

PERSPECTIVAS FUTURAS DE LA BIOFORTIFICACIÓN DE ALIMENTOS: LA ASOCIACIÓN CON MICROORGANISMOS DEL SUELO

FUTURE PERSPECTIVES OF FOOD BIOFORTIFICATION: THE ASSOCIATION WITH SOIL MICROORGANISMS

José Alberto **Gío-Trujillo**¹; Carlos Juan **Alvarado-López**²; Neith Aracely **Pacheco-López**³; Jairo **Cristóbal-Alejo**⁴ y Arturo **Reyes-Ramírez**⁴

Resumen

La problemática por la insuficiencia e inseguridad alimentaria afecta a cerca de 1000 millones de personas a nivel mundial, frecuentemente por la deficiencia de elementos minerales esenciales presentes en los alimentos, como el Hierro, Cobre, Yodo, Selenio y Zinc. Aunado a lo anterior, la poca fertilidad de los suelos, afecta la movilidad de nutrientes en el suelo y la dinámica de absorción de las plantas, influyendo directamente en su producción, calidad de cosecha y el inadecuado balance nutricional de la población. Una estrategia viable para

afrontar esta problemática es la biofortificación de cultivos, la cual tiene como objetivo mejorar el estado nutricional de los cultivos, al producir alimentos con alto valor nutricional en elementos minerales deficientes en la dieta de la población mundial. El presente artículo de revisión es un análisis acerca de lo que implica la biofortificación, su contexto actual y las iniciativas de los programas y políticas internacionales para la mejora de la nutrición, seguridad alimentaria y salud pública. Las perspectivas futuras de la biofortificación indagadas en esta revisión giran en torno al

¹ Doctorado en Ciencias en Agricultura Tropical Sustentable. Tecnológico Nacional de México, campus Conkal, Avenida Tecnológico s/n C.P. 97345, Conkal, Yucatán, México.

² Cátedras-CONACYT. Tecnológico Nacional de México, Campus Conkal, Avenida Tecnológico s/n C.P. 97345, Conkal, Yucatán, México. Departamento de posgrado.

³ Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño de del Estado de Jalisco. Departamento de posgrado. Tablaje Catastral 31264, Kim. 5.5, Carr. Sierra Papacal-Chuburna Puerto. Parque Científico. Tecnológico de Yucatán. C.P. 97302. Mérida, Yucatán, México.

⁴ Tecnológico Nacional de México, Campus Conkal, Avenida Tecnológico s/n C.P. 97345, Conkal, Yucatán, México. Departamento de posgrado.

enriquecimiento en compuestos naturales en hortalizas y frutas, asimismo, la factibilidad de biofortificación de cultivos alternativos por su rentabilidad, valor nutricional y su mayor aceptación en el mercado para consumo humano. El análisis acerca de las perspectivas futuras y los avances recientes en esta línea de investigación, se enfoca en obtener estrategias que incrementen la absorción de minerales y su biodisponibilidad en la planta para alcanzar un mayor beneficio, la práctica de aplicar microorganismos del suelo (micorrizas arbusculares y bacterias promotoras del crecimiento vegetal) se perfila como la estrategia con mayor accesibilidad al agricultor en todos los niveles de producción, reducción de costos e incremento de rendimientos, al mismo tiempo mejorarlas características nutricionales de los alimentos.

Palabras clave: cultivos alternativos, sostenibilidad, innovación, alimentos biofortificados.

Abstract

The problem of food insufficiency and insecurity affects close to 1 billion people worldwide, frequently due to the deficiency of essential mineral elements present in food, such as iron, copper, iodine, selenium and zinc. In addition, the low fertility of soils affects the mobility of nutrients in the soil and the dynamics of plant absorption, directly influencing their production, crop quality and

the inadequate nutritional balance of the population. A viable strategy to face this problem is crop biofortification, which aims to improve the nutritional status and value of crops by producing foods with high nutritional value in mineral elements that are deficient in the diet of the world's population. This review article is an analysis of what biofortification implies, its current context and the initiatives of international programs, institutions and policies for the improvement of nutrition, food security and public health. The future perspectives of biofortification explored in this review revolve around the enrichment of natural compounds in vegetables and fruits, as well as the feasibility of biofortification of alternative crops due to their profitability, nutritional value and their good acceptance in the market for human consumption. The analysis of future perspectives and recent advances in this lines of research, focused on obtaining strategies that increase mineral absorption and bioavailability in the plant to achieve greater benefit, the practice of applying soil microorganisms (arbuscular mycorrhizae and plant growth promoting bacteria) is emerging as the strategy with greater accessibility to the farmer at all levels of production, cost reduction and increased yields, while improving various nutritional characteristics of food.

Key words: Alternative crops; Sustainability; Innovation; biofortified foods.

INTRODUCCIÓN

Actualmente la crisis por insuficiencia e inseguridad alimentaria afecta a cerca de dos tercios de la población mundial (entre 720 y 811 millones de personas (FAO, 2020), causada principalmente por el acceso insuficiente de alimentos de calidad y con alto valor nutricional, frecuentemente deficiente en micronutrientes importantes, como el Hierro, Cobre, Yodo, Selenio y Zinc, en la ingesta diaria de la población (Shahzad *et al.*, 2013), donde se estima que cerca del 60% de las deficiencias minerales corresponde al Hierro, seguida del 30 % del Zinc y Yodo,

en contraste a la disponibilidad limitada de alimentos (Saltzman *et al.*, 2017). La dieta deficiente en minerales principalmente se presenta en mujeres embarazadas y niños, la cual no permite cubrir las necesidades requeridas para una dieta balanceada y son los causantes de la anemia nutricional, problemas inmunológicos, retardo en el crecimiento y desarrollo infantil, considerados los principales problemas a tratar en la salud pública en países sub-desarrollados (Hotz y Brown, 2004). A su vez, esta problemática trae consigo efectos negativos e influye en distintas dimensiones de la sociedad, destacando su influencia directa sobre factores sociales como la educación y salud pública, así como en factores económicos, al dificultar el crecimiento económico y el bienestar social de los diferentes sectores vulnerables a la desnutrición (Sida-Arreola *et al.*, 2015). Una estrategia para afrontar esta problemática y contribuir con el abastecimiento e inocuidad de alimentos es la biofortificación de cultivos, la cual, es una técnica que busca aumentar los contenidos de nutrientes minerales de los cultivos agrícolas, mediante el manejo agronómico con base en prácticas agrícolas como la fertilización del suelo química y orgánica, cruzamiento tradicional entre variedades o transgénesis, comúnmente denominada alimentos transgénicos, mejorando su estado y valor nutricional, al producir alimentos con alto valor nutricional o enriquecidos con ciertos compuestos naturales o minerales para mejorar la ingesta y de los mismos deficientes en la dieta humana (Mayer *et al.*, 2008). La biofortificación de alimentos desde sus inicios se ha desarrollado frecuentemente sobre alimentos como los granos, semillas y tubérculos (cereales, leguminosas y tubérculos) como arroz (*Oryza sativa*), yuca o cassava (*Manihot esculenta*), trigo (*Triticum aestivum*), mijo (*Pennisetum americanum*), frijol (*Phaseolus vulgaris*), maíz, (*Zea mays*) y papa dulce o camote (*Ipomoea batatas*) (Bouis *et al.*, 2011; Mallari, 2019), considerados prioritarios por su alto valor energético, proteico, mineral, sus tasas de rendimiento agrícola en todas las regiones del mundo y amplio consumo (Mayer *et al.*, 2008; Saltzman *et al.*, 2013). Por lo tanto, es considerada como una estrategia viable de intervención agrícola para incrementar la rentabilidad de los cultivos, sus rasgos agronómicos (productividad, rendimiento, nutrición vegetal, etc.) y valor nutricional (Bouis y Welch, 2010). Así como, involucra a la sostenibilidad económica por parte de los agricultores (relación beneficio-costos), directamente relacionado con su amplia aceptación en el mercado, demanda (Nestel *et al.*, 2006) y en el crecimiento de la economía familiar, regional y mundial (Qaim *et al.*, 2007). La presente revisión, es un análisis de información global, recabada por medio de una metodología de búsqueda en fuentes documentales y bases de datos actuales (\leq a 15 años de antigüedad) referentes a la biofortificación de alimentos, donde se indaga de manera narrativa en base de los principales resultados de revisiones, investigación científica de instituciones educativas y particulares para el sector privado, así como de informes de resultados de los principales programas internacionales, instituciones y asociaciones sociales. Por lo anterior, en esta

revisión hablaremos de los avances recientes referente a la biofortificación y metodologías que están aplicándose para incrementar la absorción de elementos minerales y su biodisponibilidad en las plantas para alcanzar un mayor beneficio nutricional.

