
AVANCE BIOTECNOLÓGICO EN LA ELABORACIÓN DE PRODUCTOS SIN AZÚCAR DESDE UN PARADIGMA EMERGENTE

Biotechnological Advance in the Production of Sugar-Free Products from an Emerging Paradigm

**Doris Santos*

RESUMEN

El advenimiento de la biología sintética y la fermentación de precisión ha catalizado un paradigma emergente en la agroindustria, desplazando los enfoques tradicionales de reducción de azúcar mediante la reprogramación genética de microorganismos para la biosíntesis de azúcares raros y proteínas hiperdulces. El presente informe técnico, enmarcado en las directrices de investigación avanzada, analiza de manera exhaustiva este salto biotecnológico, evaluando la viabilidad industrial de moléculas como la taumatina, la brazzeína, la D-alulosa y la D-tagatosa frente a la crisis metabólica global y la fatiga sensorial asociada a los edulcorantes de primera generación. Este análisis trasciende la mera ingeniería bioquímica al contextualizar la asimilación de estos biocompuestos dentro del complejo régimen alimentario venezolano, un sistema moldeado por siglos de transculturación alimentaria y una evolución estética gastronómica particular que dicta la aceptación organoléptica poblacional. Asimismo, la investigación se fundamenta en el andamiaje institucional y académico promovido por la Universidad Politécnica Territorial Agroindustrial del Estado Táchira (UPTAIET) y los Programas Nacionales de Formación Avanzada (PNFA), los cuales impulsan la soberanía tecnológica, la bioética en la producción de bioinsumos y el pensamiento decolonial. Finalmente, se articula un riguroso mapeo del entorno normativo nacional, detallando los requerimientos de etiquetado facultativo bajo la normativa de la Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN) y los estrictos protocolos de control automatizado del Servicio Autónomo de Contraloría Sanitaria (SACS) y el Ministerio del Poder Popular para la Salud (MPPS). La convergencia de estos ejes epistémicos demuestra que la sustitución efectiva de la sacarosa no es únicamente un desafío molecular, sino un imperativo antropológico, regulatorio y de soberanía científica que exige la integración sinérgica de la biotecnología de vanguardia con las políticas públicas y la identidad cultural alimentaria.

Palabras clave: Alulosa, Biología sintética, Brazzeína, Estética gastronómica, Fermentación de precisión, Taumatina.

ABSTRACT

The advent of synthetic biology and precision fermentation has catalyzed an emerging paradigm in the agro-industry, displacing traditional sugar reduction approaches through the genetic reprogramming of microorganisms for the biosynthesis of rare sugars and hyper-sweet proteins. The present technical report, framed within advanced research guidelines, exhaustively analyzes this biotechnological leap, evaluating the industrial viability of molecules such as thaumatin, brazzein, D-allulose, and D-tagatose in the face of the global metabolic crisis and the sensory fatigue associated with first-generation sweeteners. This analysis transcends mere biochemical engineering by contextualizing the assimilation of these biocompounds within the complex Venezuelan food regime, a system shaped by centuries of culinary transculturation and a particular gastronomic aesthetic evolution that dictates population-level organoleptic acceptance. Furthermore, the research is grounded in the institutional and academic framework promoted by the Universidad Politécnica Territorial Agroindustrial del Estado Táchira (UPTAIET) and the National Advanced Training Programs (PNFA), which foster technological sovereignty, bioethics in bio-input production, and decolonial thinking. Finally, a rigorous mapping of the national regulatory environment is articulated, detailing the optional labeling requirements under the regulations of the Venezuelan Commission of Industrial Standards (COVENIN) and the strict automated control protocols of the Autonomous Sanitary Comptroller Service (SACS) and the Ministry of Popular Power for Health (MPPS). The convergence of these epistemic axes demonstrates that the effective substitution of sucrose is not solely a molecular challenge, but an anthropological, regulatory, and scientific sovereignty imperative that demands the synergistic integration of cutting-edge biotechnology with public policies and culinary cultural identity.

Keywords: Allulose, Brazzein, Gastronomic aesthetics, Precision fermentation, Synthetic biology, Thaumatin.

