

REVISIÓN CRÍTICA

Más allá del procesado por altas presiones: Pardeamiento enzimático e inestabilidad oxidativa en guacamole refrigerado

Una revisión crítica y un marco multibarrera para el control con etiqueta limpia

Autor

José M. López, BSc, MD, PhD, LLD (C)

Dirección Técnica y de I+D, INTABIOTECH S.L., España

Revisión crítica / Perspectiva traslacional • Septiembre de 2026

POSICIÓN EDITORIAL — Este manuscrito aborda el pardeamiento como un problema multimecanístico de estabilidad y no como un defecto atribuible a una única enzima. Las alegaciones comerciales específicas de producto no se utilizan como evidencia científica. El «presupuesto de estabilidad oxidativa» propuesto constituye un marco conceptual destinado a orientar hipótesis de formulación y proceso susceptibles de verificación experimental.

Resumen

El procesado por altas presiones (HPP) se ha convertido en una tecnología de conservación preferente para los productos refrigerados de aguacate, ya que puede proporcionar un control microbiano robusto al tiempo que mantiene un perfil sensorial fresco. Sin embargo, el HPP no esteriliza la bioquímica del aguacate. La polifenol oxidasa (PPO) y la lipoxigenasa (LOX) presentan una resistencia inusualmente elevada a la presión en matrices de aguacate; puede persistir una actividad residual considerable tras tratamientos de relevancia comercial y ambas enzimas pueden recuperar actividad durante el almacenamiento refrigerado. En consecuencia, la estabilidad del color del guacamole no puede entenderse como una simple función de la inactivación inicial de la PPO. Esta revisión crítica integra la evidencia específica disponible en aguacate sobre pardeamiento enzimático, oxidación lipídica, disrupción tisular inducida por HPP, intervenciones antioxidantes, gestión del oxígeno y exposición tras la apertura. Sostenemos que el guacamole refrigerado se comporta como un sistema oxidativo acoplado acuoso-lipídico, en el que el pardeamiento visible, la pérdida de tonalidad verde, los productos volátiles de oxidación y el deterioro sensorial emergen del equilibrio entre la presión oxidativa residual y la capacidad defensiva remanente. Este equilibrio se formaliza aquí como un «presupuesto de estabilidad oxidativa»: un marco conceptual que considera la PPO/LOX residual o reactivada, la disponibilidad de oxígeno, los sustratos fenólicos y lipídicos insaturados, la reserva reductora, la capacidad de control de pH/quelación, los antioxidantes de fase lipídica, la barrera del envase y la temperatura. La revisión destaca además una paradoja insuficientemente valorada: un extracto botánico puede mostrar un buen comportamiento en ensayos de captación de radicales y, sin embargo, agravar el pardeamiento del aguacate si sus compuestos fenólicos actúan como sustratos de la PPO. Por tanto, el término antioxidante no debe considerarse sinónimo de antipardeamiento. Se propone una estrategia multibarrera de carácter traslacional que combina HPP con acidificación/quelación controlada, una reserva reductora medible, inhibición dirigida de la PPO, protección de la fase lipídica y gestión del oxígeno. El criterio industrial más informativo puede no ser el color inmediatamente después del procesado, sino la cinética del color tras la apertura en fases avanzadas de la vida útil, cuando se reintroduce oxígeno y la reserva reductora puede encontrarse agotada. Se aporta un marco escalonado de validación para transformar el cribado de ingredientes en decisiones de formulación basadas en mecanismos para guacamole refrigerado y otros productos derivados del aguacate.

Palabras clave: aguacate; guacamole; procesado por altas presiones; polifenol oxidasa; lipoxigenasa; pardeamiento enzimático; etiqueta limpia; antioxidantes; oxígeno; vida útil

Aspectos destacados

- El HPP controla los microorganismos de forma más fiable que las enzimas oxidativas en matrices de aguacate.
- Tras tratamientos de presión comercialmente relevantes puede persistir una actividad residual considerable de PPO y LOX, con posible reactivación durante el almacenamiento en frío.
- «Antioxidante» no equivale a «antipardeamiento»: los extractos fenólicos pueden convertirse en sustratos de la PPO y acelerar la pérdida de color.
- La estabilidad del guacamole debe gestionarse como un problema acoplado de pardeamiento en fase acuosa y oxidación en fase lipídica.
- La cinética del color tras la apertura al final de la vida útil debe convertirse en un criterio primario de formulación, y no en una consideración secundaria.

1. Introducción: el problema de calidad aún no resuelto tras el éxito comercial del HPP

El guacamole constituye una matriz alimentaria refrigerada particularmente exigente. El procesado destruye la compartimentación celular que, en condiciones normales, mantiene separados las enzimas oxidativas, los sustratos fenólicos, los lípidos insaturados y el oxígeno. Al mismo tiempo, los consumidores esperan un color, un aroma y una textura que sigan siendo reconociblemente «frescos», dejando poco margen para los cambios de sabor o color asociados a una conservación térmica intensa. El procesado por altas presiones (HPP) se adapta excepcionalmente bien a este requisito de mercado, ya que la presión puede reducir de forma marcada las poblaciones microbianas vegetativas y, a la vez, preservar los compuestos volátiles y los atributos sensoriales mejor que el tratamiento térmico convencional. Por ello, los guacamoles comerciales tratados mediante HPP se han convertido en un modelo relevante de conservación no térmica eficaz (Palou et al., 2000; Alañón et al., 2022; Uzunlu, 2024).

Sin embargo, el éxito comercial del HPP ha favorecido en ocasiones una interpretación excesivamente simplificada: una vez alcanzada la estabilidad microbiológica, el deterioro restante durante la vida útil se trata como una cuestión secundaria de formulación. El aguacate no respalda esa premisa. Su polifenol oxidasa (PPO) presenta una resistencia notable frente a distintos estreses de conservación, y la lipoxigenasa (LOX) puede contribuir al deterioro oxidativo de la fracción lipídica y del perfil volátil. En condiciones de HPP comercialmente realistas, no debe asumirse que ninguna de estas enzimas queda totalmente inactivada. De hecho, tras 600 MPa durante 3 min se han descrito actividades residuales próximas a la mitad de los niveles originales, seguidas de una reactivación parcial o sustancial durante el almacenamiento en frío (Jacobo-Velázquez & Hernández-Brenes, 2010).

La consecuencia práctica es que el pardeamiento del guacamole refrigerado no constituye un defecto puntual que se produzca durante el procesado, sino un problema sistémico dependiente del tiempo. El tratamiento por presión, la acidificación, la disponibilidad de oxígeno, la disrupción tisular, la accesibilidad enzimática, la capacidad reductora, la composición fenólica, la oxidación lipídica, la permeabilidad del envase y la temperatura condicionan conjuntamente la velocidad a la que se consume la calidad. Una misma formulación puede mostrar un aspecto excelente inmediatamente después del HPP y deteriorarse con rapidez tras la apertura al final de su vida útil porque su reserva reductora ya se haya consumido. A la inversa, una formulación que reduzca de forma modesta la actividad de la PPO en el día 0 puede comportarse de manera excepcional si conserva la capacidad reductora y minimiza la entrada de oxígeno.