La iniciativa de los programas de biofortificación para la mejora de la nutrición, seguridad alimentaria y salud pública a nivel mundial por parte de 15 centros de investigación (África Rice Center, Bioversity International, IRRI, CIIMYT, IITA, CIAT, ICARDA, CIFOR, CIP, WorldFish, ICRAF, IWNI, ILRI, ICRISAT) denominados, el sistema de investigación global CGIAR o *Consultative Group on International Agricultural Research* por su acrónimo en inglés, se han convertido en los principales referentes y pilares en la aplicación de la biofortificación de cultivos en zonas vulnerables del mundo, principalmente en África subsahariana, Medio Oriente, Asia menor, América latina (Centroamérica, América del sur) y el Caribe (Saltzman *et al.*, 2013). Por ejemplo, la CGIAR, vinculados con cerca de 37 países, apoyado financieramente por instancias públicas, fundaciones internacionales como la FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*), UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*), UNDP (*United Nations Development Program*), UNEP (*United Nations Environment Programmes*), los diversos programas de desarrollo y seguridad alimentaria como los objetivos de desarrollo sostenible de la Agenda 2030, Programa mundial de alimentos (WFP, *World Food Programme*) y Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS, *Climate Change, Agriculture and Food Security*) de las Naciones Unidas (*United Nations* por su acrónimo en inglés), han aportado las bases para el reforzamiento de investigaciones domésticas, científicas y producción en escala tradicional e industrial para la distribución y comercialización de semillas, granos y hortalizas biofortificadas en el mundo (Mallari, 2019). Asimismo, los programas internacionales de biofortificación de Harvest Plus, programas sociales para el desarrollo como Oxfam, SOCODEVI, GIZ (Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional en alemán), la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID, *United States Agency for International Development*), Agencia Suiza para Desarrollo y Cooperación (SDC, *Swiss Agency for Development and Cooperation*), el financiamiento privado (Aliko Dangote, entre otros), organizaciones multinacionales como el Banco mundial, Banco interamericano de desarrollo, Fondo Internacional para el desarrollo agrícola (IFAD, *International Fund for Agricultural Development*) y fundaciones (Bill y Melinda Gates, Fundación Ford, The McKnight Foundation, Fundación Rockefeller) fomentan la biofortificación de cultivos agrícolas en el mundo, principalmente en zonas vulnerables a la malnutrición, como una estrategia factible en busca de incrementar el valor nutricional de los alimentos, frecuentemente en α y β caroteno, vitaminas B, C,

aminoácidos, y minerales (Bouis y Saltzman, 2017), para promover su consumo como complementos alimenticios a niños, mujeres embarazadas o personas propensas a deficiencias nutricionales (Saltzman *et al.*, 2013).

En el sur de Asia, Medio oriente y África subsahariana, las tasas de desnutrición son consideradas la de mayor incremento globalmente (Ansari y Thapa, 2019; UNICEF, 2019). No obstante, en términos de biofortificación de alimentos, en estas zonas se desarrollan los principales avances en técnicas y aportaciones en productos agrícolas biofortificados en minerales y compuestos carotenoides frecuentemente en alimentos de cultivos básicos (Saltzman *et al.*, 2013; Bouis y Saltzman, 2017). Por ejemplo, en 2018 el gobierno de India manifestó el consumo obligatorio de arroz y mijo perla biofortificado con Provitamina A, Hierro y Zinc en desayunos de escuelas y programas públicos de desarrollo infantil para fomentar su aceptación y consumo, con el propósito de mejorar la deficiencia de ingesta de minerales y vitaminas en este grupo vulnerable (Mallari, 2019). Desde el 2003, las instituciones de investigación han sido determinantes en el avance y desarrollo de la biofortificación de alimentos de consumo básico en la región, como lo menciona Bouis y Welch, (2010) y Bouis y Saltzman, (2017), en datos recopilatorios en periodos de 2007-2013 y 2003-2016, respectivamente, principalmente en la producción de arroz, frijol y camote enriquecido con Provitamina A, Zinc y Hierro por medio de técnicas transgénicas y agrícolas impulsadas (Saltzman *et al.*, 2013). Para el continente asiático, las instituciones como WorldFish en Malasia, International Water Maanagement Institute(IWMI) en Sir Lanka, International Rice Research Institute (IRRI) en Filipinas, Center for International Forestry Research (CIFOR) de Indonesia, International Center for Agricultural Research in Dry Areas (ICARDA) de Líbano, International Crops Research Institute for the Semi-Arid Zonesin Tropical (ICRISAT) en India (Saltzman *et al.*, 2013), han impulsado el desarrollo de cultivos biofortificados en las regiones más vulnerables de Asia como Asia central, meridional, sureste y suroeste de Asia. Por ejemplo, el IRRI, ha fomentado el consumo del arroz enriquecido con Provitamina A, con denominado *arroz dorado* (Mallari, 2019) y en China, por parte del Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS), desde el 2010 ha promovido el consumo de camote biofortificado en Provitamina A y β -caroteno, principalmente en zonas de influencia como Pakistán, Tailandia, Sir Lanka, Malasia, Indonesia e India, (Saltzman *et al.*, 2013). A la vez, en África, instituciones como el International Institute of Tropical Agriculture (IITA) en Nigeria, África Rice Center (ARC) en Benín, International Livestock Research Institute (ILRI) y World Agroforestry Center (ICRAF) de Kenia, National Crops Resources Research Institute (NaCRRI) y National Agricultural Research Organization (NARO) en Uganda (Saltzman *et al.*, 2013) en constante interacción entre sí, han fomentado el consumo del camote de pulpa anaranjada (BPA), yuca amarilla y maíz (harina anaranjada) enriquecidos en zinc, hierro y Provitamina A,

evidenciando los resultados positivos de su consumo en niños de entre 5-13 años, considerados grupos vulnerables de mayor interés en África. Por lo que, la biofortificación de alimentos es una referencia para alcanzar la soberanía y seguridad alimentaria en las regiones más necesitadas de África como Nigeria, Etiopía, República Democrática Del Congo, Rwanda, Zambia, Malawi, Tanzania, Uganda, Mozambique, Ghana y Kenia (Bouis *et al.*, 2017).

En América Latina (Centroamérica, América del sur) y el Caribe, considerada como regiones vulnerables a la problemática de la inseguridad alimentaria y nutricional, tomadas en cuenta como zonas de intervención para la biofortificación de cultivos, de acuerdo a los indicadores del riesgo nutricional, consumo alimenticio, producción, indicadores sociales, económicos y geográficos (Monserrate Rojas *et al.*, 2009), en la cual, las principales deficiencias de micronutrientes en la región se presentan en Zinc, Hierro y vitamina A, donde cerca de 201, 644,347 habitantes presentan alguna deficiencia de estos tres nutrientes (Saltzman *et al.*, 2017). Según el consorcio Harvest Plus, los cultivos básicos como arroz, frijol, maíz, papa, yuca y camote, se han considerados cultivos prioritarios para su biofortificación en hierro, zinc, β -caroteno y/o lisina y triptófano, por su alto impacto dietético, económico, su rentabilidad (Pachón, 2010) y su frecuente consumo como fuentes importantes de carbohidratos (entre el 12 % y el 48 %) (López *et al.*, 2008). Desde el 2006 a 2020, la iniciativa para la red para la biofortificación de alimentos en América Latina ha liberado cerca de 46 variedades de cultivos básicos como el maíz, frijol y arroz enriquecidos con Hierro, Zinc y provitamina A, desarrollándose principalmente en 14 países por medio de programas sociales como el proyecto AgroSalud, FONTAGRO, ASOARSE (Asociación de Productores Agroecológicos del Pantano de Arce), cooperativas agrícolas y empresas de investigación del sector privado (PARAMO FARMS®), vinculadas con instituciones como el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Bioversity International-CIAT, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), Centro Internacional de la Papa (CIP) y Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) (AgroSalud, 2010). Adicionalmente, en vinculación con importantes centros universitarios, unidades gubernamentales y programas públicos, han reportado la distribución, consumo y evaluación de variedades nativas biofortificadas para un mayor impacto en las comunidades rurales, campesinas, agricultores familiares y beneficio en los hogares en zonas consideradas de marginación. Por ejemplo, se ha fomentado en la última década la siembra en pequeña y mediana producción y consumo diario de variedades nativas biofortificadas de quinua, lupino y amaranto en zonas andinas de Ecuador por parte del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), variedades de frijoles nativos en Nicaragua (Reyes *et al.*, 2020) y Panamá (IDIAP, 2016). Así como el desarrollo de variedades