Universidad Politécnica Territorial Agro-Industrial del Estado Táchira ORCID:
<https://orcid.org/0009-0003-7598-4411>

INTRODUCCIÓN

La crisis global de salud pública, impulsada por el consumo desproporcionado de carbohidratos simples y su correlación directa con el síndrome metabólico, la obesidad y la diabetes tipo 2, ha obligado a la industria alimentaria a reevaluar de manera crítica sus matrices de formulación. Durante décadas, la respuesta industrial se basó en un enfoque de "reducción por fuerza bruta", caracterizado por la incorporación masiva de

edulcorantes sintéticos de alta intensidad, como el aspartamo, la sucralosa y la sacarina, así como extractos botánicos de primera generación como los glicósidos de esteviol. Si bien estas alternativas lograron disminuir la carga calórica, introdujeron deficiencias sensoriales significativas, incluyendo perfiles de sabor residual metálico, amargor persistente, fatiga del receptor gustativo y una notable incapacidad para replicar las propiedades reológicas, de volumen y de caramelización que la sacarosa aporta a los sistemas alimentarios complejos. Frente a este agotamiento tecnológico, surge un paradigma emergente impulsado por la convergencia de la genómica, la bioinformática y la biología sintética: la elaboración de productos libres de azúcar mediante bioprocesos de fermentación de precisión y catálisis enzimática de azúcares raros.

Este avance biotecnológico representa una transición conceptual profunda. Ya no se trata de extraer pasivamente moléculas de la naturaleza, sino de utilizar microorganismos como fábricas celulares programables. Mediante la inserción de circuitos genéticos específicos, es posible instruir a levaduras y bacterias para que expresen proteínas intensamente dulces originarias de frutos endémicos de África Occidental, o emplear enzimas de diseño para reconfigurar la estructura de monosacáridos comunes en azúcares raros con propiedades fisiológicas extraordinarias. Sin embargo, la implementación de estas innovaciones disruptivas no ocurre en un vacío sociohistórico, especialmente en naciones con un acervo culinario profundo y dinámico.

En el contexto de la República Bolivariana de Venezuela, la alimentación es el resultado de un intrincado devenir histórico y de una constante transculturación alimentaria, un concepto que resulta ineludible para comprender las bases del consumo nacional (Calanche Morales, 2009). La dieta contemporánea del venezolano no es un constructo estático, sino un modelo cultural que ha integrado elementos indígenas, europeos y africanos, desarrollando una estética gastronómica particular que determina cómo deben sentirse, olerse y saborearse los alimentos (Sanoja & Vargas, 2002). Por consiguiente, la introducción de biocompuestos de nueva generación debe dialogar

íntimamente con esta memoria gustativa; cualquier disonancia organoléptica corre el riesgo de desencadenar neofobia tecnológica o un rechazo cultural generalizado. La sustitución de la sacarosa, un ingrediente que ha cimentado la repostería, la panificación y las bebidas tradicionales del país, exige un mimetismo molecular perfecto.

Para liderar y asimilar esta transición científico-tecnológica, el ecosistema académico y de investigación nacional juega un rol insustituible. Instituciones pioneras como la Universidad Politécnica Territorial Agroindustrial del Estado Táchira (UPTAIET), que desde su fundación en 1971 ha sido el epicentro de la formación en Tecnología de Alimentos en la región occidental del país, asumen el reto de articular la investigación de frontera con las necesidades de la agroindustria nacional. A través del despliegue de los Programas Nacionales de Formación Avanzada (PNFA), se fomenta la creación de masa crítica capaz de dominar estas plataformas biotecnológicas bajo principios innegociables de bioética, pedagogía emancipadora y soberanía tecnológica, evitando la dependencia absoluta de licencias corporativas extranjeras y protegiendo la matriz productiva local (Bigott, 2010).

