Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Microalgas como plataforma innovadora para la producción de vacunas comestibles
Microalgae as an innovative platform for edible vaccines

Garza-García, D.M.[1]*, Alcocer-González, J.M.[1], Robledo-Leal, E.R.[2]

[1] Laboratorio de Inmunología y Virología; Facultad de Ciencias Biológicas; Universidad Autónoma de Nuevo León; 66455; San Nicolás de los Garza, N.L., México. (Orcid: https://orcid.org/0000-0002-1569-7395*, https://orcid.org/0000-0003-1398-7898).

[2] Laboratorio de Micología y Fitopatología; Facultad de Ciencias Biológicas; Universidad Autónoma de Nuevo León; 66455; San Nicolás de los Garza, N.L., México. (Orcid: https://orcid.org/0000-0002-1445-2839).

misael.garzagr@uanl.edu.mx*; juan.alcocerg@uanl.mx; efren.robledoll@uanl.edu.mx

Innovación tecnológica: Uso de microalgas para expresar proteínas recombinantes abre nuevas posibilidades en la producción biotecnológica sustentable.

Aplicación empresarial: La difusión de este artículo permitirá comprender la importancia del uso de las microalgas como una plataforma novedosa para la generación de vacunas comestibles.

Recibido: 30 mayo 2025
Aceptado: 01 noviembre 2025

Abstract

Microalgae are photosynthetic microorganisms with multiple biotechnological applications, serving as a novel and sustainable platform for producing recombinant proteins, including edible vaccines. Microalgae-based edible vaccines represent an innovative alternative to traditional vaccination methods because microalgae can efficiently produce therapeutic proteins. Microalgae offer significant advantages, such as high expression levels, genetic stability, ease of preservation, safety, scalability, and low production costs. Furthermore, their use as a platform for the expression of edible vaccines addresses current challenges in immunization, such as the need for more accessible, cost-effective, and sustainable methods. This technology positions microalgae as a promising tool in the development of biotechnological solutions for human and animal health. This review was conducted by selecting and analyzing recent scientific literature indexed in Google Scholar and specialized databases on recombinant protein expression in microalgae.

Keywords: Microalgae; edible vaccines; recombinant proteins; immunization.

Resumen

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos con múltiples aplicaciones biotecnológicas, destacándose como una plataforma novedosa y sostenible para la producción de proteínas recombinantes, entre las que se incluyen las vacunas comestibles. Estas representan una alternativa innovadora frente a los métodos tradicionales de vacunación, gracias a su capacidad para producir proteínas de interés terapéutico de manera eficiente. Las microalgas ofrecen ventajas significativas, como altos niveles de expresión, estabilidad genética, facilidad de preservación, seguridad, escalabilidad y bajo costo de producción. Además, su uso como plataforma para la expresión de vacunas comestibles aborda desafíos actuales en la inmunización, como la necesidad de métodos más accesibles, económicos y sostenibles. Esta tecnología posiciona a las microalgas como una herramienta prometedora en el desarrollo de soluciones biotecnológicas para la salud humana y animal. Esta revisión se elaboró a partir de la búsqueda y análisis de literatura científica reciente disponible en Google Académico y en bases de datos especializadas relacionadas con la expresión de proteínas recombinantes en microalgas.

Palabras clave: Microalgas; Vacunas comestibles; Proteínas recombinantes; Inmunización.

Introducción

Las microalgas se perfilan como una plataforma eficiente y sostenible para la expresión de proteínas recombinantes de interés farmacológico y terapéutico, destacándose especialmente en el campo emergente de las vacunas comestibles. Estos microorganismos, clasificados en eucariotas (ej. *Chlamydomonas reinhardtii*) y procariotas (ej. *Arthrospira platensis*), representan un grupo diverso con características únicas que las convierten en candidatas ideales para un gran número de aplicaciones, especialmente en el campo de la medicina. El reconocimiento de diversas especies de microalgas como seguras Generally Recognized As Safe (GRAS, por sus siglas en inglés), su escalabilidad en sistemas de cultivo abiertos o cerrados, su estabilidad genética y sus bajos costos de producción las posicionan como una alternativa prometedora frente a sistemas tradicionales, como cultivos de células de mamíferos u hongos (Arias *et al*., 2022; Ramos-Martínez *et al*., 2017).