convencionales biofortificadas de maíz, camote, arroz entre proyecto Agro Nutre Panamá, coordinado por el Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá (IDIAP) (IDIAP, 2016), orégano, maní (Fundación Valles, 2019) y arroz en Bolivia (Viruez *et al.*, 2016), Por su parte, en Brasil y Guatemala, se extiende la red de biofortificación de alimentos, BIOFORT a través de sus respectivas instancias de gobierno federal, el Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola (ICTA), la Cooperativa Agrícola Integral (ATESCATEL) y la Corporación Brasileña de Investigación Agropecuaria, EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, por su acrónimo en portugués), ha desarrollado investigación con respecto a la biofortificación de alimentos, generando cerca de 12 variedades convencionales y transgénicas de cultivos básicos y alternativos enriquecidas en Hierro, Zinc y Provitamina A, para su comercialización en América del sur (Colombia, Brasil, etc.), distribuyendo semillas biofortificadas con Hierro y Zinc en países de América central como Guatemala, El Salvador, Haití, Panamá y Nicaragua. Por lo antes expuesto las variedades referentes en resultados positivos en su contexto agrícola y nutricional son el maíz biofortificado ICTA HB-18^{ACP+Zinc}, ICTA HB-15^{ACP+Zinc}, frijol ICTAChorti^{ACM}, frijol caupí, trigo, arroyuca, calabaza y camote ICTA Dorado^{ACB}, ICTA Pacífico^{ACB} y BRS Amélia (BIOFORT, 2015; Saltzman *et al.*, 2013).

En México, la biofortificación de cultivos se ha convertido en un método potencialmente necesario para contribuir en la lucha con la problemática mundial de la desnutrición y seguridad alimentaria de las poblaciones rurales. Considerando principalmente el sur y sureste de México como zonas potenciales para la intervención en consumo de cultivos básicos (maíz y frijol) biofortificados con Zinc y Hierro (Ramírez-Jaspeado *et al.*, 2018; Ramírez-Jaspeado *et al.*, 2020). La vinculación con la biofortificación de alimentos y el sistema de investigación CGIAR, se relaciona principalmente con su más importante protagonista, el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) en sus dos programas agroalimentarios y de investigación en campo, el Programa de investigación del Maíz y Programa de investigación del Trigo. Además, de pertenecer durante el periodo 2017-2022, a las principales plataformas de soporte de información agroalimentaria global, con el fin de recabar, generar y compartir información (Plataforma en Macro datos en Agricultura y Plataforma de Excelencia en Mejoramiento) y la conservación de germoplasma (Plataforma del Banco de Germoplasma). Dicha intervención en el ámbito global gira en relación al desarrollo de germoplasma (recursos genéticos) y su interacción-colaboración (desarrollo estratégico, socioeconomía e intensificación sustentable) con pequeños productores de campo y políticas públicas frecuentemente en zonas de África, Sur de Asia y América latina, distribuidos en cerca de 89 países. Asimismo, el consorcio BIOFORMEX (Biofortificación de Cultivos Agrícolas Básicos en México), tiene el objetivo de difundir los hallazgos científicos de la biofortificación de alimentos básicos en

México, para su consumo y aceptación en poblaciones rurales. En términos de resultados, la biofortificación de cultivos ha tomado énfasis en el incremento del contenido mineral de leguminosas como *Phaseolus vulgaris* (frijol común), desarrollando más de 50 variedades mejoradas de frijol convencional negro, pinto, flor de mayo, bayo, alubia, peruano etc., enriquecidos en hierro (Sida-Arreola *et al.*, 2015). Así como, la intervención en *Vigna unguiculata* (frijol caupi o frijol pelón) para su biofortificación, importante cultivo en el sur sureste de México, por su alto valor nutricional (Calcio, Manganeso, Hierro y Zinc) (Guillén *et al.*, 2016) y nutracéutica (capacidad antioxidante y fenoles totales) (Morales *et al.*, 2020).

Recientemente, la biofortificación de cultivos se ha encaminado a cultivos alternativos (granos, semillas oleaginosas, frutas y verduras), es decir, cultivos no tradicionales, pero que ocupan un nicho en el mercado e importancia agrícola, desde cultivos hortícolas hasta frutales (Figura 1). La biofortificación de cultivos alternativos tiene el objetivo de incrementar su estado nutricional y tener una buena aceptación en el mercado para el consumo humano (Ayoub *et al.*, 2020). Lo que implica, aumentar en alimentos hortícolas y frutícolas los rasgos de las características organolépticas (sabor, textura, apariencia, etc.) y componentes esenciales para la salud humana como los carotenoides, por ejemplo, el α y β -caroteno, Zeaxantina, α y β -Criptoxantina, Luteína, Fitoeno, Violaxantina, Capsantina, el Licopeno, etc.) (Mélendez *et al.*, 2004) y el contenido de vitaminas (A, D, E, K, C, tiamina, niacina, B6, B12, y la biotina) en las raíces, hojas y en el fruto (Zheng *et al.*, 2020). En medida de los avances y desarrollo de la biofortificación a nivel mundial, las perspectivas futuras de la biofortificación gira en torno al enriquecimiento de alimentos en compuestos activos naturales como carotenoides (Giuliano, 2017), reconocidos como pigmentos liposolubles responsables del color de flores y frutos (verde, rojo, amarillo y anaranjado) en hortalizas, granos, semillas oleaginosas y frutas, donde se presentan su mayor distribución, concentración y variedad (Carranco *et al.*, 2011).



Figura 1. Cultivos alternativos y su importancia en el mercado de consumo.

En la Tabla 1, se muestran los principales compuestos carotenoides presentes en cultivos alternativos (hortalizas, cereales y frutales), considerados prioritarios para su biofortificación (Zheng *et al.*, 2020). Este enriquecimiento de alimentos en compuesto carotenoides consta en aumentar las concentraciones de los diversos compuestos esenciales carotenoides presentes en cultivos hortícolas (Ayoub *et al.*, 2020) y especies frutales como el mango, uvas, plátano y tomate (Garg *et al.*, 2018).

Tabla 1. Compuestos carotenoides en cultivos alternativos prioritarios a biofortificación

Principales compuestos carotenoides	Cultivos prioritarios a biofortificar
α y β -caroteno	<i>Lycopersicum esculentu</i> , <i>Manihot esculenta</i> , <i>Capsicum anuum</i> , <i>Linum usitatissimum</i> , <i>Brassica napus</i> , <i>Cucumis melo</i> , <i>Brassica oleracea</i> , <i>Musa spp</i>
Licopeno	<i>Lycopersicum esculentu</i>
Capsantina	<i>Lycopersicum esculentum</i> , <i>Manihot esculenta</i>
Astaxintina	<i>Daucus carota</i> , <i>Solanum tuberosum</i> , <i>Lactuca sativa</i> , <i>Glycine max</i> , <i>Brassica napus</i> , <i>Nicotiana tabacum</i>
Zeaxantina	<i>Lycopersicum esculentum</i> , <i>Manihot esculenta</i>
Fitoeno	<i>Lycopersicum esculentum</i>

Fuente: Zheng *et al.*, 2020.

