

Cristalografía y reología del chocolate para calidad, innovación y sostenibilidad

Crystallography and Rheology of Chocolate for Quality, Innovation and Sustainability

*Jorge David Alonso Cano^a, Jesús Guadalupe Pérez Flores^b, Laura García Curiel^c,
Emmanuel Pérez Escalante^d, José Antonio Sánchez Franco^e,
Juan Ramírez Godínez^f, Nayeli Vélez Rivera^g*

Abstract:

This study analyzes the complexity of chocolate as a food product, focusing on how structural and rheological phenomena determine its quality and consumer acceptance. The objective was to review the crystallography and rheology of chocolate, explaining their study and industrial and sensory relevance. Through a narrative review (2015–2025), advances in processing, analytical techniques, and structural models were synthesized. The importance of cocoa butter polymorphism, particularly the $\beta(V)$ form obtained through tempering, was highlighted for achieving stable gloss and texture. Rheological parameters such as viscosity and yield stress influence flow behavior and sensory perception. Finally, integrating crystallography and rheology is emphasized as key to optimizing chocolate's quality, stability, and innovation.

Keywords:

Polymorphism, tempering, viscosity, sustainability, sensory

Resumen:

Este estudio analiza la complejidad del chocolate como alimento, enfocándose en cómo los fenómenos estructurales y reológicos determinan su calidad y aceptación. Su objetivo fue revisar la cristalografía y la reología del chocolate, explicando su estudio y relevancia industrial y sensorial. Mediante una revisión narrativa (2015–2025), se sintetizaron avances en procesamiento, técnicas analíticas y modelos estructurales. Se destacó la importancia del polimorfismo de la manteca de cacao, especialmente la forma $\beta(V)$ obtenida por templado, para lograr brillo y textura estables. Los parámetros reológicos como la viscosidad y el límite elástico influyen en el flujo y la percepción sensorial. Finalmente, se subraya que integrar cristalografía y reología permite optimizar la calidad, estabilidad e innovación del chocolate.

Palabras Clave:

Polimorfismo, temperado, viscosidad, sostenibilidad, sensorial

a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0009-0000-6671-395X>, Email: al354984@uaeh.edu.mx

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

c Autor de correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0001-8961-2852>, Email: laura.garcia@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 Autónoma del Estado de México, <https://orcid.org/0000-0003-3072-2787>, Email: jasanchezf@uaemex.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_velez@uaeh.edu.mx

Introducción

El chocolate es un producto alimenticio complejo obtenido a partir de granos de cacao que, tras procesos como fermentación, secado, tostado y conchado, integran sólidos de cacao, manteca de cacao, azúcar y en algunos casos leche u otros ingredientes. Su clasificación en chocolate oscuro, con leche y blanco, depende de la proporción relativa de estos componentes, lo que define perfiles sensoriales y nutricionales diversos [1].

Desde su valor ritual en culturas prehispánicas hasta su industrialización en Europa y posterior expansión global, el chocolate ha transitado de símbolo cultural a producto de alto impacto económico y social. Su producción actual sostiene cadenas agroalimentarias internacionales y representa una fuente de ingresos para millones de agricultores en regiones productoras [2–5].

Las propiedades sensoriales del chocolate, tales como sabor, aroma, textura y comportamiento de fusión, resultan de la interacción entre compuestos volátiles y no volátiles, el perfil lipídico de la manteca de cacao y las condiciones de procesamiento. La fermentación y el tostado modifican la composición aromática y definen matices de sabor, mientras que el conchado contribuye a la homogeneidad y a la sensación en boca [6–11]. El tamaño de partícula y la viscosidad determinan la percepción de suavidad o aspereza, y la adición de emulsificantes u otros ingredientes puede modificar la aceptabilidad [12,13]. El patrón de cristalización de la manteca de cacao condiciona la fusión y la cremosidad percibida, aspectos clave en la preferencia del consumidor [14–16]. En paralelo, las innovaciones recientes incluyen el empleo de oleogeles y herramientas como la imagen hiperespectral para optimizar formulaciones y evaluar calidad, junto con el interés creciente en los polifenoles del cacao por su potencial beneficio cardiovascular [17–19].

Dentro de estas etapas, el temperado ocupa un lugar determinante al regular la cristalización de la manteca de cacao mediante un control térmico que promueve la formación de estructuras estables. De ello dependen el brillo, la dureza y la vida útil del chocolate, mientras que un manejo inadecuado favorece la aparición de fat bloom, defecto asociado con pérdida de atractivo visual y menor aceptación del producto [20–22].

La cristalografía de la manteca de cacao ha permitido comprender su comportamiento polimórfico, con al menos seis formas cristalinas posibles. La forma $\beta(V)$ es la más apreciada porque otorga estabilidad y un punto de fusión acorde con la sensación de derretirse en boca. La transición hacia otras formas menos estables puede

producir cambios de textura y pérdida de calidad visual [23–25]. La caracterización mediante técnicas como difracción de rayos X, calorimetría diferencial de barrido o microscopía avanzada ha contribuido a optimizar el control del proceso de cristalización y a reducir defectos durante el almacenamiento [26,27].

La reología complementa la visión estructural al describir el flujo y la deformación del chocolate bajo fuerzas mecánicas. Propiedades como la viscosidad y la distribución del tamaño de partícula condicionan tanto la eficiencia de los procesos industriales como la percepción sensorial del consumidor. Una viscosidad adecuada facilita el moldeado y mejora la sensación de suavidad, mientras que un tamaño de partícula reducido contribuye a un acabado más homogéneo. El control de estas variables durante el refinado y el conchado resulta determinante para mantener la calidad del producto y responder a las expectativas del mercado [28–30].

La cristalografía y la reología representan enfoques complementarios para comprender cómo la microestructura del chocolate determina sus atributos sensoriales y tecnológicos. Por lo que al integrar el conocimiento sobre el comportamiento polimórfico de la manteca de cacao y las propiedades de flujo del sistema, resulta necesario para explicar variaciones en calidad, prevenir defectos y orientar mejoras en los procesos productivos. Este marco analítico facilita la interpretación de fenómenos como el brillo, la firmeza o la fusión en boca y aporta criterios prácticos para la innovación y el control industrial.

De acuerdo con todo lo anterior, el objetivo de esta contribución fue revisar y sintetizar información reciente sobre la cristalografía y la reología del chocolate para entender de manera clara cómo estos procesos influyen en su calidad, estabilidad y aceptación, y así ofrecer un recurso accesible para estudiantes y profesionales.