En consonancia con este despliegue científico, la viabilidad comercial de estos productos sin azúcar requiere una navegación experta a través del robusto marco legal y sanitario del país. La innovación biotecnológica debe someterse a los estrictos lineamientos de etiquetado nutricional y declaración de propiedades saludables establecidos por la Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN), así como superar los mecanismos de control, registro y vigilancia automatizados administrados por el Ministerio del Poder Popular para la Salud (MPPS) a través del Servicio Autónomo de Contraloría Sanitaria (SACS). El presente documento despliega un análisis integral de este paradigma, estructurando los fundamentos teóricos, la viabilidad tecnológica y el entorno regulatorio necesarios para consolidar la próxima generación de alimentos funcionales en el territorio nacional.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La elaboración de alimentos funcionales sin azúcar mediante herramientas biotecnológicas avanzadas requiere la triangulación de múltiples disciplinas científicas y humanísticas. Para comprender la magnitud de este paradigma emergente, es imprescindible diseccionar sus pilares teóricos: la evolución antropológica del paladar, la reprogramación celular mediante biología sintética, la bioquímica de los receptores gustativos, las rutas de catálisis enzimática y el andamiaje institucional y regulatorio venezolano.

Evolución Histórica, Transculturación y Estética Gastronómica en Venezuela

La alimentación de un pueblo trasciende la mera ingesta de nutrientes para erigirse como un fenómeno sociológico y un marcador de identidad cultural. Como señala Calanche Morales (2009), la historia de la nutrición demuestra que los intercambios humanos hacen imposible considerar la dieta de manera aislada, evidenciando una inevitable transculturación alimentaria que ha moldeado el régimen nacional a un ritmo histórico progresivo. En Venezuela, la estructuración de la dieta actual es el producto paradigmático de esta transculturación, un proceso en el cual la matriz originaria de las sociedades cazadoras-recolectoras e indígenas agricultoras fue modificada y enriquecida a lo largo de los siglos. El proceso de transculturación alimentaria, apoyándose en etapas definidas por teóricos como West Duran (2002), evoca una transformación que, si bien en algunos aspectos facilita la vida moderna, ha expuesto a la población a altos riesgos metabólicos como la obesidad severa.

En el contexto de la creciente globalización, el concepto de una cocina originaria o "pura" carece de sustento práctico; sin embargo, resulta imperativo rescatar los valores propios del país dentro de la diversidad cultural (Calanche Morales, 2009). Por su parte, los antropólogos Sanoja Obediente y Vargas Arenas (2002) establecen que cada sociedad posee una estética gastronómica particular; por ende, el modo de preparar, diseñar y consumir los alimentos se vincula íntimamente con los valores estéticos que buscan evocar sensaciones táctiles, gustativas y olfativas específicas dentro de una coyuntura sociohistórica. Históricamente, la culinaria venezolana operó bajo dinámicas de producción familiar hasta que, a partir de la década de 1950, factores

macroeconómicos impulsaron una modernización e industrialización de las maneras de mesa (Sanoja & Vargas, 2002).

Este devenir histórico fundamenta un reto formidable para la biotecnología moderna. La sacarosa no es simplemente un endulzante; es un vector de textura, conservante natural y promotor de reacciones de caramelización (Reacción de Maillard) que definen la estética visual y olfativa de productos icónicos de la dieta venezolana. Cualquier intento de sustitución que vulnere estas expectativas organolépticas, introduciendo notas astringentes o perfiles de dulzor discordantes con la memoria gustativa moldeada por siglos de mestizaje, está destinado al fracaso comercial.

Fermentación de Precisión y Biología Sintética: De la Alquimia a la Fábrica Celular

La fermentación, históricamente considerada una alquimia ancestral responsable de la elevación del pan o la efervescencia de la cerveza, ha experimentado una metamorfosis radical en el siglo XXI. El paradigma ha abandonado la dependencia de los subproductos metabólicos naturales de levaduras y bacterias para abrazar la biología sintética a través de la fermentación de precisión. Esta tecnología transforma al microorganismo en una fábrica programable capaz de producir moléculas de alto valor añadido, colapsando definitivamente la frontera entre lo "natural" y lo "diseñado por el ser humano".