En un análisis de los diversos productos agrícolas biofortificados en el mercado, son muchos los autores e instituciones de investigación que han implementado los diversos enfoques de la biofortificación de alimentos en cultivos alternativos. Prasad *et al* (2015), menciona a Bio-Cassava Plus (yuca rica en β -caroteno), Nutri-banana (rica en vitamina A), camote OSP (enriquecida con β -caroteno), Súper-brócoli (contiene 3 a 4 veces el sulforafano), lechuga modificada genéticamente con 25 a 35 % más de calcio, Garg *et al* (2018), recopila a las variedades mejoradas en comercialización como a la de uva, *PusaNavrang* con altos contenidos de sólidos solubles totales (carbohidratos, ácidos orgánicos, proteínas, grasas y minerales) y antioxidantes, el tomate “Sun Black” y “Galaxia negra” con mayores concentraciones de antocianinas en el mesocarpio, así como cinco variedades de plátano (Apantu, Bira, Pelipita, Lai y To’o) ricas en Provitamina A en Uganda, como las principales variedades mejoradas y comercializadas actualmente en África, Sudamérica, Israel, India y China. A continuación, en la Tabla 2 se presenta una recopilación de la evidencia científica y sus principales hallazgos significativos en el campo de la biofortificación en cultivos alternativos para la producción de alimentos enriquecidos con compuestos carotenoides y elementos minerales por enfoque de reproducción (cruzamientos tradicionales), transgénicos y manejo de la fertilización.

Tabla 2. Tabulación de cultivos alternativos biofortificados

Cultivo	Nutriente biofortificado	Institución o autor/año	Método empleado
<i>Lactuca sativa</i> (Lechuga)	Selenio y Yodo	Smolén <i>et al.</i> , 2019	Manejo agronómico
	Selenio	López-Gutiérrez <i>et al.</i> , 2015	Manejo agronómico
<i>Allium cepa</i> (cebolla)	Zinc	Almendros <i>et al.</i> , 2015	Manejo agronómico
<i>Cicer arietinum</i> (Garbanzo)	Zinc	Shivay <i>et al.</i> , 2015	Manejo agronómico
<i>Musa acuminata</i> (Plátano malayo)	Hierro β -caroteno, Provitamina A	IITA, Bioveraity (Congo, Nigeria, Camerún y Burundi)	Manejo agronómico y transgénesis

	Selenio	Bañuelos <i>et al.</i> , 2015	Manejo agronómico
<i>Brassica oleracea</i> (Mostaza)	Zinc	Barrameda-Medina <i>et al.</i> , 2017	Manejo agronómico
	Zinc y Hierro	Di Gioia <i>et al.</i> , 2019	Manejo agronómico
<i>Medicago sativa</i> (Alfafa)	Zinc	Merinero-De los Santos <i>et al.</i> , 2020	Manejo agronómico
<i>Hordeum vulgare</i> (Cebada)	Zinc	González <i>et al.</i> , 2019	Manejo agronómico
<i>Vigna unguiculata</i> (Frijol caupí)	Zinc y Hierro	Guillén-Molina <i>et al.</i> , 2016	Manejo agronómico
<i>Lycopersicon esculentum</i> (Tomate)	Yodo	Landini <i>et al.</i> , 2011	Manejo agronómico
	Yodo	Kiferle <i>et al.</i> , 2013	Manejo agronómico
<i>Daucus carota</i> (Zanahoria)	Selenio	Bañuelos <i>et al.</i> , 2015	Manejo agronómico
	Zinc y Hierro	Nair <i>et al.</i> , 2013	Manejo agronómico
<i>Vigna radiata</i> (Sorgo verde)	Zinc y Hierro	Haider <i>et al.</i> , 2018	Manejo agronómico
	Zinc y Hierro	Di Gioia <i>et al.</i> , 2019	Manejo agronómico
<i>Eruca vesicaria</i> (Arugula)	Zinc	Rugeles-Reyes <i>et al.</i> , 2019	Manejo agronómico
<i>Cucumis melo</i> (Melón)	Yodo	Melgoza <i>et al.</i> , 2016	Manejo agronómico
<i>Brassica juncea</i> (Mostaza)	β -caroteno, Zinc y Hierro	Golubkina <i>et al.</i> , 2018	Manejo agronómico
	Selenio y Yodo	Golob <i>et al.</i> , 2020	Manejo agronómico
<i>Cucurbita mostacha</i> (Calabaza)	β -caroteno, Provitamina A	BIOFORT, 2015	Transgénesis
<i>Mangifera indica</i> (Mango)	β -caroteno, Vitamina C (ácido ascórbico)	Agricultural Research Service (India)	Manejo agronómico

<i>Vitis vinifera</i> (Uva)	Sólidos solubles	Indian Agricultural Institute	Manejo agronómico
<i>Nopalea cochenillifera</i> (Nopal)	Zinc	Horibe <i>et al.</i> , 2020	Manejo agronómico
<i>Stevia rebaudiana</i> (Estevia)	Zinc y carotenoides	Velázquez-Gamboa <i>et al.</i> , 2020	Manejo agronómico

Fuente: Saltzman *et al.*, 2013, Prasad *et al.*, 2015; Garg *et al.*, 2018).

Actualmente, la biofortificación tiene tres líneas de investigación, enfocadas simultáneamente en obtener estrategias con el enfoque de encontrar un mejor desarrollo y estado nutricional de los cultivos (Sida-Arreola *et al.*, 2015). En la Figura 2 se describen cada uno de los enfoques de la biofortificación, sus ventajas y limitaciones de cada una de estas estrategias empeladas para este propósito. Las líneas de investigación empleadas en el proceso de biofortificación han encontrado estrategias viables y rentables en la producción de cultivos con mayores aportes nutricionales (Garg *et al.*, 2018), de las cuales se mencionan lo siguiente:

-Biofortificación genética: las estrategias basadas en este método se enfoca en la biotecnología transgénica (ingeniería genética) o cruza para obtener para la variabilidad de especies. Este enfoque, tienen como objetivo generar una variabilidad de especies con rasgos determinados, que permitan ya sea un mayor rendimiento, producción, resistencia a plagas o condiciones adversas, así como rasgos agronómicos determinados que involucren una mayor gestión de nutrientes en el suelo (absorción y extracción). Para este fin, la biofortificación genética emplea dos métodos, el tradicional y la transgénesis. El primero de ellos, involucra la heredabilidad de rasgos agronómicos por medio de cruces parentales y el manejo tradicional de estos cruzamientos por medio de la selección de especies potenciales (Pfeiffer y McClafferty, 2007). A la vez, la transgénesis, la cual entendemos como la transferencia y expresión de genes de una especie a otra, lo que nos permite manejar la estructura genética (modificando o implantando genes no presentes naturalmente) de un individuo, por ejemplo cultivos manejados genéticamente pueden expresar una mayor capacidad de absorción de nutrientes, redirección de nutrientes en los diferentes tejidos de las plantas que permitiría su biofortificación mineral y de compuestos naturales (Hefferon, 2016; Garg *et al.*, 2018).

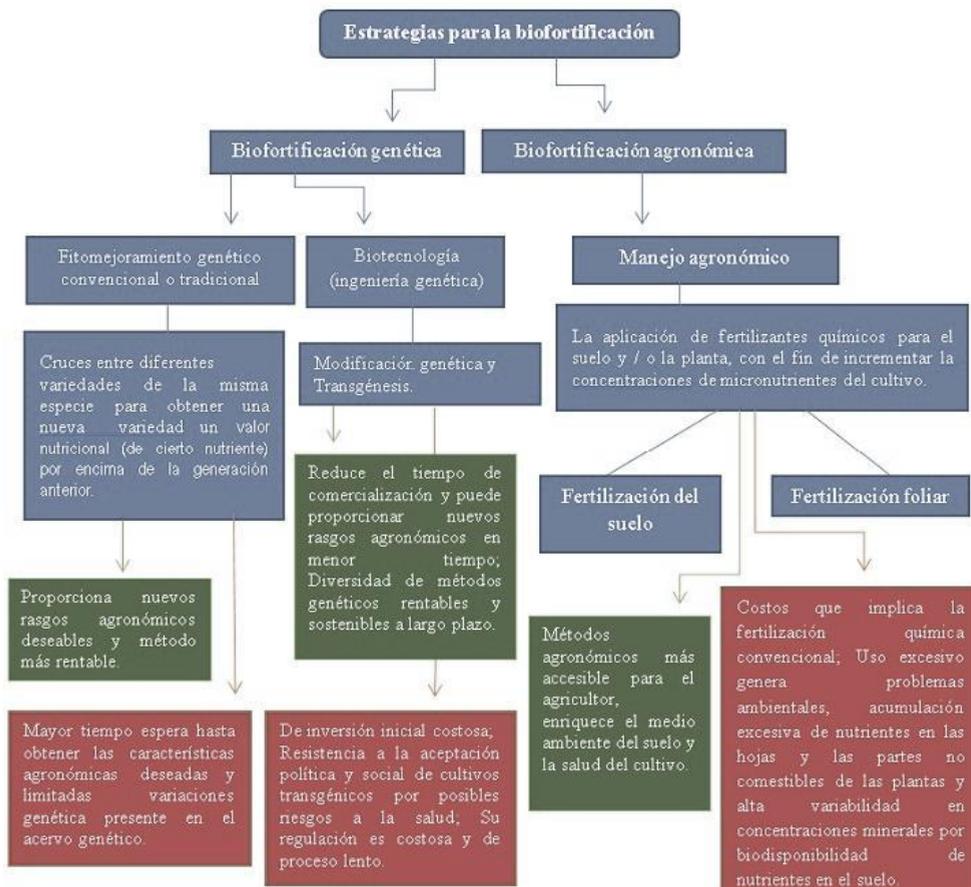


Figura 2. Estrategias para la biofortificación de alimentos, ventajas (verde) y limitaciones (rojo).