Cristalografía del chocolate

La cristalografía estudia la organización tridimensional de los cristales y los patrones de difracción que generan, siendo un recurso ampliamente aplicado en química, física, entre otras. En el chocolate, adquiere especial relevancia por el carácter polimórfico de la manteca de cacao, cuya capacidad de formar distintas estructuras cristalinas determina propiedades como brillo, textura, dureza y punto de fusión [23,31,32].

El proceso de cristalización es sensible a variables termodinámicas y cinéticas, entre ellas la composición de los ingredientes, la tasa de enfriamiento y la presencia de

emulsionantes. Agentes estructurantes como oleogeles o mezclas lipídicas modifican el comportamiento de flujo y los atributos texturales del chocolate, mientras que el tamaño y la morfología de las partículas de azúcar inciden en la viscosidad y la sensación en boca [19,33,34]. Estas interacciones explican la necesidad de un control riguroso durante el temperado, ya que de este proceso depende la obtención de microestructuras estables que garanticen la calidad sensorial y la vida útil del producto.

La manteca de cacao puede cristalizar en seis formas polimórficas, denominadas I a VI, con temperaturas de fusión que oscilan entre 17 y 36 °C. Las formas I a IV son inestables y tienden a transformarse hacia estados más ordenados, mientras que la V, obtenida mediante un temperado adecuado, confiere la combinación más apreciada de estabilidad y fusión agradable en boca. La forma VI, de mayor estabilidad termodinámica, suele aparecer con el tiempo a partir de la transición de la V y se asocia con modificaciones en la textura y la pérdida del perfil de fusión nítido, lo que se traduce en defectos como el fat bloom [26,31,35]. Desde un punto de vista microscópico, esta transformación implica la formación de cristales aciculares de mayor tamaño, los cuales generan una superficie rugosa en el chocolate y producen una sensación áspera en boca, características asociadas a la pérdida de calidad sensorial durante el almacenamiento prolongado [31]

Tabla1 . Polimorfismo de la manteca de cacao y sus características principales

Forma	Nomenclatura	Temperatura de fusión	Estabilidad relativa	Observaciones morfológicas
I	γ	~17	Muy inestable	Cristales de corta vida útil, se transforman rápidamente; textura blanda y poco definida.
II	α	~23	Inestable	Superficie poco uniforme, funde rápido; calidad sensorial baja.
III	β_2	~25	Intermedia-inestable	Transición rápida hacia formas más estables; textura quebradiza.
IV	β_1	~27	Metastable	Puede prevalecer si el temperado es deficiente; asociada con fat bloom inicial.
V	β_2	~33	Estable (industrialmente deseada)	Brillo característico, textura firme, fusión nítida a temperatura bucal, sensación cremosa.
VI	β_1	~36	Más estable (termodinámicamente)	Cristales grandes, aciculares; superficie rugosa, textura áspera, pérdida del perfil de fusión típico; asociado a fat bloom en almacenamiento prolongado.

Fuente: Bayés-García *et al* [31]

Para caracterizar estas formas se emplean técnicas como la difracción de rayos X, que permite diferenciar estructuras polimórficas y asociarlas con propiedades de fusión y estabilidad [36]. La microscopía electrónica de barrido ofrece imágenes de la morfología cristalina en la matriz del chocolate y ayuda a explicar variaciones en textura y defectos asociados a cambios de formulación [32,37]. Otros métodos, como la microscopía de luz

polarizada, la espectroscopía de terahercios y la espectrometría ultrasónica, han surgido como alternativas para estudiar dinámicas de cristalización en tiempo real y con menor grado de invasividad [38–40].

La integración de estas técnicas ha permitido comprender cómo factores como el origen del cacao o la duración del conchado influyen en la entalpía de fusión y en la formación de estructuras cristalinas estables [41]. Incluso se han explorado sustitutos lipídicos como geles a base de gelatina o esteroides vegetales, que buscan reducir el contenido calórico del chocolate manteniendo su integridad estructural [6]. Estos avances reflejan la importancia de la cristalografía como herramienta para garantizar calidad y estabilidad, y para el desarrollo de formulaciones innovadoras que respondan a nuevas demandas nutricionales y tecnológicas.

Proceso del temperado de chocolate

El temperado es una etapa indispensable en la elaboración de chocolate, ya que orienta la cristalización de la manteca de cacao hacia formas estables y deseadas [1]. Este procedimiento térmico controlado regula la transición polimórfica y asegura que la grasa adopte principalmente la forma $\beta(V)$, asociada con un brillo uniforme, textura firme, buena resistencia mecánica y un perfil de fusión agradable en boca [23]. Más que un simple cambio de temperatura, el temperado funciona como un filtro que elimina estructuras inestables y dirige la nucleación hacia cristales con mayor estabilidad, reduciendo así el riesgo de defectos como el fat bloom [20,27].

El propósito del temperado va más allá de la apariencia, pues un chocolate correctamente tratado mantiene su microestructura durante el almacenamiento, conserva la dureza y asegura una ruptura nítida. Cuando se produce un error en la curva térmica, aparecen superficies opacas, texturas arenosas y pérdida de homogeneidad [42]. Desde la perspectiva sensorial, la disposición ordenada de cristales estables regula la liberación de compuestos aromáticos y proporciona una sensación cremosa, aspectos que favorecen la aceptación y la palatabilidad del producto [43,44].

El proceso de temperado consiste en una serie de variaciones de temperatura que dependen tanto del tipo de chocolate como de las condiciones establecidas por el productor. Se describen etapas que incluyen el derretimiento completo, el enfriado hasta el punto de cristalización, la nucleación de cristales y el recalentamiento para eliminar las formas inestables [45].

En términos prácticos, el chocolate se calienta a 45–50 °C para fundir todos los cristales y eliminar la memoria térmica de la grasa. Posteriormente, se enfría en un rango de 27–29 °C, lo que induce la formación simultánea de diferentes formas polimórficas. El recalentamiento hasta 31–34 °C permite que predominen los cristales $\beta(V)$, responsables de las propiedades deseadas en el producto final [26,46].

La Figura 1 muestra las curvas de temperado específicas para chocolate negro, con leche y blanco. Aunque el principio general del proceso es el mismo, la composición de cada tipo, particularmente el contenido de sólidos de cacao, manteca de cacao y sólidos lácteos, modifica las temperaturas requeridas en cada etapa y la cinética de cristalización [23,47,48]. El chocolate negro, con mayor proporción de sólidos de cacao, requiere temperaturas más altas de fusión (≈ 50 –55 °C) y recalentamiento (≈ 31 –33 °C), mientras que el chocolate con leche presenta valores intermedios de fusión (≈ 45 –50 °C) y recalentamiento (≈ 30 –31 °C). El chocolate blanco, compuesto principalmente por manteca de cacao, leche y azúcar, alcanza la fusión a temperaturas más bajas (≈ 40 °C) y su recalentamiento óptimo se sitúa en torno a 27–29 °C [19,49].