Por tanto, esta revisión replantea el pardeamiento del guacamole como un problema multimecanístico de estabilidad oxidativa. El objetivo no es simplemente catalogar agentes antipardeamiento, sino conectar los mecanismos con la toma de decisiones industriales. Se presta especial atención a cinco cuestiones: (i) por qué el HPP no elimina de forma fiable la actividad de las enzimas oxidativas; (ii) cómo interactúa el pardeamiento mediado por PPO con la LOX y la oxidación lipídica; (iii) por qué los extractos antioxidantes naturales pueden comportarse paradójicamente en aguacate; (iv) por qué los ensayos tras la apertura en fases avanzadas de la vida útil aportan información mecanística; y (v) cómo pueden los desarrolladores de ingredientes y los fabricantes diseñar experimentos escalonados que identifiquen el sistema multibarrera mínimo eficaz en lugar de depender de formulaciones por ensayo y error.

2. El aguacate como sistema acoplado de oxidación acuosa-lipídica

El primer error conceptual de muchos programas antipardeamiento consiste en tratar la pérdida de color como si estuviera aislada del resto del deterioro oxidativo. La pulpa de aguacate contiene una fase acuosa en la que la PPO actúa sobre sustratos fenólicos y una fase rica en lípidos susceptible de oxidación tanto enzimática como no enzimática. Estos procesos pueden separarse analíticamente, pero se encuentran biológicamente acoplados a través de la disponibilidad de oxígeno, la disrupción celular, el estado redox y las condiciones de almacenamiento.

Eje de fallo	Factores principales	Mediciones útiles	Consecuencia industrial
Pardeamiento enzimático	PPO, sustratos fenólicos, O ₂ , pH, centro de cobre, disrupción tisular	Actividad PPO; CIELAB L*, a*, b*; ΔE ₀₀ ; índice de pardeamiento; análisis de imagen	Pérdida del color verde, oscurecimiento superficial, rechazo del consumidor
Oxidación lipídica	LOX, lípidos insaturados, O ₂ , catalizadores metálicos, propagación radicalaria	Actividad LOX; índice de peróxidos; K232/K270; hexanal / aldehídos volátiles	Notas rancias o «apagadas», pérdida de aroma fresco, degradación de nutrientes
Deterioro de pigmentos	Degradación de clorofila, oxidación, acidificación, estrés de procesado	Clorofila a/b; ángulo de tono; croma	Pérdida del aspecto verde fresco con independencia del pigmento pardo visible
Agotamiento de reductores	Oxidación del ascorbato y de otras especies reductoras con el tiempo	Ácido ascórbico + dehidroascórbico; ORP; capacidad antioxidante (sólo como apoyo)	Pardeamiento posapertura tardío pero brusco al agotarse la reserva
Exposición al oxígeno	O ₂ del espacio de cabeza, OTR del envase, O ₂ disuelto, aperturas repetidas	O ₂ /CO ₂ del espacio de cabeza; OTR del envase; sensor óptico de O ₂ ; desafío con envase abierto	Aceleración tanto de la PPO como de la oxidación lipídica, especialmente tras la apertura

Tabla 1. Vías de pérdida de calidad oxidativa, mecanísticamente distintas pero interrelacionadas, en productos refrigerados de aguacate.

2.1. PPO: una enzima robusta en una matriz vulnerable

La PPO cataliza la oxidación de sustratos fenólicos a o-quinonas reactivas que posteriormente participan en reacciones no enzimáticas que originan polímeros oscuros. La manifestación visual depende de mucho más que de la concentración

enzimática: son relevantes la identidad de los sustratos, la disponibilidad de oxígeno, la disrupción celular, el pH y la presencia de reductores o inhibidores. La PPO del aguacate se ha caracterizado como especialmente difícil de controlar, y las revisiones específicas de esta fruta subrayan la extraordinaria persistencia del problema de pardeamiento (Toledo & Aguirre, 2017).

Los estudios bioquímicos clásicos demostraron un pH óptimo próximo a la neutralidad para extractos crudos de PPO de aguacate y pusieron de manifiesto diferencias considerables en la potencia de los inhibidores; la L-cisteína y el ácido ascórbico se encontraron entre los agentes más eficaces evaluados (Gómez-López, 2002). El guacamole industrial suele acidificarse muy por debajo de ese óptimo, lo cual resulta beneficioso, pero no equivale a eliminar la enzima. La acidificación reduce la actividad y puede influir en la coordinación del cobre; aun así, la PPO residual sigue siendo capaz de impulsar cambios de color durante almacenamientos prolongados, especialmente cuando aumenta la exposición al oxígeno.

2.2. LOX y fase lipídica: la parte del problema que los ensayos de color pueden pasar por alto

El aguacate es también una fruta con un elevado contenido lipídico. La pulpa de Hass suele contener una fracción importante de aceite rica en ácidos grasos insaturados, lo que genera un segundo reservorio de sustratos oxidables. La LOX del aguacate se ha purificado parcialmente y caracterizado; actúa sobre sustratos de ácidos grasos poliinsaturados y puede contribuir a la formación de hidroperóxidos y de aldehídos volátiles posteriores (Jacobo-Velázquez et al., 2010). Esto es relevante porque una formulación puede conservar el color visible y, aun así, perder frescura sensorial por oxidación lipídica.

Por tanto, la separación entre «estabilidad del color» y «estabilidad oxidativa» resulta artificial desde la perspectiva de la calidad del producto. Los guacamos comerciales tratados por HPP conservan un carácter sensorial fresco y verde deseable en comparación con los productos tratados térmicamente, pero sus perfiles volátiles incluyen compuestos alifáticos como hexanal y trans-2-hexenal, relevantes para el estado oxidativo y la discriminación sensorial (Alañón et al., 2022). En consecuencia, un programa riguroso de formulación debe combinar las métricas de color con, al menos, un criterio de oxidación lipídica siempre que se evalúe un antioxidante de fase grasa.

3. La paradoja del HPP: microbiológicamente estable, bioquímicamente activo

El HPP se describe con frecuencia como «pasteurización en frío», una simplificación comercial útil que puede ocultar una distinción mecanística crítica. La letalidad microbiana y la inactivación enzimática no siguen las mismas relaciones presión-tiempo. Las enzimas son proteínas compactas y pueden mostrar una resistencia marcada a la presión; en determinados sistemas, la presión altera la estructura cuaternaria o la compartimentación celular sin destruir de forma irreversible el centro catalítico. En el aguacate, el resultado práctico es claro: un programa de presión suficiente para lograr un control microbiano intenso puede dejar actividad de PPO y LOX suficiente para determinar el color y el aroma durante el almacenamiento posterior.