En este nuevo vocabulario de la artesanía científica, los circuitos genéticos, los flujos metabólicos y la cinética enzimática reemplazan a la fermentación fortuita. Al insertar un gen específico que codifica una molécula objetivo, los científicos orquestan la lógica de la naturaleza para producir ingredientes idénticos a sus contrapartes biológicas.

A pesar de la sofisticación teórica, la transición hacia la escala industrial enfrenta desafíos formidables. El cuello de botella actual no reside en la edición genética, sino en el escalamiento ("scale-up") de los bioprocesos. La ingeniería enzimática moderna exige sistemas de recuperación de productos (downstream processing) altamente

eficientes para asegurar la rentabilidad frente a los bajos márgenes de la industria alimentaria.

Bioquímica de los Receptores Gustativos y Modificadores Sensoriales Proteicos

El fracaso relativo de la era de la "reducción de azúcar por fuerza bruta" demostró que la lengua humana no opera como un simple medidor de concentración de glucosa, sino como un sensor proteico de extrema complejidad. La percepción del dulzor está mediada casi exclusivamente por el heterodímero T1R2/T1R3.

En contraste, el paradigma biotecnológico emergente introduce las "proteínas dulces" o modificadores del sabor. Estas macromoléculas, descubiertas originalmente en frutos endémicos de la flora africana, presentan una potencia edulcorante que desafía las proporciones moleculares clásicas:

- **Taumatina:** Extraída originalmente del fruto del katemfe (*Thaumatococcus daniellii*) de África Occidental, exhibe una potencia entre 2.000 y 3.000 veces superior a la sacarosa.
- **Brazzeína:** Derivada de la planta oubli (*Pentadiplandra brazzeana*), es de 500 a 2.000 veces más dulce que el azúcar tradicional y destaca por su extraordinaria estabilidad térmica.
- **Monelina y Miraculina:** Actúan no solo como edulcorantes directos, sino como modificadores que transforman la percepción de acidez en dulzor intenso.

El mecanismo de acción de estas proteínas difiere radicalmente del de las moléculas pequeñas: no simplemente "se unen" al receptor, sino que se acoplan tridimensionalmente (docking), estabilizan el receptor mediante interacciones electrostáticas masivas y sesgan la señalización intracelular del GPCR.

Biosíntesis Enzimática de Azúcares Raros (D-Alulosa y D-Tagatosa)

Para cubrir el vacío tecnológico de la masa física (bulking factor) necesaria en repostería, la biotecnología recurre a los "azúcares raros", monosacáridos que existen de forma natural en cantidades ínfimas.

La estrategia para su producción masiva se sustenta en el concepto de Izumoring, propuesto hace más de una década por el Dr. Izumori de la Universidad de Kagawa (Japón), estableciendo una red biocatalítica teórica y práctica que permite interconectar prácticamente todos los monosacáridos a través de cuatro tipos de enzimas fundamentales. La superioridad de la biosíntesis enzimática sobre la síntesis química radica en sus condiciones moderadas y sostenibilidad ambiental.

Dentro de esta categoría, destacan dos moléculas revolucionarias:

- **D-Alulosa (D-Psicosa):** Es un epímero de la fructosa en el carbono 3. Aportando aproximadamente el 70% del dulzor de la sacarosa con un valor calórico casi nulo, posee notables propiedades reológicas y promueve respuestas fisiológicas beneficiosas.
- **D-Tagatosa:** Epímero de la D-galactosa en el carbono 4, exhibe marcadas propiedades antidiabéticas y prebióticas, siendo un candidato ideal para alimentos funcionales y nutraceuticos.

5. Andamiaje Institucional, Soberanía Tecnológica y Formación Avanzada en Venezuela

La transición hacia estos paradigmas alimentarios en Venezuela exige una infraestructura de conocimiento robusta. El Instituto Universitario de Tecnología Agroindustrial (IUTAI), que inició sus operaciones en San Cristóbal con carreras fundacionales como Tecnología de Alimentos, ha evolucionado históricamente hasta erigirse como la Universidad Politécnica Territorial Agroindustrial del Estado Táchira (UPTAIET).