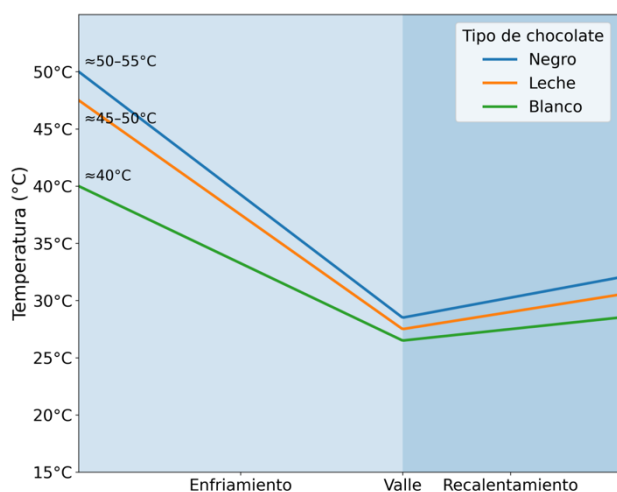


Figura 1. Curvas de temperado de diferentes tipos de chocolate

Estas diferencias se explican por la composición lipídica de la manteca de cacao y el perfil de triacilgliceroles (TAGs), que determinan la estabilidad de las formas polimórficas. La proporción y posición de ácidos grasos como el esteárico (S), palmítico (P) y oleico (O) condiciona la tendencia a formar estructuras más o menos estables, mientras que factores como el origen del cacao, la fermentación y el secado de los granos influyen en la microestructura final [35,50]. Además, los ingredientes de la formulación modifican la cinética de nucleación y

crecimiento cristalino: las partículas de azúcar pueden actuar como sitios de nucleación heterogénea [51], la lecitina acelera la cristalización según su concentración y el método analítico [52], y los lípidos lácteos reducen la temperatura de temperado generando chocolates más suaves [53].

La evaluación mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) ha demostrado que distintas formulaciones alteran los perfiles de fusión y recrystalización, incluyendo las temperaturas de inicio, pico y fin de derretimiento [19]. Ingredientes adicionales como oleogeles o sustitutos de manteca de cacao pueden modificar la cinética de cristalización, afectando textura, estabilidad y resistencia al fat bloom [54,55]. Por ello, cada tipo de chocolate requiere curvas de temperado específicas que optimicen la formación de la fase $\beta(V)$, garanticen estabilidad microestructural y prevengan defectos de apariencia o textura durante el almacenamiento [32,56–58].

Por otro lado, la Figura 2 presenta la curva de enfriamiento representativa de chocolate, mostrando los tramos inicial, intermedio y final, así como los puntos de referencia que guían la cristalización de la manteca de cacao [15]. Las pendientes reflejan la velocidad de pérdida de calor y la consolidación progresiva de los cristales $\beta(V)$ [59], mientras que los rangos de temperatura indicados permiten inducir la nucleación y el crecimiento controlado de estructuras cristalinas, favoreciendo uniformidad superficial y brillo [60]. La estabilidad mecánica también depende de esta consolidación progresiva, y desviaciones respecto a estos perfiles pueden generar fat bloom o comprometer la integridad estructural del chocolate [61,62].

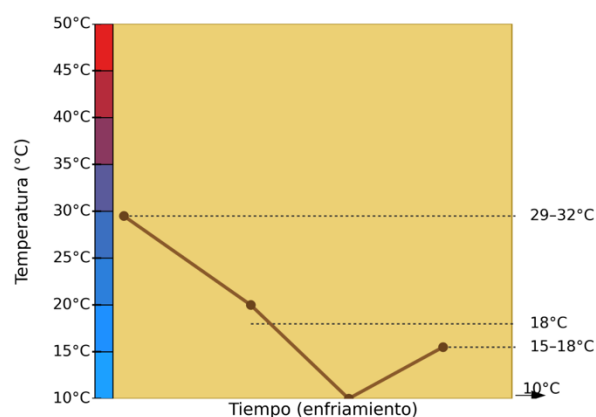


Figura 2. Curva de enfriamiento del chocolate mostrando las variaciones de temperatura y los puntos de referencia para la cristalización de la manteca de cacao

El enfriamiento durante la manufactura determina la disposición final de los cristales de manteca de cacao, modulando la velocidad de nucleación y crecimiento. El control del perfil térmico influye directamente en la textura, firmeza, apariencia y estabilidad sensorial del chocolate, asegurando que las propiedades de ruptura, brillo y liberación de compuestos aromáticos se mantengan durante el almacenamiento [32,59].

En la escala industrial, suele describirse la cristalización en dos fases: una precristalización por temperado, que genera núcleos precursores, y una etapa de enfriamiento variaciones de temperatura modifican la cinética de cristalización y afectan directamente la calidad final. Además de los métodos convencionales, se emplean técnicas de inoculación, que consisten en añadir fragmentos de chocolate sólido al chocolate líquido para inducir la cristalización. Este procedimiento mejora la velocidad de nucleación, extiende la vida útil y reduce el consumo energético.

También se han propuesto alternativas más sofisticadas como la precristalización asistida por ultrasonido, que permite controlar de manera más precisa la nucleación y mejorar la uniformidad del producto [63].

El impacto del temperado en la estructura cristalina se explica por su capacidad de dirigir la transición polimórfica hacia la forma más estable. Factores como la composición lipídica, la presencia de emulsificantes y la precisión en el manejo de los rangos térmicos influyen en la densidad y el tamaño de los cristales en la matriz grasa, con implicaciones directas en la textura, el brillo y la vida útil del chocolate [64,65].

Los métodos de temperado pueden dividirse en artesanales y mecanizados. El temperado manual, habitual en la chocolatería fina, se realiza extendiendo y enfriando la masa sobre superficies frías, con resultados que dependen en gran medida de la destreza del operario. En contraste, los equipos automáticos de temperado continuo, empleados en la industria, permiten un control reproducible y estable de las variables, asegurando uniformidad en grandes volúmenes de producción [20]. A estas alternativas se suman técnicas innovadoras como la siembra con cristales $\beta(V)$ o el uso de ultrasonido, que buscan optimizar la transición hacia la forma estable y minimizar defectos durante el almacenamiento [40,66]. Por lo tanto, el temperado representa el vínculo entre el conocimiento cristalográfico y las propiedades tecnológicas y sensoriales del chocolate. Su correcta ejecución asegura atributos que responden tanto a las expectativas del consumidor como a los requerimientos industriales, mientras que un control

deficiente compromete la estabilidad, la textura y la aceptabilidad del producto.

