Eng*. 2019;2019:1–6. doi:10.1155/2019/7987369.
- [31] Jawad R, Elleman C, Martin GP, Royall PG. Crystallisation of freeze-dried sucrose in model mixtures that represent the amorphous sugar matrices present in confectionery. *Food Funct*. 2018;9:4621–34. doi:10.1039/C8FO00729B.
- [32] Voelker AL, Felten C, Taylor LS, Mauer LJ. Effects of polyphenols on crystallization of amorphous sucrose lyophiles. *Food Chem*. 2021;338:128061. doi:10.1016/j.foodchem.2020.128061.
- [33] Khawas P, Deka SC. Encapsulation of natural antioxidant compounds from culinary banana by cocrystallization. *J Food Process Preserv*. 2017;41:e13033. doi:10.1111/jfpp.13033.
- [34] Verma P, Shah NG, Mahajani SM. A novel technique to characterize and quantify crystalline and amorphous matter in complex sugar mixtures. *Food Anal Methods*. 2020;13:2087–101. doi:10.1007/s12161-020-01789-1.
- [35] Bashari M, Lagnika C, Ammar A, Abdalhai MH, Mustafa AB. Impact of dextran biodegradation catalyzed by dextranase enzyme on the crystallization rate of sucrose during sugar manufacturing. *J Food Nutr Res*. 2019;7:402–8. doi:10.12691/jfnr-7-5-10.
- [36] O'Connell K, Hartel RW. Effects of corn syrup, water content and sucrose replacers on sucrose crystallization in starch jellies. *J Food Process Preserv*. 2022;46:e16456. doi:10.1111/jfpp.16456.
- [37] Thorat AA, Forny L, Meunier V, Taylor LS, Mauer LJ. Effects of mono-, di-, and tri-saccharides on the stability and crystallization of amorphous sucrose. *J Food Sci*. 2018;83:2827–39. doi:10.1111/1750-3841.14357.
- [38] Miller E, Hartel RW. Sucrose crystallization in caramel. *J Food Eng*. 2015;153:28–38. doi:10.1016/j.jfoodeng.2014.11.028.
- [39] Toker OS, Atalar I, Kurt A, Palabiyik I, Konar N. Red beet extract powder, gelatin and sucrose interactions in gummy candies. *Foods*. 2025;14:3138. doi:10.3390/foods14173138.
- [40] Chezanoglou E, Goula AM. Properties and stability of encapsulated pomegranate peel extract prepared by co-crystallization. *Appl Sci*. 2023;13:8680. doi:10.3390/app13158680.
- [41] Irigoiti Y, Yamul DK, Navarro AS. Co-crystallized sucrose with propolis extract as a food ingredient: powder characterization and antioxidant stability. *LWT*. 2021;143:111164. doi:10.1016/j.lwt.2021.111164.
- [42] Mosquera LFG, Giraldo SA, Jiménez DG, Velasco DML, Alturo AO. Transición vítrea en alimentos: sistemas binarios agua-carbohidratos. 2014.
- [43] Ozel B, Kuzu S, Marangoz MA, Dogdu S, Morris RH, Oztop MH. Hard candy production and quality parameters: a review. *Open Res Eur*. 2024;4:60. doi:10.12688/openreseurope.16792.1.
- [44] Baysan U, Elmas F, Koç M. Effect of spray drying conditions on physicochemical properties of encapsulated propolis powder. *J Food Process Eng*. 2019;42:e13024. doi:10.1111/jfpe.13024.
- [45] Zäh M, Brandenbusch C, Groël S, Winter G, Sadowski G. Water activity as an indicator for antibody storage stability in lyophilized formulations. *Mol Pharm*. 2025;22:918–26. doi:10.1021/acs.molpharmaceut.4c01106.
- [46] Bogdanova E, Lages S, Phan-Xuan T, Kamal MA, Terry A, Millqvist Fureby A, et al. Lysozyme–sucrose interactions in the solid state: glass transition, denaturation, and the effect of residual water. *Mol Pharm*. 2023;20:4664–75. doi:10.1021/acs.molpharmaceut.3c00403.
- [47] Nurhadi B, Sukri N, Sugandi WK, Widanti AP, Restiani R, Nofliarini Z, et al. Comparison of crystallized coconut sugar produced by traditional method and amorphous coconut sugar formed by two drying methods: vacuum drying and spray drying. *Int J Food Prop*. 2018;21:2339–54. doi:10.1080/10942912.2018.1517781.
- [48] Salamanca-Grosso G, Tapiero-Cuellar JL. Humedad crítica, transición vítrea y propiedades cromáticas de confites duros enriquecidos con aceite esencial de eucalipto y tintura de Hibiscus sabdariffa L. *Rev Colomb Investig Agroindustriales*. 2022;10:13–25. doi:10.23850/24220582.5212.
- [49] Roos YH. Glass transition and re-crystallization phenomena of frozen materials and their effect on frozen food quality. *Foods*. 2021;10:447. doi:10.3390/foods10020447.
- [50] Rusli AA, Mohamad NJ, Mahmood A, Ibrahim NH. Characterisation of vacuum dried honey-sugar powder as affected by drying temperature and sugar carrier ratio for further application in chocolate. *Int Food Res J*. 2024;31:352–67. doi:10.47836/ifjr.31.2.07.
- [51] Nole MC. Determinación de la vida en anaquel de caramelos depositados (caramelos duros) mediante pruebas aceleradas y de campo

- [tesis de Ingeniería]. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina; 2024.
- [52] Mendenhall H, Hartel RW. Effects of fat content and solid fat content on caramel texture attributes. *J Am Oil Chem Soc.* 2016;93(9):1191–9. doi:10.1007/s11746-016-2871-0.