Una de las características más importantes de las microalgas es su versatilidad metabólica, ya que pueden crecer en condiciones fotoautotróficas (utilizando luz y CO_2 como fuentes de energía y carbono), heterotróficas (utilizando fuentes de carbono orgánico) o mixotróficas (combinando ambas estrategias). Esta flexibilidad metabólica permite optimizar los procesos de producción según las necesidades específicas del compuesto a expresar. Además, las microalgas son capaces de sintetizar una amplia gama de compuestos de interés biotecnológico, como proteínas, vitaminas, lípidos y polisacáridos, los cuales tienen relevancia en campos como la terapéutica y la nutraceútica (Cezare-Gomes *et al*., 2019).

Entre las microalgas más estudiadas para la producción de proteínas recombinantes se encuentra *Chlamydomonas reinhardtii*, una microalga eucariota ampliamente empleada como modelo debido a su genoma completamente secuenciado y su facilidad de manipulación genética. Así mismo, múltiples plataformas bioinformáticas se encuentran habilitadas para trabajar la información genética de *C. reinhardtii*. Otras microalgas

como *Phaeodactylum tricornutum* y *Chlorella spp*., destacan como modelos de expresión de proteínas recombinantes. Estas especies han demostrado ser sistemas eficientes para la expresión de compuesto de interés terapéutico, lo que abre nuevas posibilidades para el desarrollo de diversos tipos de vacunas (Muthukrishnan, 2022).

Las vacunas comestibles basadas en microalgas ofrecen ventajas significativas, como la facilidad de administración oral, estabilidad del antígeno y la facilidad de producción a gran escala con bajo impacto ambiental. Asimismo, las microalgas pueden actuar como vehículos naturales para la entrega de antígenos con una inducción eficiente en la respuesta inmunitaria. Por consiguiente, las microalgas emergen como una plataforma innovadora y sostenible para la producción de diversos tipos de vacunas, con el potencial de revolucionar la prevención de enfermedades patogénicas a nivel global (Castiglia *et al.*, 2021). El objetivo de esta revisión es analizar los avances recientes en el uso de microalgas como plataformas biotecnológicas para la producción de vacunas comestibles, destacando sus ventajas, limitaciones y perspectivas futuras frente a los métodos convencionales de vacunación.

Metodología

La información presentada en este artículo de divulgación se obtuvo mediante una revisión narrativa de literatura científica reciente (2016–2024) relacionada con la expresión de proteínas recombinantes basadas en microalgas, así como su aplicación en el desarrollo de vacunas comestibles.

Se consultaron artículos de investigación y revisiones en bases de datos como Google Académico, PubMed y ScienceDirect, priorizando aquellos que abordaran avances en ingeniería genética, sistemas de expresión basados en microalgas y vacunas comestibles.

Para el análisis, se consideraron las principales ventajas y limitaciones de las microalgas frente a sistemas tradicionales como células de mamíferos, bacterias u hongos, destacando su escalabilidad, costo de producción, seguridad y estabilidad genética.

Microalgas como sistemas de expresión

Las microalgas destacan como sistemas de expresión por su alta tasa de crecimiento, capacidad fotosintética, flexibilidad metabólica y facilidad de manipulación genética (Gupta *et al*., 2024; Hallmann, 2019). A diferencia de los cultivos de células de mamíferos, ofrecen ventajas como bajos costos, modificaciones postraduccionales complejas y seguridad para consumo humano (Xie *et al*., 2023; Banerjee & Ward, 2022). Por lo que se han convertido en sistemas ideales novedosos para la síntesis de vacunas, proteínas terapéuticas, nutracéuticos y biocombustibles.