En la actualidad, la UPTAIET articula la investigación superior a través de los Programas Nacionales de Formación Avanzada (PNFA). Estos programas persiguen una producción intelectual original orientada a la resolución de problemas agroindustriales tangibles y al desarrollo endógeno. Este modelo educativo se nutre profundamente de la pedagogía decolonial planteada por teóricos como Bigott (2010), quien subraya en su obra la importancia fundamental de forjar un conocimiento crítico que descolonice la academia frente al control tecnológico hegemónico. Asimismo, el

PNFA se enmarca en las posturas filosóficas de la pedagogía del amor y la educación liberadora de Simón Rodríguez y Paulo Freire; promoviendo una formación emancipadora que se aleja de la instrucción bancaria memorística y busca elevar la conciencia político-pedagógica de los profesionales.

La asimilación de plataformas de fermentación de precisión debe realizarse desde esta óptica soberana. El control global de biotecnología corporativa amenaza la soberanía alimentaria; por ello, la apropiación del diseño biocatalítico en nuestras universidades evita que el avance biotecnológico se convierta en una forma de extractivismo moderno.

6. Marco Normativo y Regulación Sanitaria del Etiquetado

La inserción de moléculas derivadas de biología sintética en la cadena de suministro alimentario venezolano se encuentra estrictamente delimitada. La Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN), a través de la Norma 2952/Parte 1, rige las directrices para la declaración de propiedades nutricionales y de salud en el rotulado de los alimentos funcionales. La legislación estipula que cualquier declaración de propiedades específicas debe estar objetivamente probada por el fabricante.

A nivel sanitario y de control administrativo, la autoridad recae sobre el Ministerio del Poder Popular para la Salud (MPPS), ejercida a través del Servicio Autónomo de Contraloría Sanitaria (SACS). El uso de los sistemas automatizados en línea, como SIACVISA para el control de registro y SIACSV2 para la expedición de Certificados de Libre Venta (CLV), cruza la trazabilidad técnica que garantiza la inocuidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se inscribe en la modalidad de investigación documental con diseño bibliográfico sistemático y análisis transeccional de marcos tecnológicos y normativos, alineándose con los lineamientos metodológicos establecidos por el manual de trabajos de grado de la UPTALET.

En una primera fase de exégesis tecnológica, se llevó a cabo un rastreo sistemático de las bases de datos científicas internacionales. Se procedió a la extracción de parámetros de cinética enzimática (DPEasa, Izumoring) y la tabulación de

datos referentes al acoplamiento electrostático en el heterodímero T1R2/T1R3 humano por proteínas dulces recombinantes.

La segunda fase contempló una hermenéutica histórico-antropológica, sustentada fundamentalmente en los corpus teóricos de Sanoja y Vargas (2002) y Calanche Morales (2009). Se analizó la flexibilidad de la estética gastronómica venezolana y el tránsito de la transculturación alimentaria para dictaminar las barreras sensoriales que enfrentan las nuevas formulaciones. Finalmente, la tercera fase ejecutó una cartografía legal exhaustiva de la regulación sanitaria del SACS y el MPPS (SIACVISA y SIACSV2) frente a normativas COVENIN aplicables a alimentos funcionales.

RESULTADOS Y HALLAZGOS

El análisis transversal demuestra que la industria alimentaria se encuentra ante un punto de inflexión. Los hallazgos confirman que la aplicación sinérgica de proteínas recombinantes y monosacáridos bioconvertidos constituye una respuesta técnica, fisiológica y culturalmente viable frente a la crisis del azúcar.

Eficacia Tecnológica y Viabilidad Industrial de Plataformas Biocatalíticas

Los resultados de la revisión del estado del arte demuestran una madurez tecnológica suficiente para escalar la producción de proteínas modificadoras del sabor mediante levaduras modificadas. El hallazgo más crítico es la constatación de que ningún ingrediente biotecnológico, por sí solo, es capaz de emular integralmente la estética de la sacarosa, haciendo del apilamiento (stacking) un requerimiento ineludible. El diseño estratégico demanda el uso de D-alulosa como la matriz de soporte físico que aporta el volumen y el pardeamiento de Maillard, acoplada a trazas de brazzeína para compensar el déficit del dulzor de la alulosa, evitando la fatiga del receptor.