López-Malo et al. (1998) demostraron que el aumento de la presión y la disminución del pH inicial reducían la PPO residual en puré de aguacate. En su sistema, un puré con actividad residual de PPO inferior aproximadamente al 45 %, almacenado a 5 °C, mantuvo un color aceptable durante al menos 60 días. Palou et al. (2000), trabajando directamente con guacamole, observaron que el aumento del tiempo de tratamiento y los ciclos de presión reducían tanto la PPO como la LOX. La LOX podía inactivarse bajo condiciones más intensas, mientras que la menor actividad residual de PPO descrita fue de aproximadamente un 15 % tras cuatro ciclos a 689 MPa con periodos de mantenimiento de 5 min. Estos estudios establecieron dos principios duraderos: la presión puede contribuir de forma significativa a la protección del color, pero la PPO constituye el objetivo más difícil; y presión, pH, tiempo y ciclado interactúan entre sí.

La viabilidad comercial modifica la ecuación. Jacobo-Velázquez y Hernández-Brenes (2010) estudiaron pasta de aguacate tratada a 600 MPa durante 3 min, un programa industrial mucho más realista que los tratamientos prolongados con múltiples ciclos. Las actividades residuales de PPO y LOX fueron del 50,72 % y 55,16 %, respectivamente. Más importante aún, ambas enzimas recuperaron actividad durante el almacenamiento, alcanzando valores próximos a los de la pasta fresca alrededor de los días 10-15 antes de volver a disminuir. Este hallazgo desplaza la pregunta desde «¿cuánta enzima sobrevive al HPP?» hacia «¿cómo se comporta la enzima residual a lo largo de toda la vida refrigerada?».

Trabajos recientes confirman que 600 MPa durante 3 min pueden mejorar notablemente la estabilidad refrigerada, especialmente cuando el puré se acidifica. Uzunlu (2024) describió una ampliación de la estabilidad desde aproximadamente una semana en puré no tratado hasta 28 días en puré tratado mediante altas presiones hidrostáticas y

conservado a 4 °C, con mejor control del color y de la calidad microbiológica. Estos resultados respaldan el HPP como barrera central, pero no deben interpretarse como evidencia de que la protección mediante ingredientes sea innecesaria. Más bien muestran que el HPP genera un punto de partida bioquímico de menor riesgo sobre el que pueden actuar la formulación y el envase.

Estudio	Matriz / tratamiento	Observación clave	Inferencia industrial
López-Malo et al., 1998	Puré de aguacate; 345–689 MPa; pH 3,9–4,3	La PPO residual disminuyó al aumentar la presión y reducir el pH; el color mostró una fuerte relación con a^*	Presión y acidificación son sinérgicas; la actividad residual debe interpretarse junto con la temperatura de almacenamiento
Palou et al., 2000	Guacamole; HPP continuo / oscilatorio hasta 689 MPa	La LOX es más fácil de inactivar; una PPO residual de ~15 % sólo se alcanzó con ciclado intensivo	Un HPP comercialmente viable puede no lograr una inactivación casi completa de la PPO
Jacobo-Velázquez & Hernández-Brenes, 2010	Pasta de aguacate; 600 MPa, 3 min, 4 °C	~51 % de PPO y ~55 % de LOX residuales; ambas se reactivaron durante el almacenamiento	Los datos enzimáticos del día 0 pueden infraestimar el riesgo oxidativo al final de la vida útil
Woolf et al., 2013	Rodajas de aguacate; HPP	PPO/POD en gran medida no inactivadas; se observaron efectos estructurales y fisiológicos	La respuesta al HPP depende de la estructura tisular y del estado de la matriz
Jacobo-Velázquez et al., 2013	Puré de aguacate + extractos naturales; 600 MPa, 3 min	Los extractos botánicos mostraron efectos divergentes sobre PPO/LOX; el romero podía aumentar la actividad aparente de PPO	Cribar los botánicos en la matriz real; los ensayos antioxidantes son insuficientes
Alañón et al., 2022	Guacamole comercial HPP frente a guacamole térmico	El HPP preservó mejor la identidad sensorial fresca/verde; los perfiles volátiles fueron distintos	La protección de la calidad debe incluir aroma y oxidación de volátiles, no sólo color
Uzunlu, 2024	Puré de aguacate acidificado; 600 MPa, 3 min	Las altas presiones hidrostáticas mejoraron el color y la estabilidad microbiológica durante 28 d a 4 °C	El HPP es una barrera central eficaz, pero sigue requiriendo validación específica en la matriz

Tabla 2. Evidencia seleccionada específica de aguacate sobre HPP y sus implicaciones para la formulación.

4. Por qué «antioxidante» no es sinónimo de «antipardeamiento»

La industria alimentaria suele cribar extractos naturales mediante ensayos químicos de capacidad antioxidante y asumir después que una elevada capacidad de captación de radicales se traducirá en una mejor conservación del color. En el aguacate, esta lógica puede fallar. La PPO necesita sustratos fenólicos. Un extracto botánico rico en compuestos fenólicos reductores puede captar radicales en un ensayo in vitro y, al mismo tiempo, aportar sustrato adicional para la PPO dentro de la matriz alimentaria. La dirección del efecto neto depende de la composición del extracto, su concentración, solubilidad, distribución entre fases, pH y actividad del sistema enzimático endógeno.

La evidencia específica en aguacate hace esta paradoja especialmente evidente. Jacobo-Velázquez et al. (2013) evaluaron extractos antioxidantes naturales en puré de aguacate tratado mediante altas presiones hidrostáticas. Aunque los extractos se seleccionaron por su potencial antioxidante, sus efectos bioquímicos fueron divergentes. Los sistemas que contenían romero podían aumentar la actividad aparente de la PPO, en consonancia con la posibilidad de que determinados constituyentes fenólicos actúen como sustratos enzimáticos, mientras que el tomillo mostró un mejor comportamiento respecto a la estabilidad relacionada con LOX/hexanal. La conclusión no es que el romero sea intrínsecamente inadecuado, sino que «antioxidante natural» es un descriptor químico demasiado amplio para predecir el comportamiento antipardeamiento en aguacate.