Entre las aplicaciones más notables se encuentra la producción de vacunas recombinantes, como la proteína L1 del virus del papiloma humano (VPH), que se expresa en el cloroplasto de *Chlamydomonas reinhardtii* (Doron *et al*., 2016). Asimismo, se han desarrollado vacunas orales para combatir enfermedades como la hepatitis B y la fiebre aftosa (Naeem *et al*., 2024).

El avance en las herramientas de ingeniería genética y la bioinformática ha sido fundamental para optimizar estos sistemas basados en microalgas. La transformación de cloroplastos permite alcanzar altos niveles de expresión génica debido al alto número de copias de los genomas plastidiales (Bolaños-Martínez *et al*., 2022), mientras que técnicas

como CRISPR/Cas9 facilitan ediciones genómicas precisas (Dhokane *et al*., 2023). La disponibilidad del genoma completo de *Chlamydomonas reinhardtii*, así como el empleo de herramientas bioinformáticas, ha facilitado el diseño de sistemas de expresión basados en microalgas para la producción de proteínas de superficie del virus H5N1. Este enfoque representa una estrategia innovadora para el desarrollo de vacunas comestibles destinadas para el control de brotes de influenza aviar en aves de corral (García, 2024)

La capacidad de las microalgas para acumular lípidos y metabolitos secundarios las posiciona como bioplataformas prometedoras para la obtención sostenible de compuestos lipídicos. Esto se ha logrado a través de la ingeniería genética de cepas como *Phaeodactylum tricornutum*, mediante el diseño de promotores sintéticos, como Pt202 y Pt667, ha potenciado la expresión de genes lipogénicos en *P. tricornutum* (Zou *et al*., 2019). En el campo nutracéutico, son especialmente notables por su capacidad de producir carotenoides, como la astaxantina, y ácidos grasos poliinsaturados, como el EPA y DHA, los cuales son ampliamente valorados en las industrias alimentaria y farmacéutica (Shi *et al*., 2021).

Empresas pioneras en este campo, como Triton Health and Nutrition (San Diego, CA, EUA) y Algenist (Manhattan Beach, CA, EUA), han demostrado el potencial de las microalgas como sistemas de expresión eficientes y escalables. Estas compañías han logrado desarrollar productos innovadores basados en microalgas, destacando su aplicabilidad en la industria farmacéutica y nutracéutica (Grama *et al*., 2022).

Avances en el desarrollo y perfeccionamiento de técnicas de transformación genética y herramientas de la bioinformática no solo permiten generar nuevas mejoras, sino que también la reducción de costos y tiempos asociados con la ingeniería genética, consolidando a las microalgas como una innovadora plataforma y abriendo nuevas posibilidades para su aplicación en sectores como la medicina, la nutrición y la energía.