Fuente: Cakmak 2008; Gómez-Galera et al., 2012; Saltzman et al., 2013; Shahzad et al., 2014; Hefferon, 2016; De Steur, et al., 2017).

-Biofortificación agronómica: este enfoque de biofortificación emplea el uso de la fertilización en los cultivos con el propósito de enriquecer el suelo para una mayor biodisponibilidad y solubilidad de nutrientes minerales en el suelo, para una acumulación de minerales, principalmente de Fósforo, Potasio, Calcio, Manganeso, Magnesio, Cobre, Zinc, Hierro, Selenio, Yodo, Molibdeno, etc., y sustancias naturales en los tejidos comestibles para el consumo humano (Cakmak, 2008). Este manejo en la fertilización de un cultivo nos permitiría eficientizar el proceso de absorción de nutrientes, acumulación y distribución de nutrientes en las plantas (Rietra *et al.*, 2017). Numerosas han sido las

investigaciones desarrolladas bajo este principio, ya sea por medio del mejoramiento genético en cruzas para la variabilidad de especies, biotecnología (cultivos transgénicos) y manejo agronómico (manejo de la fertilización mineral) (Mayer *et al.*, 2008; Pfeiffer & McClafferty, 2007). Por lo que, la biofortificación de cultivos es una estrategia agrícola prometedora y rentable, ya sea en sus tres estrategias para mejorar el estado nutricional de cultivos. Esto lo exponen, en un análisis Garg *et al.*, (2018), al registrar el enfoque de la biofortificación en diferentes cultivos básicos, hortícolas y frutales mejorando el estado nutricional de frutos, hojas, tallos, bulbos y raíces para el consumo humano. Esto al registrar un incremento en contenidos de nutrientes como Provitamina A, vitaminas B y C, variedad de aminoácidos, Hierro, Zinc, Selenio, Yodo, etc.). Sin embargo, el impacto social, económico y nutricional en la salud humana de los cultivos biofortificados que generara un cambio en el consumo de productos básicos tradicionales a los biofortificados, dependerá del nivel de aceptación y adopción social que tengan los cultivos implicados, lo cual, para una mayor aceptación y aumento de demanda (Bouis y Saltzman, 2017), estará influenciada principalmente por la información que el consumidor tenga de los productos por parte de las asociaciones responsables, en base a una comunicación sólida y estrategias de promoción (García-Casal *et al.*, 2017) y el consumo del mismo por las poblaciones (Birol *et al.*, 2015). Por su parte, la aceptación del consumidor, es valor dado desde los requisitos básicos para la efectividad de un cultivo para su biofortificación, seguido de seleccionar un cultivo por su alto rendimiento y rentabilidad para el agricultor (Sida-Arreola *et al.*, 2015). Aunado a lo anterior, la incorporación de alimentos biofortificados es un reto no solo a nivel social, también debe de ser implementado y fomentado en políticas, programas de gobierno, e inversiones públicas y privadas (Bouis y Saltzman, 2017).

Anteriormente hemos revisado lo que implica la biofortificación y sus perspectivas actuales y a futuro, la cual menciona a la biofortificación de cultivos alternativos por su rentabilidad para el agricultor, valor nutricional y tener una buena aceptación en el mercado para el consumo humano (Ayoub *et al.*, 2020), cubriendo los requisitos básicos para la efectividad de la biofortificación (Sida-Arreola *et al.*, 2015). La biofortificación agronómica, actualmente puede considerarse como la estrategia más accesible para el agricultor y un método rápido para el enriquecer y aumentar la biodisponibilidad de nutrientes del suelo hacia la planta, lo que implica, incrementar la absorción de elementos minerales y a la vez la biodisponibilidad en la planta para mantener un buen estado fitosanitario y óptimo desarrollo (Cakmak, 2008). Asimismo, la efectividad del proceso de biofortificación en un cultivo mediante manejo agronómico depende del método empleado (fertilización inorgánica, inorgánica y asociaciones biológicas) y su aplicación (Garg *et al.*, 2018). No obstante, aunque la fertilización mineral mediante productos químicos, es un método muy empleado

en la actualidad por su rapidez, en los últimos años no ha sido recomendable ambientalmente por su uso excesivo de productos químicos, ni ha sido considerado un método económico para la producción de alimentos, derivado de los costos elevados de producción. Por lo que, la fertilización biológica por medio del uso de microorganismos del suelo actualmente ha tomado mucho énfasis principalmente por tomarse como un método eficaz y sostenible ambientalmente hablado, al suministrar los nutrientes necesarios a la planta y mejorar las condiciones del suelo para una mayor biodisponibilidad de los mismos (Miransari, 2013). De acuerdo a la revisión de literatura, la práctica de aplicar microorganismos del suelo ha sido poco utilizada, pero presentan beneficios que nos pueden permitir una mayor fitodisponibilidad de los elementos minerales hacia la planta. Para autores como Garg *et al.* (2018) y Khan *et al.* (2019), el método de asociación simbiótica o mutualista con microorganismos del suelo a través de sus diferentes mecanismos de acción con la planta hospedante, puede ser considerado una práctica factible y con expectativas en el campo de los procesos hacia la biofortificación de cultivos principalmente en elementos minerales y la translocación eficiente en el tejido vegetal para su consumo, por acción de genes/proteínas involucradas en su translocación (Singh y Prasanna, 2020). Con expectativas para su implementación en los procesos de biofortificación por su eficiente manejo en la nutrición vegetal de los cultivos, fitosanidad, rentabilidad productiva y agentes mejoradores de la calidad del suelo, se pueden mencionar a los hongos y bacterias, como principales componentes de la microbiota del suelo y agentes benéficos de la rizósfera de las comunidades vegetales (Kaur *et al.*, 2020), principalmente las cianobacterias, conocidas como Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal o PGPR (Plant growth promoting rhizobacteria, por su acrónimo en inglés) (Shaikh y Saraf, 2017) y hongos micorrízicos, como principales transportadores de Zinc/Hierro del suelo a la planta (Khan *et al.*, 2019).

En cuanto al uso de hongos micorrízicos arbusculares (HMA), se infiere que la participación de estos asociados a los cultivos agrícolas, pueden influir en la dinámica de los elementos minerales como el Cobre, Zinc, Hierro y Manganeseo, reflejándose en la concentración en su tejido vegetal por medio de la homeostasis de metales pesados y su actividad transcripcional. Tamayo *et al.* (2014), identificaron durante la fase simbiótica de la planta con HMA cerca de 30 genes transportadores de metales pesados, por medio de los procesos de expresión, transferencia y transcripción genómica. De los cuales se identifican ocho familias de genes transportadores, como CTR (Cobre), P1b-ATPasa (Cobre), SIT (SIT-Hierro), OFET (Hierro), VIT (Hierro/Manganeseo), ZIP (Zinc, Manganeseo), CDF (Hierro, Zinc, Manganeseo) y NRAMP (Hierro, Manganeseo, Hierro/Manganeseo). Ferrol *et al.* (2016), nos mencionan los principales participantes a los transportadores de Mn-Fe (SMF1), Cu fúngico (CTR), Cu vegetal (COPT), Cu-ATPasa (CCC2), Fe-Mn (CCC1.3), Fe permesasa (FTR1), Zn (ZRT1), permeasa

Zn-Fe (ZIP, algunos también transportan Mn) y CDF (Cation Diffusion Facilitador). Por lo que, durante la interface simbiótica fúngica-planta, se ha determinado un proceso de biofortificación de los tejidos vegetales de las plantas, ya que el proceso de fitoextracción-translocación de metales del suelo a la planta por medio de un intermediario como los HMA (vía micorrízica), incrementan la translocación de nutrientes, redistribuyéndolos con mayor eficiencia hacia el tejido vegetal de la planta (Tisserant *et al.*, 2013; Ferrol *et al.*, 2016).