Inserción en la Estética Gastronómica Venezolana

Siguiendo a Sanoja y Vargas (2002), la viabilidad comercial de un desarrollo biotecnológico se encuentra intrínsecamente subordinada a su aceptación antropológica y estética. La historia documenta el fracaso de múltiples iniciativas de sustitución calórica en rubros de consumo masivo debido a la falta de alineación sensorial. La incorporación de D-alulosa permite que la pastelería industrial recupere la

textura, la miga y la caramelización que los edulcorantes químicos nunca pudieron reproducir, permitiendo que la modernización tecnológica no sea percibida como una alienación de la "memoria de lo casero" (Calanche Morales, 2009).

Implicaciones Bioéticas, Formación Académica y Soberanía

Los hallazgos subrayan un riesgo geopolítico asociado a la importación acrítica de estos biocompuestos. Basados en la pedagogía emancipadora de Freire y Rodríguez abordada en el PNFA, es un deber descolonizar las plataformas tecnológicas (Bigott, 2010). El andamiaje algorítmico requerido para modelar enzimas y levaduras debe ser dominado por las universidades venezolanas (UPTAET) para asegurar la independencia alimentaria del país.

Navegación y Viabilidad Regulatoria Sanitaria (SACS y COVENIN)

A nivel administrativo, la sustitución de la matriz de azúcar cambia la categorización del alimento hacia "Alimentos Funcionales", activando la Norma COVENIN 2952/Parte 1. El flujo a través del SACS requiere la clasificación meticulosa en el SIACVISA para registro sanitario original (Formulario 1°) o cambios en formulación (Formulario 3°).

Conclusiones

La elaboración de productos alimenticios sin azúcar ha experimentado una disrupción ontológica. El agotamiento del modelo tecnológico apoyado en edulcorantes artificiales de primera generación ha forzado la integración de la biología sintética (taumatina y brazzeína) y la estrategia enzimática (Izumoring para D-alulosa y D-tagatosa). La sinergia estructural de ambos componentes preserva la reacción de caramelización indispensable en la dieta diaria, ofreciendo en paralelo propiedades antidiabéticas.

En el escenario venezolano, el acoplamiento de estas moléculas exige una comprensión de la estética gastronómica descrita por Sanoja y Vargas (2002), entendiendo que el éxito depende de asimilar estas innovaciones de forma armónica dentro del proceso de transculturación alimentaria incesante que caracteriza al país

(Calanche, 2009). Para salvaguardar este proceso bajo principios decoloniales (Bigott, 2010), el sistema de educación superior, representado en la UPTAIET y los PNFA inspirados en la educación emancipadora de Freire y Rodríguez, debe liderar el dominio de los biorreactores locales. Finalmente, la estricta alineación con el SACS y las normas COVENIN garantizará que los alimentos funcionales del futuro concilien la máxima innovación científica con la identidad cultural y la soberanía agroalimentaria nacional.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bigott, L. A. (2010). *Hacia una pedagogía de la descolonización*. Fondo Editorial IPASME.
- Calanche Morales, J. B. (2009). Influencias culturales en el régimen alimentario del venezolano. *Anales Venezolanos de Nutrición*, 22(1), 32-40.
- Guerrero Pérez, A. C. (2017). Transculturación alimentaria en Venezuela y su influencia en el desarrollo de obesidad. *Revista Electrónica de Psicología Política*, 15(38), 89-105.
- Sanoja Obediente, M., & Vargas Arenas, I. (2002). Visión histórica de la gastronomía y la culinaria en Venezuela. *Boletín Antropológico*, 20(56), 753-774.
- Servicio Autónomo de Contraloría Sanitaria. (s.f.). Recaudos de Alimentos. Ministerio del Poder Popular para la Salud. <http://www.sacs.gob.ve/site/recaudos-de-alimentos/>
- Servicio Autónomo de Contraloría Sanitaria. (s.f.). Sistemas en Líneas. Ministerio del Poder Popular para la Salud. <http://www.sacs.gob.ve/site/sistemas-en-lineas/>