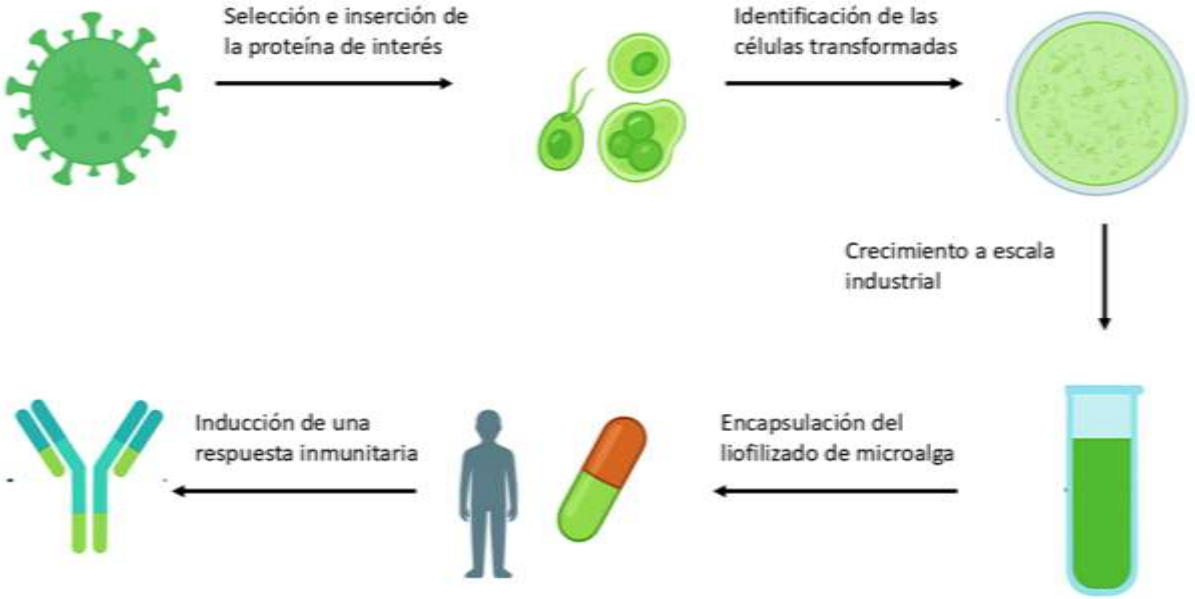


Figura 1. Producción de proteínas virales recombinantes en una plataforma comestible basada en microalgas para aplicaciones inmunológicas. Figura de elaboración propia a partir de las fuentes consultadas.

Resultados y análisis de la revisión bibliográfica

A partir de la revisión bibliográfica realizada, se identificaron los principales avances científicos en el uso de microalgas como plataformas para la expresión de antígenos y el desarrollo de vacunas comestibles, así como los retos técnicos que aún limitan su aplicación a escala industrial. Las vacunas comestibles basadas en microalgas representan una alternativa innovadora y sostenible para la inmunización, especialmente en regiones con limitaciones económicas y logísticas. Estas características metabólicas en las microalgas para expresar proteínas recombinantes en sus cloroplastos para la expresión de antígenos favorecen la capacidad de inducir una respuesta inmunitaria con notables ventajas operativas como costos bajos de producción, ausencia de cadena de frío, alto tiempo de conservación y administración oral, favoreciendo una distribución más eficiente.

La flexibilidad metabólica permite emplear diversos medios de cultivo para su multiplicación, además cuentan con el estatus GRAS, destacándose especies como *Chlamydomonas reinhardtii* y *Chlorella vulgaris*. Adicionalmente, cuentan con un amplio perfil nutricional como proteínas, vitaminas, antioxidantes, pigmentos, lípidos y polisacáridos con actividad biológica, que favorece una mayor inducción inmunológica (Jiji *et al*., 2023).

Un ejemplo notable es una cepa de microalga que expresa el gen de fusión CTB-M2e, diseñada como una vacuna universal contra el virus de la influenza A. Esta estrategia utiliza la proteína CTB (subunidad B de la toxina colérica) para aumentar la inmunogenicidad del péptido M2e, generando respuestas tanto sistémicas como mucosas (Ashraf *et al*., 2023). De manera similar, se han producido dominios de unión al receptor (RBD) del SARS-CoV-2 en microalgas, al ser administrados oralmente a ratones han logrado inducir inmunidad comparable a la de las vacunas inyectables tradicionales (Govea-Alonso *et al*., 2022).

A pesar de las importantes ventajas que ofrecen las microalgas como plataformas para la expresión de diversos compuestos, aún existen importantes desafíos como la variabilidad en la expresión de antígenos, la optimización de dosis para asegurar una inmunogenicidad consistente, la necesidad de superar barreras regulatorias y la aceptación pública hacia los organismos genéticamente modificados (Goshtasbi *et al*., 2023). A pesar de esto, los avances en técnicas de ingeniería genética y formulaciones de administración posicionan las vacunas comestibles como una herramienta prometedora, especialmente para enfermedades que requieren respuestas mucosas o en contextos donde el acceso a sistemas de refrigeración es limitado. Por tanto, se vuelve necesario incrementar una mayor estabilidad de los antígenos a expresar, comprobar su efectividad en ensayos clínicos y la optimización de costos de producción, lo que contribuirá en asegurar su uso a gran escala.