Esta distinción debería modificar la forma en que se desarrollan para guacamole los extractos de té verde, oliva, romero, uva, frutos rojos u otras fuentes ricas en polifenoles. El cribado inicial debería incluir cinética de PPO o, como mínimo, pardeamiento de la matriz bajo oxígeno controlado y pH equiparado. Los extractos que oscurezcan la matriz, aumenten a^* o aceleren ΔE_{00} pese a presentar una elevada capacidad de captación de radicales deben descartarse o redirigirse hacia aplicaciones en la fase lipídica. Cuando se mantenga un sistema polifenólico, su contribución sensorial —amargor, astringencia, notas herbales y color intrínseco— debe evaluarse a las mismas concentraciones empleadas para demostrar eficacia.

EL PRESUPUESTO DE ESTABILIDAD OXIDATIVA EN GUACAMOLE HPP

La calidad depende del balance entre la presión oxidativa residual y la capacidad defensiva remanente a lo largo del tiempo

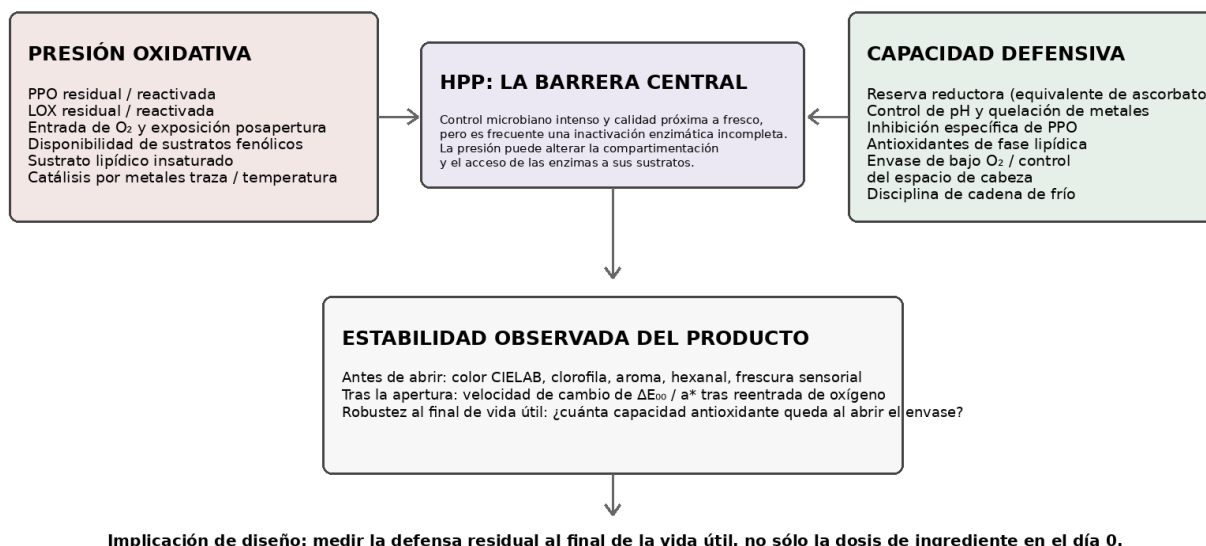


Figura 1. «Presupuesto de estabilidad oxidativa» propuesto en esta revisión. El marco es conceptual y no un modelo matemático validado. La estabilidad se considera el balance dependiente del tiempo entre la presión oxidativa y la capacidad defensiva remanente; el HPP reduce varios riesgos, pero no elimina el sistema bioquímico.

5. Clases de intervención: qué puede y qué no puede hacer cada barrera

5.1. Agentes reductores y concepto de reserva reductora residual

El ácido ascórbico es uno de los agentes antipardeamiento más conocidos porque puede reducir las o-quinonas hacia sus precursores fenólicos e interrumpir la formación visible de pigmentos. Sin embargo, en términos prácticos, el ascorbato es sacrificial: se consume a medida que ejerce su función. Por ello, una formulación puede mostrar un color inicial excelente y fracasar bruscamente una vez agotado el reservorio reductor. En guacamole refrigerado de larga vida útil, la variable relevante no es únicamente la dosis equivalente de ascorbato en el momento de fabricación, sino la reserva reductora residual cuando se produce la exposición al oxígeno.

Esto resulta especialmente importante después de la apertura. Si un producto sin abrir ha consumido la mayor parte de su reserva reductora durante la distribución, la primera entrada importante de oxígeno puede exponer una PPO activa con escasa defensa química remanente. Este mecanismo ofrece una explicación plausible para productos que parecen estables dentro del envase pero se oscurecen rápidamente tras la apertura por el consumidor o en restauración. Por tanto, el seguimiento analítico del ácido ascórbico y, cuando sea viable, del ácido dehidroascórbico durante la vida útil aporta más información que la dosis de formulación por sí sola.

Las fuentes naturales de vitamina C, como la acerola, pueden ser útiles cuando la estrategia de etiquetado favorece ingredientes de origen alimentario, pero deben estandarizarse en función del contenido activo equivalente en ascorbato y no dosificarse únicamente como gramos de polvo botánico. La composición del vehículo, el color intrínseco, los polifenoles acompañantes y la variabilidad entre lotes pueden, de otro modo, confundir la interpretación. El mismo principio se aplica a los sistemas derivados de cítricos y a los ingredientes fermentados: la contribución química activa debe cuantificarse si se pretenden extraer conclusiones mecanísticas.

5.2. Acidificación y quelación: contexto necesario, no respuesta independiente

La disminución del pH generalmente reduce la actividad de la PPO y puede mejorar el rendimiento de barreras complementarias. El ácido cítrico aporta además capacidad de quelación de metales. Los estudios históricos de HPP en aguacate muestran con claridad que la presión y un pH inicial bajo actúan de forma sinérgica (López-Malo et al., 1998).

Sin embargo, la acidificación indiscriminada tiene un límite sensorial. Se espera que el guacamole conserve un perfil fresco y centrado en el aguacate; un exceso de acidez puede desplazar el producto hacia un perfil dominado por lima o incluso avinagrado, además de alterar la textura.

Por ello, un cribado de ingredientes correctamente diseñado debe separar los efectos del pH de los efectos específicos de cada ingrediente. Durante el cribado mecanístico, los sistemas candidatos deberían compararse, siempre que sea posible, a pH equivalente. Un segundo brazo experimental puede variar deliberadamente el pH para cuantificar el beneficio adicional de la acidificación. Sin esta separación, un extracto botánico o una mezcla propietaria puede parecer superior simplemente porque reduce el pH de la matriz entre 0,2 y 0,3 unidades más que el control.

5.3. Química de tioles: un patrón de alta eficacia con compromisos de formulación

La L-cisteína constituye un potente patrón antipardeamiento porque la química de los tioles puede interceptar quinonas e inhibir la formación de color. En aguacate fresco cortado, un baño que contenía un 2 % de L-cisteína, un 1 % de ácido cítrico y un 1 % de lactato cálcico resultó muy eficaz para conservar el color y la textura cuando se combinó con pulsos intensos de luz (Ramos-Villarroel et al., 2011). Sin embargo, en guacamole la cisteína puede resultar comercialmente menos atractiva debido a la posible aparición de notas azufradas, la percepción en el etiquetado y las interacciones de formulación. Por ello, su valor en desarrollo suele residir en servir como control positivo de referencia: si un sistema natural se aproxima al rendimiento de una referencia basada en cisteína sin sus inconvenientes sensoriales, ello constituye una evidencia significativa de eficacia.