CONCLUSIONES

En síntesis, la presente revisión es un análisis acerca de las implicaciones actuales que conlleva la biofortificación de alimentos en base la exhaustiva revisión de artículos científicos del sector público y privado, así como los avances de resultados en importantes programas internacionales y sociales referentes a la salud pública, inseguridad e insuficiencia alimentaria en el mundo. El artículo de revisión indagada en torno a los avances recientes en esta línea de investigación, su innovación y futuras aplicaciones para su sustentabilidad. Por lo que, se puede inferir que actualmente la biofortificación es una práctica que ha tomado relevancia desde su búsqueda al aumentar la concentración de elementos minerales a partir de la necesidad fisiológica de las plantas mediante el proceso dinámico de asimilar nutrientes esenciales del suelo para su metabolismo y óptimo desarrollo. Las perspectivas futuras de la biofortificación indagadas en esta revisión giran en torno al enriquecimiento de los cultivos en compuestos naturales esenciales para la salud humana como los carotenoides (β -caroteno, antocianinas, Zeaxantina, Astaxantina, Provitamina A, Licopeno, etc.) y el contenido de vitaminas (A, D, E, K, C, tiamina, niacina, B6, B12, etc.) en las raíces, hojas y en el fruto, así como en aumentar los rasgos de las características organolépticas (sabor, textura, etc.) para una mayor aceptación por parte del consumidor. La aplicación de microorganismos del suelo, es una alternativa viable como intervención agronómica para la biofortificación en cultivos, considerándose como un biofertilizante, tomando en cuenta varios aspectos como mayor rapidez en su manejo, accesibilidad al agricultor/productor, nivel de aceptación social mayor que otros métodos, reducción de costos de fertilización y mantener o superar los rendimientos de la producción agrícola deseada con respecto al cultivo implicado, que no solo mejorarán el estado fitosanitario de los cultivos, también mejorarán varias características organolépticas y nutricionales de las partes comestibles para el consumo humano. Lo que implica, incrementar la absorción de elementos minerales y a la vez su biodisponibilidad en la planta para mantener un buen estado fitosanitario y óptimo desarrollo a través de sus mecanismos de acción y su interacción. Por lo que, el empleo de

microorganismos del suelo es considerada una estrategia viable no solo para mejorar el estado fitosanitario y nutricional de la planta, también involucra los beneficios que proporciona al suelo y medio ambiente, así como su importancia en la restauración de ecosistemas.

LITERATURA CITADA

- AgroSalud. (2010). El impacto nutricional de cultivos biofortificados o cultivos con mayor calidad nutricional. Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Recuperado de http://lac.harvestplus.org/wp-content/uploads/2015/02/cartilla-impacto-nutricional_impresion_feb12_10.pdf
- Almendros, P., Obrador, A., Gonzalez, D., y Alvarez, J. M. (2015). Biofortification of zinc in onions (*Allium cepa* L.) and soil Zn status by the application of different organic Zn complexes. *Scientia Horticulturae*, 186: 254-265. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.02.023>
- Ansari, S. A., y Thapa, S. (2019). Biofortification of Food Crops: An Approach towards Improving Nutritional Security in South Asia. *IJAAS*, 6(12), 23-33. Recuperado de <https://ijaast.com/publications/vol6issue12/V6I1202.pdf>
- Ayoub, A., Mushtaq, M., Mir Z. A. y Dar, A. A. (2020) Biofortification in Fruits. In: Sharma, T.R., Deshmukh, R., Sonah, H. (eds) *Advances in Agri-Food Biotechnology*. Springer, Singapore. 131-151. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-15-2874-3_6
- Bañuelos, G.S., Arroyo, I., Pickering, I. J., Yang, S. I. y Freeman, J. L. (2015). Selenium biofortification of broccoli and carrots grown in soil amended with Se-enriched hyperaccumulator *Stanleya pinnata*. *Food chemistry*, 166, 603-608. doi: [10.1016/j.foodchem.2014.06.071](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.06.071)
- Barrameda-Medina, Y., Blasco, B., Lentini, M., Esposito, S., Baenas, N., Moreno, D.A. y Ruiz, J.M. (2017). Zinc biofortification improves phytochemicals and amino-acidic profile in Brassica oleracea cv. Bronco. *Plant science*, 258, 45-51. doi: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.02.004>
- BioFORT. (2015). Rede de BioFORT. Recuperado de <https://biofort.com.br/autor/redebiofort/> Birol, E., Meenakshi, J, V., Oparinde, A., Perez S. y Tomlins, K. (2015). Developing country consumers' acceptance of biofortified foods: a synthesis. *Food Security*, 7(3), 555-568. doi: [10.1007/s12571-015-0464-7](https://doi.org/10.1007/s12571-015-0464-7)

- Bouis, H. E., Hotz, C., McClafferty, B., Meenakshi, J. V. y Pfeiffer W.H. (2011). Biofortification: a new tool to reduce micronutrient malnutrition. *Food and nutrition bulletin*, 32(1_suppl1), S31-S40. doi: <https://doi.org/10.1177/15648265110321S105>
- Bouis, H. E., y Welch, R. M. (2010). Biofortification—a sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the global south. *Crop science*, 50, S-20. doi: <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.09.0531>
- Bouis, H., Saltzman, A., Low J., Ball A. y Covic N. (2017). An overview of the landscape and approach for biofortification in Africa. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 17(2), 11848-11864. doi: 10.18697/ajfand.78.HarvestPlus01
- Bouis, H., y Saltzman, A. (2017). Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2017. *Global Food Security*, 12, 49-58. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.009>
- Cakmak, I. (2008). Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification?. *Plant and soil*, 302(1), 1-17. doi: 10.1007/s11104-007-9466-3
- Carranco Jáuregui, M. E., Calvo-Carrillo, M. y Pérez-Gil Romo, F. (2011). Carotenoides y su función antioxidante: Revisión. *Archivos latinoamericanos de nutrición*, 61(3), 233-241. Recuperado de <http://ve.scielo.org/pdf/alan/v61n3/art01.pdf>
- De Steur, H., Demont, M., Gellynck, X. y Stein, A. J. (2017). The social and economic impact of biofortification through genetic modification. *Current opinion in biotechnology*, 44, 161-168. doi: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.01.012>
- Di Gioia, F., Petropoulos, S.A., Ozores-Hampton, M., Morgan, K. y Roskopf, E. N. (2019). Zinc and Iron Agronomic Biofortification of Brassicaceae Microgreens. *Agronomy*, 9(11), 677. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy9110677> FAO. 2020. Hambre e inseguridad alimentaria. Recuperado de <http://www.fao.org/hunger/es/>.
- Ferrol, N., Tamayo, E. y Vargas, P. (2016). The heavy metal paradox in arbuscular mycorrhizas: from mechanisms to biotechnological applications. *Journal of experimental botany*. Vol. 67, (22), 6253–6265. doi: <https://doi.org/10.1093/jxb/erw403>
- Fundación Valles. Fundación para el Desarrollo Tecnológico y Agropecuario de los Valles. (2019). Memoria Institucional 2019. Recuperado de <https://fundacionvalles.org/wp-content/uploads/2020/10/Memoria2019.pdf>