- [53] Miah JH, Griffiths A, McNeill R, Halvorson S, Schenker U, Espinoza-Orias ND, et al. Environmental management of confectionery products: life cycle impacts and improvement strategies. *J Clean Prod.* 2018;177:732–51. doi:10.1016/j.jclepro.2017.12.073.
- [54] Nita N, Rahmayanti Ramli A, Tri Hadi Wibowo Budiardjo G, Muhpidah M. Effect of packaging type on the quality of red ginger soft-candy. *BIO Web Conf.* 2024;96:01033. doi:10.1051/bioconf/20249601033.
- [55] Sarkar P, Bhattacharjee P, Das B. Development of an antioxidant-rich sugar-free plantain candy and assessment of its shelf life in a flexible laminate. *Food Technol Biotechnol.* 2024;62(2):162–76. doi:10.17113/ftb.62.02.24.8141.
- [56] Kawai K, Uneyama I, Ratanasumawong S, Hagura Y, Fukami K. Effect of calcium maltobionate on the glass transition temperature of model and handmade hard candies. *J Appl Glycosci.* 2019;66(2):89–96. doi:10.5458/jag.jag.2019_0005.
- [57] Ghodsi S, Nouri M. Vegan gummy candies with low calorie based on celery (*Apium graveolens*) puree and boswellia gum (*Boswellia thurifera*). *Food Sci Nutr.* 2024;12(10):5785–98. doi:10.1002/fsn3.4190.
- [58] Jeon Y, Oh J, Cho MS. Formulation optimization of sucrose-free hard candy fortified with *Cudrania tricuspidata* extract. *Foods.* 2021;10(10):2464. doi:10.3390/foods10102464.
- [59] Hartel RW, Von Elbe JH, Hofberger R. Hard candy. In: Hartel RW, Von Elbe JH, Hofberger R, editors. *Confectionery Science and Technology*. Cham: Springer International Publishing; 2018. p. 211–44. doi:10.1007/978-3-319-61742-8_8.
- [60] Brand H, Gambon D, Van Dop L, Van Liere L, Veerman E. The erosive potential of jawbreakers, a type of hard candy. *Int J Dent Hyg.* 2010;8(4):308–12. doi:10.1111/j.1601-5037.2010.00450.x.
- [61] Reinheimer MA, Mussati S, Scenna NJ. Influence of product composition and operating conditions on the unsteady behavior of hard candy cooling process. *J Food Eng.* 2010;101(4):409–16. doi:10.1016/j.jfoodeng.2010.07.029.
- [62] Cohen M, Hartel R. Candy texture (sugar confectionery). In: Rosenthal A, Chen J, editors. *Food Texturology: Measurement and Perception of Food Textural Properties*. Cham: Springer International Publishing; 2024. p. 373–91. doi:10.1007/978-3-031-41900-3_18.
- [63] Altan I, Charbonneau P, Valicourt J de. Sugars: soft caramel and sucre à la crème – an undergraduate experiment about sugar crystallization. In: *Handb of Molecular Gastronomy*. Boca Raton: CRC Press; 2021.
- [64] Dinde AB, Joshi PS, Tayade SA, Bondre SV. Evaluation of chemical changes in karonda candy during storage at ambient temperature. *Asian J Hort.* 2020;15(2):26–33. doi:10.15740/HAS/TAJH/15.2/26-33.
- [65] Hadi SR, Prasad VM, Singh YKr. Study and quality evaluation of candy prepared by using ash gourd (*Benincasa hispida*). *Int J Environ Clim Change.* 2022;12(12):529–36. doi:10.9734/ijec/2022/v12i121490.
- [66] Subramaniam P. The stability and shelf life of confectionery products. In: Subramaniam P, editor. *Stability and Shelf Life of Food*. 2nd ed. Cambridge: Woodhead Publishing; 2016. p. 545–73. doi:10.1016/B978-0-08-100435-7.00019-8.
- [67] Ergun R, Lietha R, Hartel RW. Moisture and shelf life in sugar confections. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2010;50(2):162–92. doi:10.1080/10408390802248833.
- [68] Bayline JL, Tucci HM, Miller DW, Roderick KD, Brletic PA. Chemistry of candy: a sweet approach to teaching nonscience majors. *J Chem Educ.* 2018;95(7):1307–15. doi:10.1021/acs.jchemed.7b00739.
- [69] Pratama MuhD, Palupi PJ, Prasetya R, Muhtar M. Karakteristik fisikokimia dan mikrobiologi permen jeli jahe (*Zingiber officinale*) terhadap daya simpan dengan teknik pengemasan berbeda. *J Teknol Agro-Ind.* 2021;8(1):11–24. doi:10.34128/jtai.v8i1.129.
- [70] Raajeswari P, Manivel D, Dhanapal ACTA, Menkinoska M, Pavlovskia G, Helal M, et al. Sustainable biodegradable tapioca starch films enhanced with basil oil, carboxymethyl cellulose, and citric acid for functional food packaging applications. *Front Sustain Food Syst.* 2025;9:1610769. doi:10.3389/fsufs.2025.1610769.
- [71] Basha SJ, Kaur K, Kumar V, Kaur P, Rehal J. Effect of pre-treatments on quality and storage stability of turmeric rhizome candy. *Int J Food Sci Technol.* 2024;59(4):1653–63. doi:10.1111/ijfs.16919.
- [72] Pekdogan Goztok S, Habibzadeh Khiabani A, Toker OS, Palabiyik I, Konar N. Development of healthier gummy candy by substituting glucose syrup with various fruit juice concentrates. *Food Sci Nutr.* 2024;12(12):7864–76. doi:10.1002/fsn3.4389.