5.4. Estrategias derivadas de Allium

Los extractos de Allium resultan especialmente interesantes porque su identidad sensorial puede ser compatible con el propio guacamole. Bustos et al. (2015) observaron que extractos de cebolleta, cebolla y determinadas Brassica reducían los cambios de color en pulpa de aguacate refrigerada y que el retraso del pardeamiento se correspondía con la inhibición de la PPO. El ácido ascórbico y la cebolleta se encontraron entre los tratamientos más eficaces para conservar los componentes verde/amarillo del color durante almacenamientos refrigerados prolongados. Esto no justifica el empleo arbitrario de extractos crudos de cebolla o ajo; más bien respalda un programa dirigido que utilice preparaciones estandarizadas, de calidad alimentaria, bajo color y bajo aroma, cuyo efecto pueda separarse de la contribución a la receta de la cebolla o el ajo ya presentes en muchos guacamoles.

5.5. Antioxidantes de fase lipídica: proteger una calidad que las medidas de color no pueden revelar

El alfa-tocoferol proporciona una demostración útil de por qué importa la protección específica por fases. En puré de aguacate mínimamente procesado, 100 ppm de alfa-tocoferol proporcionaron una protección de la fracción lipídica superior a 200 ppm de ácido ascórbico o 200 ppm de EDTA, con formación mínima de peróxidos y un periodo de inducción prolongado (Elez-Martínez et al., 2005). El experimento no fue un ensayo de guacamole tratado por HPP, pero demuestra que la oxidación lipídica puede modificarse de forma independiente.

Por tanto, en formulaciones industriales los tocoferoles u otros sistemas antioxidantes liposolubles deben evaluarse mediante criterios de fase lipídica —índice de peróxidos, K232/K270, hexanal o un marcador volátil validado— y no descartarse si su efecto sobre L^* , a^* o ΔE_{00} es modesto. Un sistema bifásico puede combinar una barrera acuosa reductora/anti-PPO con un antioxidante de fase lipídica. La solución óptima no es necesariamente el ingrediente que produce la muestra más verde en el día 1, sino la formulación que preserva conjuntamente el color, el aroma y la aceptabilidad del consumidor durante toda la vida útil prevista.

5.6. Candidatos de economía circular: sistemas antipardeamiento derivados del aguacate

El propio aguacate puede constituir una fuente futura de recursos antipardeamiento. Yepes-Betancur et al. (2025) describieron que un extracto fermentado de semilla de aguacate Hass inhibía competitivamente la PPO in vitro y retrasaba el pardeamiento de la pulpa de aguacate a niveles de aplicación relativamente bajos. El concepto es científicamente atractivo porque combina actividad con valorización de subproductos y podría respaldar desarrollos de economía circular.

Sin embargo, la distancia traslacional sigue siendo considerable. Los extractos derivados de semillas requieren estandarización composicional, evaluación toxicológica y de contaminantes, valoración sensorial, datos de estabilidad, clasificación regulatoria y análisis de libertad de operación antes de poder considerarse ingredientes alimentarios de uso habitual. La respuesta industrial apropiada no es, por tanto, la adopción inmediata, sino un programa de investigación controlado. La circularidad no elimina la necesidad de evidencia en materia de seguridad alimentaria y regulación.

Clase de intervención	Mecanismo principal	Fortalezas	Principales riesgos / limitaciones
Ascorbato / fuentes de vitamina C	Reduce quinonas; sostiene la reserva reductora	Encaje mecanístico directo; conocido; fácil de cuantificar	Agotamiento sacrificial; efectos ácidos/sensoriales; variabilidad botánica
Ácido cítrico / sistemas de citrato	Reducción del pH; quelación de metales	Sinergia con HPP y reductores	Límite sensorial; puede enmascarar en lugar de identificar efectos específicos del ingrediente
L-cisteína / tioles	Captura de quinonas; inhibición de PPO	Eficacia muy elevada como patrón de referencia	Notas azufradas; percepción del etiquetado; interacciones de formulación
Extractos de Allium	Inhibición de PPO / efectos redox según composición	Compatibilidad sensorial con guacamole; evidencia específica de aguacate prometedora	Variabilidad; intensidad aromática; requiere estandarización
Botánicos ricos en polifenoles	Captación de radicales; posible quelación de metales	Posicionamiento natural; amplia actividad oxidativa	Pueden convertirse en sustratos de PPO; color, amargor, astringencia
Tocoferoles / antioxidantes lipídicos	Acción antioxidante lipídica interruptora de cadena	Actúa sobre la fracción oleosa del aguacate y la estabilidad del aroma	Efecto directo limitado sobre PPO; importan la dispersión y la distribución entre fases
Extractos de semilla de aguacate	Potencial inhibición directa de PPO; circularidad	Narrativa derivada del aguacate; evidencia emergente de eficacia	Lagunas regulatorias, toxicológicas, de estandarización y sensoriales
Gestión del oxígeno	Reduce el cosustrato para PPO/LOX y la propagación radicalaria	Actúa sobre múltiples vías oxidativas	Coste del envase; ineficaz tras la apertura si no queda defensa residual

Tabla 3. Interpretación mecanística de las clases de intervención candidatas.

6. Oxígeno y envase: el coformulante ausente

El oxígeno no es una variable ambiental pasiva en el guacamole; es un reactivo. La PPO requiere oxígeno molecular, la química de la LOX depende del oxígeno y la oxidación lipídica no enzimática se acelera a medida que el oxígeno se hace disponible. En consecuencia, el oxígeno del espacio de cabeza, el oxígeno disuelto, la tasa de transmisión de oxígeno (OTR) del envase, la geometría de llenado y el comportamiento de apertura por parte del consumidor forman parte de cualquier estrategia antipardeamiento.

Las condiciones de vacío o de oxígeno reducido se han asociado desde hace tiempo con una mejor estabilidad oxidativa de los sistemas de aguacate. Elez-Martínez et al. (2005) observaron una mejor conservación de los índices de calidad lipídica bajo vacío. En productos HPP, la selección del envase desempeña un papel adicional, ya que el producto suele procesarse en su envase flexible final. Una concentración inicial baja de oxígeno en el espacio de cabeza resulta útil, pero no debe confundirse con resistencia una vez abierto el envase.