Reología del chocolate

La reología estudia el flujo y la deformación de los materiales, por lo que es una herramienta esencial para comprender el comportamiento de los alimentos. En el caso del chocolate, la reología permite evaluar cómo responde la masa cuando se aplican fuerzas externas, lo cual se refleja en su textura, consistencia y estabilidad tanto durante el procesamiento como en el consumo [12,67,68].

El comportamiento reológico del chocolate depende principalmente de su formulación (contenido de grasa, proporción de sólidos de cacao, cantidad de azúcar y uso de aditivos) así como de las condiciones de procesamiento, entre ellas el conchado, la temperatura y el tipo de emulsionante empleado [34,68]. Estos factores influyen directamente en las fases posteriores del templado, donde los cristales se forman, crecen y se consolidan. Por ello, es fundamental considerar las curvas de templado específicas para cada tipo de chocolate, ya que incluso pequeñas variaciones pueden afectar la calidad final del producto.

En la caracterización del flujo destacan dos parámetros fundamentales: el esfuerzo de cedencia, que indica la tensión mínima necesaria para iniciar el movimiento, y la viscosidad plástica, que describe la resistencia al flujo una vez superado ese umbral [38,69]. La distribución de tamaño de partícula ejerce un papel crítico en estos valores, ya que partículas más finas incrementan las interacciones entre ellas y elevan la viscosidad, con impacto directo en la cohesión y la sensación en boca [70,71].

Diversos modelos plásticos se han empleado para describir el comportamiento reológico del chocolate. El modelo de Casson ha mostrado utilidad para representar simultáneamente esfuerzo de cedencia y viscosidad en diferentes formulaciones, constituyendo además la referencia habitual en la industria para comparar masas bajo distintas condiciones de temperatura y composición [12,19,67]. El modelo de Bingham puede aplicarse cuando se requieren estimaciones rápidas en rangos operativos acotados, aunque suponer linealidad después del umbral puede conducir a subestimaciones del adelgazamiento por corte [67]. El modelo de Herschel-Bulkley explica con mayor detalle el carácter pseudoplástico del chocolate, en el que la viscosidad disminuye conforme aumenta la velocidad de cizalla, y suele proporcionar mejores ajustes cuando la curva de

flujo presenta curvatura, lo que lo hace adecuado para analizar tanto formulaciones tradicionales como no convencionales, incluidas variedades como chocolate blanco o ruby [58,72]. Incluso con equipamiento más sencillo, como el uso de viscosímetros, es posible obtener datos compatibles con estos modelos y evaluar fenómenos de tixotropía asociados a cambios en el refinado, lo que amplía la aplicabilidad de estas aproximaciones en entornos con recursos limitados [73].

La Tabla 2 resume comparativamente los tres modelos, destacando sus usos prácticos, ventajas y limitaciones, y mostrando cómo la evidencia reciente permite orientar su selección según el objetivo de análisis y las condiciones de procesamiento.

Tabla 2. Modelos reológicos plásticos aplicados al chocolate

Modelo	Descripción práctica	Uso en chocolate	Ventajas y limitaciones	Evidencia	Referencia
Casson	Representa esfuerzo de cedencia y viscosidad plástica; útil para comparar fluidez entre masas	Representa esfuerzo de cedencia y viscosidad plástica; útil para comparar fluidez entre masas	Referencia industrial para control de proceso, bombeo y moldeo	Aplicado en chocolates extra amargo, amargo, leche, blanco y ruby; permite análisis de tixotropía y perfiles de velocidad. Utilizado como comparación con Casson y Herschel-Bulkley; adecuado solo en condiciones específicas	[67,72]
Bingham	Aproxima un umbral y una relación lineal posterior	Aproxima un umbral y una relación lineal posterior	Reportes rápidos en rangos operativos acotados	Reportes rápidos en rangos operativos acotados	[67]
Herschel-Bulkley	Describe plásticos no newtonianos con umbral y adelgazamiento o por corte	Describe plásticos no newtonianos con umbral y adelgazamiento o por corte	Estudios detallados de formulación, temperatura y tipos de chocolate	Adecuado para chocolates convencionales y no convencionales como blanco o ruby	[72,73]

Los estudios más recientes se han enfocado en cómo ingredientes y técnicas de producción modifican estas propiedades. El uso de emulsionantes como lecitina o polirricinoleato de poliglicerol contribuye a reducir la viscosidad y mejorar la dispersión de partículas, mientras que la incorporación de lípidos alternativos a la manteca de cacao altera la cristalización y modifica la textura final [74,75]. El conchado, además de homogeneizar la masa, ajusta tanto la viscosidad como la elasticidad del sistema, incidiendo en la percepción sensorial [27,38]. Asimismo, el contenido de grasa modula el flujo: mayores proporciones favorecen la fluidez, mientras que niveles reducidos aumentan la resistencia [71,76].

Por lo tanto, la evidencia disponible resalta que la reología del chocolate resulta de la interacción entre formulación, microestructura y procesamiento. Un control adecuado de estas variables es determinante para optimizar la manufactura, garantizar estabilidad tecnológica y preservar las propiedades sensoriales que definen la calidad y aceptación del producto [52,77,78].

Aplicaciones prácticas en la industria chocolatera

El conocimiento generado en torno a la cristalografía y la reología del chocolate se traduce en aplicaciones directas para la industria. El control de la fermentación y del temperado orienta la formación de compuestos volátiles y estructuras cristalinas estables que sostienen el perfil sensorial y la aceptación del producto [33,79,80]. De forma complementaria, la caracterización reológica permite establecer parámetros de viscosidad y fluidez que aseguran la viabilidad de operaciones como conchado, bombeo y moldeo [12,16].

La incorporación de innovaciones tecnológicas ha fortalecido estos procesos, desde el ajuste de tiempos de conchado para modular textura y sabor, hasta la formulación con ingredientes alternativos que aportan valor nutricional o funcional [9,81–83]. También se han explorado herramientas digitales para el control de procesos y tecnologías como la impresión 3D, que abren nuevas posibilidades de personalización y producción flexible [84–86].