- García-Casal, M. N., Pena-Rosas, J. P., Giyose, B., De Steur, H. y Van Der Straeten, D. (2017). Staple crops biofortified with increased vitamins and minerals: considerations for a public health strategy. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1390(1), 3-13. doi: <https://doi.org/10.1111/nyas.13293>
- Garg, M., Sharma, N., Sharma, S., Kapoor, P., Kumar, A., Chunduri, V. y Arora, P. (2018). Biofortified crops generated by breeding, agronomy and transgenic approaches are improving lives of millions of people around the world. *Frontiers in Nutrition*. 5:12. doi: <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00012>
- Giuliano, G. (2017). Provitamin A biofortification of crop plants: a gold rush with many miners. *Current opinion in biotechnology*, 44, 169-180. doi: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.02.001>
- Golob, A., Kroflič, A., Jerše, A., Kacjan, Maršič, N., Šircelj, H., Stibilj, V. y Germ, M. (2020). Response of Pumpkin to Different Concentrations and Forms of Selenium and Iodine, and their Combinations. *Plants*, 9(7), 899. doi: [10.3390/plants9070899](https://doi.org/10.3390/plants9070899)
- Golubkina, N., Kekina, H. y Caruso, G. (2018). Yield, quality and antioxidant properties of Indian mustard (*Brassica juncea* L.) in response to foliar biofortification with selenium and iodine. *Plants*, 7(4), 80. doi: [10.3390/plants7040080](https://doi.org/10.3390/plants7040080)
- Gómez-Galera, S., Twyman, R. M., Sparrow, P. A., Van Droogenbroeck, B., Custers, R., Capell, T. y Christou, P. (2012). Field trials and tribulations—making sense of the regulations for experimental field trials of transgenic crops in Europe. *Plant biotechnology journal*, 10(5), 511-523. doi: [10.1111/j.1467-7652.2012.00681.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2012.00681.x)
- González, D., Almendros, P., Obrador, A. y Alvarez, J. M. (2019). Zinc application in conjunction with urea as a fertilization strategy for improving both nitrogen use efficiency and the zinc biofortification of barley. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(9): 4445-4451. doi: [10.1002/jsfa.9681](https://doi.org/10.1002/jsfa.9681)
- Guillén-Molina, M., Márquez-Quiroz, C., de la Cruz-Lázaro, E., Velázquez-Martínez, J. R., Parra, J. M. S., Carrillo, M. G. y Vidal, J. A. O. (2016). Biofortificación de frijol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp) con hierro y zinc. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (17), 3427-3438. doi: <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i20.986>
- Haider, M. U., Farooq, M., Nawaz, A. y Hussain, M. (2018). Foliage applied zinc ensures better growth, yield and grain biofortification of mungbean. *International Journal of Agriculture and Biology*, 20(12): 2817-2822. doi: [10.5433/1679-0359.2021v42n2p487](https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n2p487)

- Hefferon, K. L. (2016). Can biofortified crops help attain food security? *Current Molecular Biology Reports*, 2(4), 180-185. doi: 10.1007/s40610-016-0048-0
- Horibe, T., Sumi, H. y Teranobu, R. (2020). Zinc Biofortification of the Edible Cactus *Nopalea cochenillifera* Grown Under Hydroponic Conditions. *Environmental Control in Biology*, 58(2), 43-47. doi: <https://doi.org/10.2525/ecb.58.43>
- Hotz, C., y Brown, K.M. (2004). Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. *Food and Nutrition Bulletin*. 25, S99-S199. doi: <https://doi.org/10.1177/15648265040251S205>
- IDIAP (2016). *Primer Informe Diagnóstico Socioeconómico y Nutricional para el Proyecto AgroNutre Panamá*. Coop. Técnica-financiera de HarvestPlus, Universidad de Panamá, Ministerio de Salud y la FAO. Recuperado de <http://www.idiap.gob.pa/>
- Kaur, T., Rana, K. L., Kour, D., Sheikh, I., Yadav, N., Yadav, A. N., Singh Dhaliwal, H. y Saxena, A. K. (2020). Microbe-mediated biofortification for micronutrients: present status and future challenges. In *Trends of microbial biotechnology for sustainable agriculture and biomedicine systems: perspectives for human health*. Elsevier, Amsterdam: 1-17. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820528-0.00002-8>
- Khan, A., Singh, J., Upadhayay, V. K., Singh, A.V. y Shah, S. (2019). Microbial biofortification: a Green technology through plant growth promoting microorganisms. In: Shah, S., Venkatramanan, V., Prasad, R. (eds). *Sustainable Green Technologies for Environmental Management*. Springer, Singapore. (pp 255-269). doi: https://doi.org/10.1007/978-981-13-2772-8_13
- Kiferle, C., Gonzali, S., Holwerda, H.T., Real Ibaceta, R. y Perata, P. (2013). Tomato fruits: a good target for iodine biofortification. *Frontiers in plant science*, 4, 205. doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00205>
- Landini, M., Gonzali, S. y Perata, P. (2011). Iodine biofortification in tomato. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 174(3), 480-486. doi: 10.1002/jpln.201000395
- López, M. D., Revelo, M. C. y Pachón, H. (2008). El consumo y la producción familiar de fríjol, maíz, yuca, batata y arroz en un municipio rural en Colombia: Evaluación de la posibilidad de implementar la biofortificación de cultivos. *Perspectivas en Nutrición Humana*, 10(1), 11-21. Recuperado de <https://hdl.handle.net/10568/65899>

- López-Gutiérrez, M. D., Benavides-Mendoza, A., Ortega-Ortiz, H., Valdez-Aguilar, L. A. Sandoval-Rangel, A. (2015). Selenio y su efecto en el estado antioxidante y la composición mineral de la lechuga. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(SPE12), 2257-2262. doi: <https://doi.org/10.29312>
- Mallari, S. (2019). ¿Cultivos biofortificados o biodiversidad? La lucha por verdaderas soluciones está en marcha. Recuperado de <https://grain.org/system/articles/pdfs/000/006/245/original/Biofortified%20Crops%20ES%2002.pdf?1559642333>
- Mayer, J. E., Pfeiffer, W. H. y Beyer, P. (2008). Biofortified crops to alleviate micronutrient malnutrition. *Current opinion in plant biology*, 11(2), 166-170. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2008.01.007>
- Melgoza, F.A.G., Escalante, F.B., Cavazos, C.J.L, Torres, V.R., De las Nieves Rodríguez-Mendoza, M., Fuentes, J.A.G. y Mendoza, A. B. (2016). Respuesta de las plantas de melón a las aplicaciones de yoduro de potasio. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (17), 3465-3475. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/2631/263149506007.pdf>
- Merinero de los Santos, M., Pérez-Aranda Redondo, M., Begines Ruiz, B., Martín Valero, M. J., Navarro de la Torre, S., Rodríguez Llorente, I. D., Pajuelo-Dominguez E. y Alcudia-Cruz A. (2020). Biofortificación de plantas de *Medicago sativa* mediante el uso de nanopartículas cargadas con hierro. In: Beltrán-Custodio, A. y Félix Ángel, M. (eds) *La investigación de hoy, el futuro de mañana*. (pp 77-81). doi: 10.17993/IngyTec.2020.61
- Miransari, M. (2013). Soil microbes and the availability of soil nutrients. *Acta physiologiae plantarum*, 35(11), 3075-3084. doi: 10.1007/s11738-013-1338-2
- Monserrate Rojas, F. A., Pachón, H., Hyman, G. G. y Vesga-Varela, A. L. (2009). Metodología para seleccionar zonas de intervención con cultivos biofortificados. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 26, 419-428. Recuperado de <https://scielosp.org/pdf/rpsp/2009.v26n5/419-428/es>
- Morales-Morales, A. E., Alvarado-López, C. J., Andueza-Noh, R. H., Tun-Suarez, J. M. y Medina, K. B. (2020). Calidad nutrimental y nutraceutica en ejotes de caupí (*Vigna unguiculata* [L] walp.) de la península de Yucatán. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*: 7(3) e2541. doi: <https://doi.org/10.19136/era.a7n3.2541>
- Nair, R. M., Yang, R. Y., Easdown, W. J., Thavarajah, D., Thavarajah, P., Hughes, J. D. A. y Keatinge, J. D. H. (2013). Biofortification of mungbean (*Vigna radiata*) as a whole food to enhance human health. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(8): 1805-1813. doi: 10.1002/jsfa.6110