El estado posterior a la apertura es mecanísticamente diferente. Cambia la relación superficie/volumen, el oxígeno puede difundirse rápidamente en el tejido disgregado, la mezcla realizada por el consumidor puede renovar repetidamente el contacto con el oxígeno y la formulación puede encontrarse en una fase avanzada de su vida química. Por ello, un protocolo robusto de desarrollo debería someter las muestras a un desafío tras la apertura no sólo en el día 0, sino también a mitad y al final de la vida útil refrigerada prevista. El desafío tras la apertura al final de la vida útil resulta especialmente informativo porque combina el historial realista más intenso de agotamiento antioxidante con un aumento brusco de la disponibilidad de oxígeno.

7. El presupuesto de estabilidad oxidativa: un marco para las decisiones de formulación

La evidencia revisada puede organizarse como un «presupuesto de estabilidad oxidativa» dependiente del tiempo. Se trata deliberadamente de un modelo conceptual y no de una ecuación validada. La idea central es que cada envase comienza con una capacidad defensiva finita y una presión oxidativa determinada. El HPP modifica ambos lados de ese balance: reduce el riesgo microbiano y puede disminuir la actividad enzimática, pero también altera las estructuras celulares y puede aumentar el contacto entre enzimas, sustratos y componentes intracelulares. Los sistemas de ingredientes añaden capacidad reductora, inhibitoria, quelante o protectora de la fase lipídica. El envase limita la entrada de oxígeno. El almacenamiento consume progresivamente estas defensas.

En el lado de la presión del presupuesto se sitúan la PPO residual y reactivada, la LOX residual y reactivada, la entrada de oxígeno, la accesibilidad de los sustratos fenólicos, el sustrato lipídico insaturado, la catálisis por metales traza y las desviaciones de temperatura. En el lado defensivo se encuentran la reducción del pH, la quelación, la reserva reductora, la inhibición enzimática específica, los antioxidantes de fase lipídica, la baja permeabilidad al oxígeno y el control de la

cadena de frío. La calidad se mantiene aceptable mientras la capacidad defensiva combinada sea suficiente para mantener la velocidad de deterioro visual y sensorial por debajo del umbral de rechazo.

El marco explica varias observaciones que, de otro modo, podrían parecer contradictorias. Una dosis inicial elevada de ascorbato puede crear una gran defensa en el día 0 y, sin embargo, consumirse rápidamente. Un botánico polifenólico puede aumentar la capacidad antioxidante química y simultáneamente incrementar la carga de sustrato disponible para la PPO. Un sistema de tocoferoles puede parecer ineficaz si sólo se mide el color aunque esté retrasando de forma sustancial la oxidación lipídica. El HPP puede producir una baja actividad enzimática inicial seguida de reactivación durante el almacenamiento. Cada uno de estos casos representa una redistribución del presupuesto, no una contradicción.

Para la investigación industrial, la consecuencia experimental más útil es que el programa debe medir tanto las fuerzas que impulsan el deterioro como las defensas destinadas a contrarrestarlas. Esto reduce el riesgo de seleccionar ingredientes basándose en criterios correlacionados pero no causales.

8. Estrategia escalonada de desarrollo multibarrera para guacamole HPP

Un programa industrial debe ser lo suficientemente amplio como para aprovechar todas las palancas tecnológicas plausibles, pero también lo bastante disciplinado como para evitar un «cóctel» de ingredientes imposible de interpretar. La secuencia recomendada es cribado → confirmación del mecanismo → validación HPP → desafío tras la apertura → confirmación industrial. Un fabricante que disponga de varias tecnologías antipardeamiento, antioxidantes, acidificantes y bioprotectoras debería evaluarlas inicialmente como clases mecánicas y no como una única solución premezclada.

8.1. Fase I — Microcribado controlado

- Utilizar un único lote de aguacate y estandarizar madurez, contenido de materia seca/aceite, energía de mezclado, temperatura y tiempo desde la trituración hasta la medición.
- Incluir la formulación comercial vigente como verdadero control industrial, y no un «blanco» de laboratorio que la fábrica nunca produce.
- Incluir un patrón convencional ascorbato/citrato para definir el techo de rendimiento de un sistema reductor/acidificante conocido.
- Evaluar los sistemas naturales de vitamina C sobre una base equivalente de ascorbato; ensayar por separado los sistemas de conservación fresca anti-PPO; y evaluar los antioxidantes lipídicos mediante criterios de oxidación de la fase grasa.
- Igualar el pH entre formulaciones candidatas en el brazo mecánico para evitar confundir los efectos específicos del ingrediente con la acidificación.
- Cribar botánicos ricos en polifenoles a dosis bajas, con controles inmediatos de color y sensoriales, antes de incorporarlos a estudios HPP prolongados.
- Realizar exposiciones breves tras la apertura (por ejemplo, superficie controlada y contacto fijo con oxígeno) para identificar formulaciones que colapsen al exponerse al aire.

8.2. Fase II — Estudio de interacción con HPP

Los candidatos líderes deberían fabricarse después bajo un programa HPP idéntico y de relevancia industrial. Las mediciones inmediatamente antes y después del HPP deberían incluir pH, color CIELAB, PPO, LOX cuando esté disponible, reserva reductora y una línea basal de oxidación lipídica. El objetivo es identificar interacciones presión-ingrediente. Una formulación que muestre un comportamiento sólido antes del HPP pero pierda su protección tras la presión no debería avanzar basándose únicamente en datos de banco.

8.3. Fase III — Vida útil refrigerada y desafío tras la apertura al final de la vida útil

El almacenamiento en envase cerrado debería muestrearse en tiempo cero, fase inicial, mitad de vida y final de la vida útil declarada, con al menos un punto exploratorio posterior a la vida útil cuando las normas de seguridad alimentaria lo permitan. Para las mediciones destructivas deben utilizarse envases independientes. A edades seleccionadas —especialmente al final de la vida útil— se abrirán envases nuevos y se seguirán durante 0, 2, 6, 12, 24 y 48 h bajo refrigeración controlada. Un brazo independiente de abuso térmico puede ser informativo, pero no debe sustituir la condición primaria validada de cadena de frío.

8.4. Jerarquía analítica

No todos los laboratorios de desarrollo necesitan disponer de todas las técnicas. La jerarquía siguiente distingue las métricas fundamentales para la toma de decisiones de las mediciones mecanísticas o avanzadas.