En el plano industrial más amplio, la sostenibilidad y la diversificación de ingredientes marcan la agenda actual. Estrategias como el análisis de ciclo de vida, el empleo de fracciones lipídicas alternativas o la incorporación de subproductos y harinas no convencionales buscan responder a los retos económicos, ambientales y sociales de la cadena de valor [87–90]. A ello se suma la necesidad de comunicar con claridad las credenciales sostenibles de los productos, ya que los consumidores manifiestan disposición a pagar más por chocolates certificados, reforzando la importancia de la transparencia y de estrategias de mercadotecnia dirigidas a educar e informar [91–94].

Conclusiones y perspectivas

La revisión evidenció que la calidad del chocolate está determinada por la interrelación entre cristalografía y reología.

El control del polimorfismo de la manteca de cacao, en particular la estabilización de la forma $\beta(V)$, se vinculó con la obtención de productos con brillo, textura uniforme y mayor resistencia al bloom. Paralelamente, se observó que la viscosidad, el esfuerzo de cedencia y la distribución de tamaño de partícula influyeron en la procesabilidad y en la percepción sensorial.

El empleo de modelos reológicos como Casson y Herschel-Bulkley permitió interpretar de manera

adecuada el comportamiento de flujo bajo distintas condiciones de formulación y proceso. Además, se documentó que la incorporación de innovaciones tecnológicas y de ingredientes alternativos abrió posibilidades para diversificar la oferta de productos y responder a nuevas expectativas de consumo.

De cara al futuro, las investigaciones podrían orientarse hacia el desarrollo de métodos analíticos no invasivos para monitorear la cristalización en tiempo real, la validación de modelos reológicos aplicables en contextos industriales con recursos limitados y la integración de estrategias de sostenibilidad en la cadena de valor. Estos enfoques abrirían la posibilidad de optimizar la producción, diversificar las formulaciones y mantener la competitividad del chocolate en mercados cada vez más exigentes.

Referencias

- [1] Rosales-Valdívía BS, García-Curiel L, Pérez-Flores JG, Contreras-López E, Pérez-Escalante E, García-Mora C. Influencia de la fermentación del cacao y del uso de cultivos iniciadores sobre las características organolépticas del chocolate: un análisis integral. *Pädi Bol Científico Ciencias Básicas e Ingeniería ICBI*. 2024;12:31–43. <https://doi.org/10.29057/icbi.v12i23.12047>.
- [2] Camargo MC, Hogarth NJ, Pacheco P, Nhantumbo I, Kanninen M. Greening the Dark Side of Chocolate: A Qualitative Assessment to Inform Sustainable Supply Chains. *Environ Conserv*. 2019;46:9–16. <https://doi.org/10.1017/S0376892918000243>.
- [3] Fattah MA, Arifin A, Sadat MA, Azisah A, Pata AA. Value-Added of Processed Cocoa Seed: A Case Study in CV. Putra Mataram, Polewali Mandar Regency. *Jambura Agribus J*. 2023;5:28–34. <https://doi.org/10.37046/jaj.v5i1.16964>.
- [4] Marinello G. The History of Chocolate: From Ancient Beginnings to Modern Innovations. 2025. <https://doi.org/10.32388/subst.test.160056748>.
- [5] Montagna MT, Diella G, Triggiano F, Caponio GR, Giglio OD, Caggiano G, et al. Chocolate, “Food of the Gods”: History, Science, and Human Health. *Int J Environ Res Public Health*. 2019;16:4960. <https://doi.org/10.3390/ijerph16244960>.
- [6] Ac-Pangan MF, Engeseth NJ, Cadwallader KR. Identification of Important Aroma Components and Sensory Profiles of Minimally Processed (Unroasted) and Conventionally Roasted Dark Chocolates. *J Agric Food Chem*. 2023;71:9856–67. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c01366>.
- [7] Almeida OGG, Pereira MG, Bighetti-Trevisan RL, Santos ES, De Campos EG, Felis GE, et al. Investigating interspecific quorum sensing influence on cocoa fermentation quality through defined microbial cocktails. 2022. <https://doi.org/10.1101/2022.06.14.496151>.
- [8] Batista NN, Ramos CL, Dias DR, Pinheiro ACM, Schwan RF. The impact of yeast starter cultures on the microbial communities and volatile compounds in cocoa fermentation and the resulting sensory attributes of chocolate. *J Food Sci Technol*. 2016;53:1101–10. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2132-5>.
- [9] De Freitas RL, Augusto PPC, Luccas V, Bolini HMA. The influence of conching time on the sensory profile and consumer acceptance of milk chocolates enriched with freeze-dried blueberry (*Vaccinium* spp.). *Food Sci Technol Int*. 2025;31:83–92. <https://doi.org/10.1177/10820132231179764>.
- [10] Deucher Z, Gourrat K, Repoux M, Boulanger R, Labouré H, Le Quéré J-L. Key Aroma Compounds of Dark Chocolates Differing in Organoleptic Properties: A GC-O Comparative Study. *Molecules*. 2020;25:1809. <https://doi.org/10.3390/molecules25081809>.
- [11] Santander Muñoz M, Rodríguez Cortina J, Vaillant FE, Escobar Parra S. An overview of the physical and biochemical transformation of cocoa seeds to beans and to chocolate: Flavor formation. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2020;60:1593–613. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1581726>.
- [12] Carvalho JCS, Romoff P, Lannes SCDS. Improvement of nutritional and physicochemical properties of milk chocolates enriched with kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) and grape (*Vitis vinifera*). *Food Sci Technol*. 2018;38:551–60. <https://doi.org/10.1590/fst.15018>.
- [13] Kissiedu KO, Agbenorhevi JK, Datsomor DN. Optimization of sensory acceptability of milk chocolate containing okra pectin as emulsifier. *Int J Food Prop*. 2020;23:1310–23. <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1800728>.
- [14] Mielmann A, Le Roux N, Taljaard I. The Impact of Mood, Familiarity, Acceptability, Sensory Characteristics and Attitude on Consumers’ Emotional Responses to Chocolates. *Foods*. 2022;11:1621. <https://doi.org/10.3390/foods11111621>.
- [15] Rothkopf I, Danzl W. Changes in chocolate crystallization are influenced by type and amount of introduced filling lipids. *Eur J Lipid Sci Technol*. 2015;117:1714–21. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201400552>.
- [16] Schouteten JJ, De Pelsmaeker S, Juvinal J, Lagast S, Dewettinck K, Gellynck X. Influence of sensory attributes on consumers’ emotions and hedonic liking of chocolate. *Br Food J*. 2018;120:1489–503. <https://doi.org/10.1108/BFJ-08-2017-0436>.
- [17] Błoński B, Wilczyński S, Stolecka-Warzecha A. Application of Computer Microtomography and Hyperspectral Imaging to Assess the Homogeneity of Active Ingredient Distribution in Functional Food. *Processes*. 2022;10:1190. <https://doi.org/10.3390/pr10061190>.
- [18] de Paula Silva T, Silva AA, Toffolo MCF, de Aguiar AS. The action of phytochemicals present in cocoa in the prevention of vascular dysfunction and atherosclerosis. *J Clin Transl Res*. 2022;8:509.
- [19] Santos PHS, Suzuki CK, Lannes SCDS. Effects of Adding Micronutrient Mixtures to a Model Dark Chocolate System and Partially Replacing the Fat Phase with a Structuring Oleogel. *Foods*. 2025;14:430. <https://doi.org/10.3390/foods14030430>.
- [20] Rosmindari S, Saputro AD, Bintoro N. Changes of Dark Couverture Chocolate Hardness During Storage Tempered Using Automatic Tempering Machine with Tank and Tempering Temperature as Variables. *BIO Web Conf*. 2023;80:04002. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20238004002>.
- [21] Toker ÖS, Rasouli Pirouzian H, Konar N, Polat DG. Bv seeding as an alternative pre-crystallization technique in synbiotic milk chocolate production. *Gıda*. 2018;43:422–31. <https://doi.org/10.15237/gida.GD18020>.
- [22] Urbańska B, Derewiaka D, Lenart A, Kowalska J. Changes in the composition and content of polyphenols in chocolate resulting from pre-treatment of cocoa beans and technological processes. *Eur Food Res Technol*. 2019;245:2101–12. <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03333-w>.
- [23] Chen J, Ghazani SM, Stobbs JA, Marangoni AG. Tempering of cocoa butter and chocolate using minor lipidic components. *Nat Commun*. 2021;12:5018. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25206-1>.