- Nestel, P., Bouis, H. E., Meenakshi, J. V. y Pfeiffer, W. (2006). Biofortification of staple food crops. *The Journal of nutrition*, 136(4), 1064-1067. doi: <https://doi.org/10.1093/jn/136.4.1064>
- Pfeiffer, W.H., y McClafferty, B. (2007). HarvestPlus: Breeding crops for better nutrition. *Crop Sci.* 47: S88-S105. doi: <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.09.0020IPBS>
- Prasad, B. V. G., Mohanta, S., Rahaman, S. y Bareilly, P. (2015). Bio-fortification in horticultural crops. *J. Agric. Eng. Food Technol*, 2(2), 95-99. Recuperado de: https://chesci.com/wp-content/uploads/2017/07/V6i22_87_CS042048053_Irene_1227-
- Qaim, M., Stein, A. J. y Meenakshi, J. V. (2007). Economics of biofortification. *Agricultural Economics*, 37, 119-133. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2007.00239.x>
- Ramírez-Jaspeado, R., Palacios-Rojas, N., Funes, J., Pérez, S. y Donnet, M. (2018). Identificación de áreas potenciales en México para la intervención con maíz biofortificado con zinc. *Revista fitotecnia mexicana*, 41(3), 327-337. doi: <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.3.327-337>
- Ramírez-Jaspeado, R., Palacios-Rojas, N., Nutti, M. y Pérez, S. (2020). Estados potenciales en México para la producción y consumo de frijol biofortificado con hierro y zinc. *Revista fitotecnia mexicana*, 43(1), 11-23. doi: <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.1.11>
- Reyes, B., Gómez, L. y Rodríguez, C. (2020). Apoyando a productores nicaragüenses con semilla de frijol biofortificado en tiempos de COVID-19. Alianza Bioversity-CIAT/Programa HarvestPlus. Recuperado de <https://alliancebioversityciat.org/es/node/16146>
- Rietra, R. P.J.J., Heinen, M., Dimkpa, C. O. y Bindraban, P.S. (2017). Effects of Nutrient Antagonism and Synergism on Yield and Fertilizer Use Efficiency. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 48(16), 1895-1920. doi: <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1407429>
- Rugeles-Reyes, S. M., Cecilio-Filho, A. B., López-Aguilar, M. A. y Silva, P. H. S. (2019). Foliar application of zinc in the agronomic biofortification of arugula. *Food Science and Technology*, 39(4), 1011-1017. doi: <https://doi.org/10.1590/fst.12318>
- Saltzman, A., Birol, E., Bouis, H.E., Boy, E., De Moura, F.F, Islam, Y. Pfeiffer, W. H. (2013) Biofortification: progress toward a more nourishing future. *Global Food Security*. 2(1):9-17. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2012.12.003>

- Saltzman, A., Birol, E., Oparinde, A., Andersson, M.S, Asare-Marfo, D., Diressie, M.T. y Zeller, M. (2017). Availability, production, and consumption of crops biofortified by plant breeding: current evidence and future potential. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1390(1), 104-114. doi: 10.1111/nyas.13314
- Shahzad, Z., Rouached, H. y Rakha, A. (2014). Combating mineral malnutrition through iron and zinc biofortification of cereals. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 13:329-346. doi: 10.1111/1541-4337.12063
- Shaikh, S., y Saraf, M. (2017). Biofortification of *Triticum aestivum* through the inoculation of zinc solubilizing plant growth promoting rhizobacteria in field experiment. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 9:120-126. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2016.12.008>
- Shivay, Y., S., Prasad, R. y Pal, M. (2015). Effects of source and method of zinc application on yield, zinc biofortification of grain, and Zn uptake and use efficiency in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46(17): 2191-2200. doi: <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1069320>
- Sida-Arreola, J. P., Sánchez, E., Ávila-Quezada, G. D., Acosta-Muñoz, C. H., y Zamudio-Flores, P. B. (2015). Biofortificación con micronutrientes en cultivos agrícolas y su impacto en la nutrición y salud humana. *Tecnociencia Chihuahua*, 9(2), 67-74. Recuperado de <https://vocero.uach.mx/index.php/tecnociencia/article/download/591/580/>
- Singh, D., y Prasanna, R. (2020). Potential of microbes in the biofortification of Zn and Fe in dietary food grains. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(2): 1-21. doi: 10.1007/s13593-020-00619-2
- Smoleń, S, Kowalska I., Kováčik, P., Sady, W., Grzanka, M. y Kutman, U. B. (2019). Changes in the Chemical Composition of Six Lettuce Cultivars (*Lactuca sativa* L.) in Response to Biofortification with Iodine and Selenium Combined with Salicylic Acid Application. *Agronomy*, 9(10), 660. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy9100660>
- Tamayo, E., Gómez-Gallego, T., Azcón-Aguilar, C. y Ferrol, N. (2014). Genome-wide analysis of copper, iron and zinc transporters in the arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis*. *Frontiers in Plant Science* 5: 547. doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00547>
- Tisserant, E., Malbreil, M. y Kuo, A. (2013). Genome of an arbuscular mycorrhizal fungus provides insight into the oldest plant symbiosis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(50), 20117-20122. doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00547>

UNICEF. (2019). Malnutrition rates remain alarming: stunting is declining too slowly while wasting still impacts the lives of far too many young children. Recuperado de <https://data.unicef.org/topic/%20nutrition/malnutrition/>

Velázquez-Gamboa, M.C., Rodríguez-Hernández, L., Abud-Archila, M., Gutiérrez-Miceli, F.A., González-Mendoza, D., Valdez-Salas, B. y Luján-Hidalgo, M. C. (2020). Agronomic Biofortification of Stevia rebaudiana with Zinc Oxide (ZnO) Phytonanoparticles and Antioxidant Compounds. Sugar Tech. 23(2), 453-460. doi: <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00897-w>

Viruez, J., Yonekura, P., Taboada, R., Borrero, J. y Grenier, C. (2016). Arroz biofortificado para bolivia-proyecto harvestplus. In: Reunión Anual del Programa de Cooperación Centroamericana para el Mejoramiento de Cultivos y Animales: Resúmenes. INTA. San José: INTA, Résumé, LXI PCCMCA.

Zheng, X., Giuliano, G. y Al-Babili, S. (2020). Carotenoid biofortification in crop plants: citius, altius, fortius. Biochimica et BiophysicaActa (BBA)-Molecular and Cell Biology of Lipids, 1865(11), 158664. doi: 10.1016/j.bbalip.2020.158664

SINTESIS CURRICULAR

José Alberto Gío Trujillo

Ingeniero Agrónomo por el Tecnológico Nacional de México, Campus Tizimín (2008-2012). Maestría en Ciencias en Manejo de Recursos Naturales Tropicales por la Universidad Autónoma de Yucatán (2014-2016). Estudiante del Doctorado en Ciencias en Agricultura Tropical Sustentable. Tecnológico Nacional de México, campus Conkal (2020). Correo institucional: DD20800277@conkal.tecnm.mx

Carlos Juan Alvarado López

Licenciado en Ingeniería Química por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (1997-2003). Maestría en Ciencias en Biotecnología: opción Ciencia y Biotecnología de Enzimas por la Universidad Autónoma de Coahuila (2004-2007). Doctorado en Ciencias Biológicas opción en Biología Experimental por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (2007 -2011). Cátedras-

CONACYT en el Tecnológico Nacional de México, Campus Conkal. Departamento de posgrado. SIN: I. Correo institucional: carlos.alvarado@itconkal.edu.mx

Neith Aracely Pacheco López

Licenciatura en Ingeniería de los Alimentos. por la UAMI (1999-2004). Maestría en biotecnología por la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa (2004-2006). Doctorado en Materiales macromoleculares (Universidad Claude Bernard de Lyon 1 Francia), Doctorado en biotecnología (Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, Obtenido por programa en Cotutela (2006-2010). Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño de del Estado de Jalisco. Investigadora Titular C. SIN: I. Correo institucional: npacheco@ciatej.net.mx

Jairo Cristóbal Alejo

Licenciatura en Sistemas de Producción Agrícola: Instituto Tecnológico No. 25 de Cd. Altamirano, Gro. (1986-1991). Maestría en Ciencias en: Fitopatología. Colegio de Postgraduados (1992-1993). Doctorado en Ciencias en: Fitopatología. Colegio de Postgraduados (1998-2000). Tecnológico Nacional de México, Campus Conkal, Avenida Tecnológico s/n C.P. 97345, Conkal, Yucatán, México. Departamento de posgrado. SIN: I. Correo institucional: jairo.cristobal@itconkal.edu.mx

Arturo Reyes Ramírez

Licenciatura en Química Clínica. Universidad Veracruzana (1983-1988). Maestría en Ciencias: Ingeniería Bioquímica. Instituto Tecnológico de Veracruz (1997-2000). Doctorado en Ciencias: Biotecnología de Plantas. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados-Irapuato del IPN (2001-2005). Tecnológico Nacional de México, Campus Conkal, Avenida Tecnológico s/n C.P. 97345, Conkal, Yucatán, México. Departamento de posgrado. SIN: I. Correo institucional: arturo.reyes@itconkal.edu.mx