Nivel	Mediciones	Valor para la decisión
Núcleo	L*, a*, b*, ΔE_{00} , tono/croma; pH; fotografía estandarizada; análisis sensorial entrenado	Determina directamente el éxito visual/sensorial y es viable para el desarrollo rutinario
Mecanístico	Actividad PPO; ácido ascórbico/dehidroascórbico; ORP; O ₂ /CO ₂ del espacio de cabeza	Explica por qué una formulación funciona o fracasa y predice la robustez tras la apertura
Protección lipídica	Actividad LOX; índice de peróxidos; K232/K270; hexanal o volátiles seleccionados	Necesario para valorar de forma adecuada las estrategias antioxidantes de fase oleosa
Avanzado	Clorofila/carotenoides; O ₂ disuelto; microscopía; perfil no dirigido de volátiles/metabolómica	Útil para resolver mecanismos y realizar una validación con calidad de publicación
Seguridad / vida útil	Recuentos aerobios, levaduras/mohos, patógenos relevantes y pruebas de desafío según el riesgo del producto	Confirma que la reformulación de calidad no compromete la validación microbiológica

Tabla 4. Jerarquía analítica recomendada para el desarrollo industrial.

8.5. Diseño estadístico: ir más allá de los valores p

Para la confirmación es preferible disponer de un mínimo de tres lotes independientes de producción. Un modelo de efectos mixtos con formulación, tiempo de almacenamiento y su interacción como efectos fijos, y el lote como efecto aleatorio, resulta más informativo que realizar ANOVA unidireccionales independientes en cada punto temporal. Cuando la apertura se repita dentro de una misma unidad experimental, la estructura de correlación debe modelizarse explícitamente. Los tamaños del efecto y los intervalos de confianza deben acompañar a los valores p.

El objetivo de formulación es intrínsecamente multiobjetivo. La retención del color, la estabilidad tras la apertura, la neutralidad sensorial, la protección lipídica, la aceptabilidad del etiquetado, la viabilidad regulatoria y el coste pueden ejercer presiones en direcciones diferentes. Una función de deseabilidad o una matriz de decisión ponderada y preespecificada puede hacer transparente este compromiso. Es fundamental que el umbral de aceptación de ΔE_{00} se calibre frente al rechazo visual/sensorial en la matriz real de guacamole, en lugar de adoptar como universal un valor procedente de alimentos no relacionados.

9. Etiqueta limpia y realidad regulatoria

La etiqueta limpia constituye un potente objetivo comercial, pero no una categoría científica universal. La investigación sobre consumidores ha mostrado repetidamente que el término carece de una definición objetiva única y se interpreta mediante conceptos como «natural», listas cortas de ingredientes y ausencia de aditivos poco familiares (Asioli et al., 2017). Por ello, los desarrolladores de producto deben evitar utilizar «etiqueta limpia» como mecanismo de acción. Se trata de una restricción de comunicación superpuesta a la química, la seguridad y la regulación.

En la Unión Europea, la función tecnológica sigue siendo central para la clasificación de los aditivos. El Reglamento (CE) n.º 1333/2008 define los antioxidantes como sustancias que prolongan la vida útil al proteger los alimentos frente a la oxidación, incluidos el enranciamiento y los cambios de color. El origen vegetal no convierte automáticamente un extracto tecnológicamente activo en un ingrediente alimentario convencional; la selectividad de la extracción, la composición, la función prevista y las condiciones de uso pueden modificar su tratamiento regulatorio. Por tanto, para los botánicos empleados en guacamole debe realizarse una revisión de clasificación jurídica antes de formular alegaciones comerciales, especialmente cuando se utilicen extractos altamente estandarizados.

Esta realidad regulatoria refuerza, en lugar de debilitar, la necesidad de un desarrollo basado en mecanismos. Un sistema capaz de lograr una estabilidad adecuada mediante concentraciones más bajas, fuentes alimentarias familiares o una vía de declaración más favorable aporta valor comercial, pero sólo después de haber demostrado su eficacia en el proceso real del producto. A la inversa, un ingrediente «natural» que agrava el pardeamiento o compromete la calidad sensorial no constituye una solución técnicamente más limpia por el mero hecho de tener origen botánico.

10. Prioridades de investigación

- Cuantificar la relación entre la reserva reductora residual al final de la vida útil y la cinética de pardeamiento tras la apertura.
- Determinar cómo modifica el HPP la distribución y accesibilidad de PPO, LOX, compuestos fenólicos y sustratos de la fase oleosa a lo largo del tiempo.
- Desarrollar cribados estandarizados basados en la matriz que identifiquen cuándo los polifenoles botánicos actúan como sustratos de la PPO en lugar de como inhibidores.
- Comparar sistemas antioxidantes bifásicos (reductor/anti-PPO acuoso + antioxidante de fase lipídica) frente a formulaciones de barrera única.
- Integrar el oxígeno del espacio de cabeza y la OTR del envase en los modelos de vida útil, en lugar de considerar el envase como una variable fija de fondo.
- Validar protocolos posapertura relevantes para el consumidor en formatos minoristas y de restauración, incluida la apertura y mezcla repetidas.
- Establecer expedientes toxicológicos, composicionales y regulatorios para extractos derivados de subproductos del aguacate antes de comercializar conceptos de economía circular.
- Utilizar enfoques multiómicos de forma selectiva para identificar firmas bioquímicas capaces de predecir el colapso del color antes de que sea visualmente evidente.

11. Conclusiones

El problema moderno del guacamole no es simplemente el «pardeamiento por PPO», y el HPP no constituye una solución bioquímica completa. Los productos de aguacate siguen siendo sistemas oxidativos dinámicos después del tratamiento por presión. La PPO y la LOX pueden sobrevivir a programas HPP comercialmente realistas, la actividad residual puede cambiar durante el almacenamiento y la respuesta final de calidad depende del oxígeno, la accesibilidad de los sustratos, la reserva reductora, la protección lipídica, el pH, el envase y la temperatura.

Por tanto, el principio de formulación más importante es la especificidad. Los agentes reductores deben evaluarse según el tiempo durante el que persiste su reserva; los antioxidantes botánicos deben cribarse por su posible comportamiento como sustratos de la PPO; los antioxidantes lipídicos deben valorarse mediante criterios de fase grasa; la acidificación debe separarse analíticamente de los efectos específicos de los ingredientes; y el envase debe tratarse como una barrera activa. Una formulación estable en un envase cerrado en el día 7 no es necesariamente robusta después de abrirse en el día 35.

El «presupuesto de estabilidad oxidativa» proporciona un lenguaje práctico para integrar estas variables. Su pregunta central no es cuánto antioxidante se añade durante la fabricación, sino si permanece suficiente capacidad defensiva cuando la presión oxidativa alcanza su máximo. En el guacamole refrigerado tratado por HPP, ese máximo puede producirse no durante el procesado, sino en el momento en que se abre un envase envejecido. Diseñar productos alrededor de esta realidad ofrece una vía más racional hacia una vida visual más prolongada, mejor retención del aroma, menor desperdicio e innovación creíble de etiqueta limpia.