- [24] Figueira AC, Luccas V. Physicochemical characterization of national and commercial cocoa butter used in Brazil to make chocolate. *Braz J Food Technol.* 2022;25:e2022033. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.03322>.
- [25] Koizumi H, Kimura K, Takagi M, Michikawa S, Hirai Y, Sato K, et al. Effect of accumulated strain on fat bloom in CBS-based compound chocolates. *CrystEngComm.* 2023;25:4562–7. <https://doi.org/10.1039/D3CE00524K>.
- [26] Hrivná L, Macháľková L, Burešová I, Nedomová Š, Gregor T. Texture, color, and sensory changes occurring in chocolate bars with filling during storage. *Food Sci Nutr.* 2021;9:4863–73. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2434>.
- [27] Indiarito R, Inayah DN, Ramadhani AP, Yarlina VP. Chocolate's blooming phenomenon: A brief review of the formation process and its influencing factors. *Int J Emerg Trends Eng Res.* 2021;9:1156–61.
- [28] Cooney J, Kennedy T, Monteiro L, Martini S. Flow properties of single origin chocolates: Effect of product formulation and particle size. *J Food Sci.* 2024;89:4419–29. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17176>.
- [29] Monteiro L, Cooney J, Martini S. Rapid and economic method to measure chocolate viscosity. *J Am Oil Chem Soc.* 2024;101:59–65. <https://doi.org/10.1002/aocs.12716>.
- [30] Quispe-Sanchez L, Mestanza M, Goñas M, Gill ERA, Oliva-Cruz M, Chavez SG. Physical, functional and sensory properties of bitter chocolates with incorporation of high nutritional value flours. *Front Nutr.* 2022;9:990887. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.990887>.
- [31] Bayés-García L, Cuevas-Diarte MA, Calvet T. Chocolate: A useful model for teaching basic terms on crystallography and thermodynamics. *EDULEARN15 Proc.* 2015:1061–6.
- [32] Ewens H, Metilli L, Simone E. Analysis of the effect of recent reformulation strategies on the crystallization behaviour of cocoa butter and the structural properties of chocolate. *Curr Res Food Sci.* 2021;4:105–14. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.02.009>.
- [33] Glicerina V, Balestra F, Dalla Rosa M, Romani S. Microstructural and rheological characteristics of dark, milk and white chocolate: A comparative study. *J Food Eng.* 2016;169:165–71. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.08.011>.
- [34] Toker OS, Ozonuk S, Gunes R, Icyer NC, Rasouli HP, Konar N, et al. Importance of emulsifiers in chocolate industry: Effect on structure, machinability, and quality of intermediate and final products. *J Am Oil Chem Soc.* 2024;101:721–33. <https://doi.org/10.1002/aocs.12829>.
- [35] Mirzaee Ghazani S, Marangoni A. Molecular origins of polymorphism in cocoa butter. *Annu Rev Food Sci Technol.* 2021;12. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-070620-022551>.
- [36] Declerck A, Nelis V, Danthine S, Dewettinck K, Van Der Meeren P. Characterisation of fat crystal polymorphism in cocoa butter by time-domain NMR and DSC deconvolution. *Foods.* 2021;10:520. <https://doi.org/10.3390/foods10030520>.
- [37] Rezende NV, Benassi MT, Vissotto FZ, Augusto PPC, Grossmann MVE. Effects of fat replacement and fibre addition on texture, sensory acceptance and structure of sucrose-free chocolate. *Int J Food Sci Technol.* 2015;50:1413–20. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12791>.
- [38] Da Silva TLT, Grimaldi R, Gonçalves LAG. Effect of cocoa butter equivalent on cocoa butter crystallization behavior and on dark chocolate. *Braz J Food Res.* 2019;10:149. <https://doi.org/10.3895/rebrapa.v10n1.10699>.
- [39] Weiller S, Tanabe T, Oyama Y. Terahertz non-contact monitoring of cocoa butter in chocolate. *World J Eng Technol.* 2018;6:268–74. <https://doi.org/10.4236/wjet.2018.62015>.
- [40] Winkelmeyer CB, Peyronel F, Weiss J, Marangoni AG. Monitoring tempered dark chocolate using ultrasonic spectrometry. *Food Bioprocess Technol.* 2016;9:1692–705. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1755-5>.
- [41] Fibrianto K, Azhar LOMF, Widyotomo S, Harijono H. Effect of cocoa bean origin and conching time on the physicochemical and microstructural properties of Indonesian dark chocolate. *Braz J Food Technol.* 2021;24:e2019249. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.24919>.
- [42] Nizori A, Simamora LD, Rahmi SL, Tafzi F, Mapegau, Ichwan B. Halal dark chocolate quality: Influence of tempering time and temperature. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 2022;1397:012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1397/1/012017>.
- [43] Ishak I, Musa N, Hasim NAM, Hisham NAB, Fadzilah FNH, Khaironi J, et al. Effect of different cocoa mass levels on total phenolic content, antioxidant activity, and sensory acceptability of panned dark chocolate. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 2024;1397:012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1397/1/012025>.
- [44] Ullrich L, Neiens S, Hühn T, Steinhaus M, Chetschik I. Impact of water on odor-active compounds in fermented and dried cocoa beans and chocolates made thereof. *J Agric Food Chem.* 2021;69:8504–10. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c02287>.
- [45] Beckett ST, Fowler MS, Ziegler GR. Beckett's Industrial Chocolate Manufacture and Use. Hoboken: John Wiley & Sons; 2017.
- [46] Stobbs JA, Ghazani SM, Donnelly M-E, Marangoni AG. Chocolate tempering: A perspective. *Cryst Growth Des.* 2025;25:2764–83. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.5c00269>.
- [47] Jin J, Hartel RW. Accelerated fat bloom in chocolate model systems: Solid fat content and temperature fluctuation frequency. *J Am Oil Chem Soc.* 2015;92:1473–81. <https://doi.org/10.1007/s11746-015-2709-1>.
- [48] Laughter JA, Brown BD, Anantheswaran RC. Effect of curing conditions on heat resistance in white chocolate. *Food Sci Nutr.* 2024;12:6735–41. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4292>.
- [49] Vereshchagin A, Reznichenko I, Bychin N. Thermal analysis in the quality study of chocolate and confectionery products. *Food Process Tech Technol.* 2019;49:289–300. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-2-289-300>.
- [50] Sirbu D, Grimbs A, Corno M, Ullrich MS, Kuhnert N. Variation of triacylglycerol profiles in unfermented and dried fermented cocoa beans of different origins. *Food Res Int.* 2018;111:361–70. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.05.025>.
- [51] Svanberg L, Ahrné L, Lorén N, Windhab E. Effect of sugar, cocoa particles and lecithin on cocoa butter crystallisation in seeded and non-seeded chocolate model systems. *J Food Eng.* 2011;104:70–80. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.09.023>.
- [52] Rigolle A, Gheysen L, Depypere F, Landuyt A, Van Den Abeele K, Foubert I. Lecithin influences cocoa butter crystallization depending on concentration and matrix. *Eur J Lipid Sci Technol.* 2015;117:1722–32. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201400555>.
- [53] Liang B, Hartel RW. Effects of milk powders in milk chocolate. *J Dairy Sci.* 2004;87:20–31. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73137-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73137-9).
- [54] Dicolla CB, Evans JL, Hainly LL, Celtruda SL, Brown BD, Anantheswaran RC. Descriptive sensory analysis of heat-resistant milk chocolates. *Food Sci Nutr.* 2019;7:2806–16. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1047>.
- [55] Hadnađev M, Kalić M, Krstonošić V, Jovanović-Lješković N, Erceg T, Škrobot D, et al. Fortification of chocolate with microencapsulated fish oil: Effect of protein wall material on physicochemical properties of microcapsules and chocolate matrix. *Food Chem X.* 2023;17:100583. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100583>.

- [56] Alkurd RA, Al-Akayleh FT, Al-Remawi MM, Hasan MR, Maqousi A, Ramadan K, et al. Evaluation of a Jordanian commercial chocolate brand fortified with micronutrients of vitamins B12 and D3, iron and zinc. *Food Sci Technol*. 2023;43:e105122. <https://doi.org/10.1590/fst.105122>.
- [57] Furlán LTR, Baracco Y, Lecot J, Zaritzky N, Campderrós ME. Effect of sweetener combination and storage temperature on physicochemical properties of sucrose-free white chocolate. *Food Chem*. 2017;229:610–20. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.002>.
- [58] Karyappa R, Hashimoto M. Chocolate-based ink three-dimensional printing (Ci3DP). *Sci Rep*. 2019;9:14178. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50583-5>.
- [59] Bölük E, Akdeniz E, Gunes R, Palabiyik I, Konar N, Toker OS. Determination of the process effect on cocoa butter crystallization by rheometer: Kinetic modeling by Gompertz equation. *J Food Sci*. 2024;89:2867–78. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17040>.
- [60] Lörcher M, Behrens S, Böttger A, Lange C, Schräer C, Luo X, et al. Numerical investigation of the cooling behavior of molded chocolate products. *Chem Eng Technol*. 2022;45:1903–10. <https://doi.org/10.1002/ceat.202200284>.
- [61] Schomaker M, Schräer C, Lörcher M. Measurement and control of the gloss of chocolate. *Chem Eng Technol*. 2020;43:2336–43. <https://doi.org/10.1002/ceat.202000003>.
- [62] Tüfekçiogulları Machine Company R&D Center, Tazegül AS, Şahin ÖS, Okumuşer O. Roll-bond heat exchanger (RHE) design and application to a chocolate cooling tunnel: A numerical study. *Adv Eng Lett*. 2023;2:161–71. <https://doi.org/10.46793/adeletters.2023.2.4.4>.
- [63] Pirouzian HR, Konar N, Palabiyik I, Oba S, Toker OS. Pre-crystallization process in chocolate: Mechanism, importance and novel aspects. *Food Chem*. 2020;321:126718. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126718>.
- [64] Miyasaki EK, Luccas V, Kieckbusch TG. Modified soybean lecithins as inducers of the acceleration of cocoa butter crystallization. *Eur J Lipid Sci Technol*. 2016;118:1539–49. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201500093>.
- [65] Simoes S. The role of emulsifiers on the crystallization of cocoa butter and cocoa butter-sugar blends. Toronto Metropolitan University; 2021. <https://doi.org/10.32920/ryerson.14655384>.
- [66] Toker OS, Palabiyik I, Konar N. Chocolate quality and conching. *Trends Food Sci Technol*. 2019;91:446–53. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.047>.
- [67] Kumbár V, Kouřilová V, Dufková R, Votava J, Hřivna L. Rheological and pipe flow properties of chocolate masses at different temperatures. *Foods*. 2021;10:2519. <https://doi.org/10.3390/foods10112519>.
- [68] Lončarević I, Pajin B, Tumbas Šaponjac V, Petrović J, Vulić J, Fišteš A, et al. Physical, sensorial and bioactive characteristics of white chocolate with encapsulated green tea extract. *J Sci Food Agric*. 2019;99:5834–41. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9855>.
- [69] Lončarević I, Pajin B, Petrović J, Nikolić I, Maravić N, Ačkar Đ, et al. White chocolate with resistant starch: Impact on physical properties, dietary fiber content and sensory characteristics. *Molecules*. 2021;26:5908. <https://doi.org/10.3390/molecules26195908>.
- [70] McGill J, Hartel RW. Investigation into the microstructure, texture and rheological properties of chocolate ganache. *J Food Sci*. 2018;83:689–99. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14053>.
- [71] Taşoyan İC, Yolaçaner ET, Öztöpe MH. Physical characterization of chocolates prepared with various soybean and milk powders. *J Texture Stud*. 2023;54:334–46. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12744>.
- [72] Kouřilová V, Dufková R, Hřivna L, Kumbár V. Use of rheological plastic models to describe the flow behaviour of unconventional chocolate masses. *Czech J Food Sci*. 2022;40:305–12. <https://doi.org/10.17221/57/2022-CJFS>.
- [73] Cahyani A, Kurniasari J, Nafingah R, Rahayoe S, Harmayani E, Saputro AD. Determining Casson yield value, Casson viscosity and thixotropy of molten chocolate using viscometer. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 2019;355:012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/355/1/012041>.
- [74] Alvarez MD, Cofrades S, Espert M, Sanz T, Salvador A. Development of chocolates with improved lipid profile by replacing cocoa butter with an oleogel. *Gels*. 2021;7:220. <https://doi.org/10.3390/gels7040220>.
- [75] Zohreh D. Properties of dark chocolate enriched with free and encapsulated chlorogenic acids extracted from green coffee. *Braz J Food Technol*. 2020;23:e2019118. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.11819>.
- [76] Zarić DB, Bulatović MLJ, Rakin MB, Krunic TŽ, Lončarević IS, Pajin BS. Functional, rheological and sensory properties of probiotic milk chocolate produced in a ball mill. *RSC Adv*. 2016;6:13934–41. <https://doi.org/10.1039/C5RA21363K>.
- [77] Siregar SZ, Saputro AD, Edi, Fadilah MAN, Susanti DY, Setiowati AD. The impact of shell formation duration during manual tempering process on the hardness and melting point of couverture praline chocolate. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 2023;1200:012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1200/1/012017>.
- [78] Valverde-Ayllon MC, Chire-Fajardo GC, Ureña-Peralta MO. Reduction of the refining–conching time of Peruvian dark chocolate: A case study. *Int J Food Sci Technol*. 2022;57:6572–9. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16000>.
- [79] Guzmán Penella S, Boulanger R, Maraval I, Kopp G, Corno M, Fontez B, et al. Link between flavor perception and volatile compound composition of dark chocolates derived from Trinitario cocoa beans from Dominican Republic. *Molecules*. 2023;28:3805. <https://doi.org/10.3390/molecules28093805>.
- [80] Llano S, Vaillant F, Santander M, Zorro-González A, González-Orozco CE, Maraval I, et al. Exploring the impact of fermentation time and climate on quality of cocoa bean-derived chocolate: Sensorial profile and volatile analysis. *Foods*. 2024;13:2614. <https://doi.org/10.3390/foods13162614>.
- [81] Füllemann D, Neiens SD, Steinhaus M. Impact of processing on important cocoa off-flavour compounds. *Eur Food Res Technol*. 2022;248:197–205. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03873-0>.
- [82] Özgüven M, Berktaş İ, Gönül Ö, Özçelik B. Development of dark chocolate enriched with matcha green tea (*Camellia sinensis*). *Gıda*. 2020;45:850–60. <https://doi.org/10.15237/gida.GD20034>.
- [83] Urbańska B, Kowalska H, Szulc K, Ziarno M, Pochitskaya I, Kowalska J. Comparison of the effects of conching parameters on the contents of three dominant flavan-3-ols, rheological properties and sensory quality in chocolate milk mass based on liquor from unroasted cocoa beans. *Molecules*. 2021;26:2502. <https://doi.org/10.3390/molecules26092502>.
- [84] Bastos VS, Uekane TM, Bello NA, De Rezende CM, Flosi Paschoalin VM, Del Aguila EM. Dynamics of volatile compounds in TSH 565 cocoa clone fermentation and their role on chocolate flavor in Southeast Brazil. *J Food Sci Technol*. 2019;56:2874–87. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03736-3>.
- [85] Jia F, Wang X, Mustafee N, Hao L. Investigating the feasibility of supply chain-centric business models in 3D chocolate printing: A simulation study. *Technol Forecast Soc Change*. 2016;102:202–13. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.026>.