Declaraciones y notas de publicación

Conflicto de intereses. El autor está vinculado a INTABIOTECH S.L., empresa activa en el desarrollo de ingredientes alimentarios y formulaciones. En esta revisión no se presentan datos propietarios de eficacia comercial como evidencia científica. Cualquier declaración específica exigida por la revista deberá completarse antes del envío.

Financiación. En este manuscrito de trabajo no se declara ninguna fuente de financiación.

Disponibilidad de datos. No procede; este artículo es una revisión crítica y una perspectiva conceptual y no presenta un nuevo conjunto de datos experimentales.

Tipo de revisión. Revisión narrativa crítica. El artículo prioriza la evidencia experimental específica de aguacate y la literatura reciente más amplia sobre HPP, pardeamiento enzimático e inhibidores naturales. No se presenta como revisión sistemática ni como metaanálisis.

Referencias

- Alañón, M. E., Cádiz-Gurrea, M. L., Oliver-Simancas, R., Leyva-Jiménez, F. J., Arráez-Román, D., & Segura-Carretero, A. (2022). Quality assurance of commercial guacamoles preserved by high pressure processing versus conventional thermal processing. *Food Control*, 135, 108791. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108791>
- Asioli, D., Aschemann-Witzel, J., Caputo, V., Vecchio, R., Annunziata, A., Næs, T., & Varela, P. (2017). Making sense of the “clean label” trends: A review of consumer food choice behavior and discussion of industry implications. *Food Research International*, 99, 58–71. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.022>
- Bustos, M. C., Mazzobre, M. F., & Buera, M. P. (2015). Stabilization of refrigerated avocado pulp: Effect of Allium and Brassica extracts on enzymatic browning. *LWT - Food Science and Technology*, 61(1), 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.11.026>
- Elez-Martínez, P., Soliva-Fortuny, R. C., Gorinstein, S., & Martín-Belloso, O. (2005). Natural antioxidants preserve the lipid oxidative stability of minimally processed avocado purée. *Journal of Food Science*, 70(5), S325–S329. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb09986.x>
- European Parliament and Council. (2008, consolidated version current in 2026). Regulation (EC) No 1333/2008 on food additives. *Official Journal of the European Union*.
- Gómez-López, V. M. (2002). Some biochemical properties of polyphenol oxidase from two varieties of avocado. *Food Chemistry*, 77(2), 163–169. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(01\)00331-4](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00331-4)
- Goraya, R. K., Singla, M., Kaura, R., Singh, C. B., & Singh, A. (2025). Exploring the impact of high pressure processing on the characteristics of processed fruit and vegetable products: A comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 65(20), 3856–3879. <https://doi.org/10.1080/10408398.2024.2373390>
- Guzmán-Armenteros, T. M., Echeverría, A., Ruales, J., Ruiz-Medina, M., & Ramos-Guerrero, L. (2025). Enhancing the postharvest stability of Hass avocado through vacuum impregnation with antioxidants. *Foods*, 14(21), 3633. <https://doi.org/10.3390/foods14213633>
- Hamdan, N., Lee, C. H., Wong, S. L., Fauzi, C. E. N. C. A., Zamri, N. M. A., & Lee, T. H. (2022). Prevention of enzymatic browning by natural extracts and genome-editing: A review on recent progress. *Molecules*, 27(3), 1101. <https://doi.org/10.3390/molecules27031101>
- Jacobo-Velázquez, D. A., Hernández-Brenes, C., Cisneros-Zevallos, L., & Benavides, J. (2010). Partial purification and enzymatic characterization of avocado (*Persea americana* Mill, cv. Hass) lipoxygenase. *Food Research International*, 43(4), 1079–1085. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.01.021>
- Jacobo-Velázquez, D. A., & Hernández-Brenes, C. (2010). Biochemical changes during the storage of high hydrostatic pressure processed avocado paste. *Journal of Food Science*, 75(6), S264–S270. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01654.x>
- Jacobo-Velázquez, D. A., Castellanos-Dohnal, G., Caballero-Mata, P., & Hernández-Brenes, C. (2013). Biochemical changes during the storage of high hydrostatic pressure processed avocado puree in the presence of natural antioxidants. *CyTA - Journal of Food*, 11(4), 379–391. <https://doi.org/10.1080/19476337.2013.775185>
- López-Malo, A., Palou, E., Barbosa-Cánovas, G. V., Weltri-Chanes, J., & Swanson, B. G. (1998). Polyphenoloxidase activity and color changes during storage of high hydrostatic pressure treated avocado puree. *Food Research International*, 31(8), 549–556. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(99\)00028-9](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(99)00028-9)
- Palou, E., Hernández-Salgado, C., López-Malo, A., Barbosa-Cánovas, G. V., Swanson, B. G., & Weltri-Chanes, J. (2000). High pressure-processed guacamole. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 1(1), 69–75. [https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(99\)00002-8](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(99)00002-8)
- Ramos-Villarroel, A. Y., Martín-Belloso, O., & Soliva-Fortuny, R. (2011). Using antibrowning agents to enhance quality and safety of fresh-cut avocado treated with intense light pulses. *Journal of Food Science*, 76(9), S528–S534. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02410.x>
- Toledo, L., & Aguirre, C. (2017). Enzymatic browning in avocado (*Persea americana*) revisited: History, advances, and future perspectives. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(18), 3860–3872. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1175416>
- Tran, H. T. T., Tran, X. T. T., Huynh, H. D., Trinh, T. K., Liu, Y.-C., & Kuo, C.-H. (2026). Polyphenol oxidase inhibition for browning control in fruit and vegetable products: Molecular mechanisms, computational screening, and natural inhibitors. *Catalysts*, 16(8), 745. <https://doi.org/10.3390/catal16080745>
- Uzunlu, S. (2024). Determining the effect of high hydrostatic pressure on the refrigerated stability of avocado puree. *Food Production, Processing and Nutrition*, 6, 68. <https://doi.org/10.1186/s43014-024-00245-5>
- Woolf, A. B., Wibisono, R., Farr, J., Hallett, I., Richter, L., Oey, I., Wohlers, M., Zhou, J., Fletcher, G. C., & Requejo-Jackman, C. (2013). Effect of high pressure processing on avocado slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 18, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.02.011>
- Yepes-Betancur, D. P., Zapata-Vahos, I. C., Henao-Rojas, J. C., Martínez-Saldarriaga, J., Márquez-Cardozo, C. J., & Cadena-Chamorro, E. M. (2025). Inhibitory effect of fermented avocado seed extract (*Persea americana* Mill. cv. Hass) on polyphenol oxidase and its application as anti-browning agent in avocado, apple, and banana pulps. *Heliyon*, 11(4), e42588. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42588>

© 2026 INTABIOTECH S.L. — José M. López · Todos los derechos reservados.

Servicios Editoriales INTABIOTECH

Botiguers, 3 · 46980 · Paterna · Valencia · España

www.intabiotech.com