- [86] Peres FAP, Peres TN, Fogliatto FS, Anzanello MJ. Strategies for synchronizing chocolate conching batch process data using dynamic time warping. *J Food Sci Technol.* 2020;57:122–33. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04037-5>.
- [87] Boakye-Yiadom KA, Duca D, Foppa Pedretti E, Ilari A. Environmental performance of chocolate produced in Ghana using life cycle assessment. *Sustainability.* 2021;13:6155. <https://doi.org/10.3390/su13116155>.
- [88] Güneş E, Yılmaz M, Özcan M, Sormaz Ü. Sensory properties of chocolate filled with grasshopper flour as a sustainable food and its effect on consumer behaviour. *J Insects Food Feed.* 2025;1–13. <https://doi.org/10.1163/23524588-bja10216>.
- [89] Brilianda I, Putri Lahagu JT, Damayanti K, Felisha Putri J. Potensi fraksi minyak sawit sebagai pengganti lemak kakao pada produk cokelat. *Bot Publ Ilmu Tanam Agribisnis.* 2025;2:136–43. <https://doi.org/10.62951/botani.v2i2.336>.
- [90] Ramakrishna S, Narayana Murthy G, Nagashayana US, Nandeesh H. Development and evaluation of dark chocolate enriched with banana bract powder: Research article. *J Pharma Insights Res.* 2025;3:250–7. <https://doi.org/10.69613/gf0cba95>.
- [91] Cadby J. Can COVID-19 melt the craft chocolate industry? *Food Ethics.* 2021;6:8. <https://doi.org/10.1007/s41055-021-00087-8>.
- [92] Harris C, Perkiss S, Tanima FA. Sustainability in the chocolate industry: A scoping review of accounting journals and the development of a research agenda. *Meditari Account Res.* 2025;33:220–46. <https://doi.org/10.1108/MEDAR-05-2024-2477>.
- [93] Muhammad DRA, Anandito RBK, Fauza G, Saputri LM. The effect of consumer knowledge and perceptions on the purchase decision of chocolate with sustainability label. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 2023;1200:012054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1200/1/012054>.
- [94] Wadhvani D. Cocoa Crunch: How soaring prices of cocoa beans are shaping the future of the chocolate industry. *Int Sci J Eng Manag.* 2025;4:1–9. <https://doi.org/10.55041/ISJEM04772>.