Ventajas y retos en la producción de vacunas basadas en microalgas

La producción de vacunas a partir de microalgas se destaca por su sostenibilidad, versatilidad y rentabilidad. Especies como *Nannochloropsis spp*. y *Dunaliella salina* han demostrado su capacidad para expresar antígenos recombinantes con la capacidad de estimular una respuesta inmunológica contra infecciones virales y cáncer (Trujillo *et al*., 2024; Gamberi *et al*., 2024). Entre sus principales ventajas es una producción sostenible, debido a su versatilidad para cultivarse en diferentes medios de cultivos con requisitos mínimos, lo que facilita su escalado industrial. Además, su habilidad

para expresar proteínas complejas y generar antígenos con modificaciones postraduccionales, favorece una mayor capacidad de inmunogenicidad, lo cual ofrece una importante sobre los sistemas bacterianos tradicionales. Asimismo, su costo de producción presenta mayor rentabilidad y competitividad en comparación con los biorreactores convencionales (Ahmad *et al*., 2020). Entre sus principales desventajas para el desarrollo de estas vacunas son la falta de validación y pruebas necesarias en modelos preclínicos o clínicos, lo que ha limitado su transición a aplicaciones reales. Adicionalmente, la eficiencia de transformación genética en diversas especies de microalgas poco estudiadas sigue siendo un importante reto, afectando tanto el rendimiento como la pureza de los antígenos producidos. Asimismo, los obstáculos regulatorios internacionales para la aprobación de vacunas derivadas de microalgas son significativos, y se necesita un marco normativo claro que garantice su seguridad y eficacia (Pereira *et al*., 2023).

Futuro y Perspectivas: ¿Vacunas de microalgas, la próxima revolución en inmunización?

Las vacunas basadas en microalgas están surgiendo como una alternativa revolucionaria en el ámbito de la inmunización, brindando soluciones innovadoras para los retos globales en salud pública. Este enfoque ha demostrado eficacia en prototipos contra patógenos como el SARS-CoV-2, el VPH, el VIH y el Zika, destacándose por su costo-efectividad y facilidad de administración oral (Xie *et al*., 2023). Su potencial es especialmente relevante en regiones con recursos limitados, donde los sistemas de vacunación tradicionales enfrentan serias dificultades logísticas y económicas.

Aplicaciones basadas en vacunas comestibles a partir de las microalgas como *Dunaliella salina* se emplean como vehículos para los antígenos. Esto no solo elimina la necesidad de jeringas y de mantener la cadena de frío, sino que por su composición aportan una gran cantidad de compuestos como proteínas, vitaminas, antioxidantes y polisacáridos que contribuyen a mejorar la respuesta inmune (Rosales-Mendoza *et al*., 2020). Estudios recientes respaldan su efectividad; por ejemplo, los inmunógenos derivados de microalgas contra el SARS-CoV-2 han inducido respuestas sistémicas y mucosas comparables a las de las vacunas convencionales, con el beneficio adicional de potencialmente generar una inmunidad más duradera.

Asimismo, el camino hacia su implementación a gran escala enfrenta desafíos importantes. La escalabilidad de la producción y la estabilidad de los antígenos en formulaciones orales necesitan ser optimizadas. Finalmente, los marcos regulatorios actuales no están completamente preparados para evaluar la seguridad y eficacia de estos productos innovadores, especialmente en lo que respecta a organismos genéticamente modificados (Dehghani et *al*., 2022). La aceptación pública también será un factor clave, lo que requiere estrategias de comunicación claras sobre sus beneficios y riesgos. Superar estos obstáculos, permitirá acelerar la adopción de plataformas basadas en microalgas como vacunas comestibles, las cuales podrían transformar los paradigmas de inmunización, ofreciendo soluciones a los problemas de salud global.

Discusión

Los estudios revisados evidencian que las microalgas poseen un alto potencial como plataforma de expresión de proteínas para la obtención de vacunas comestibles. A pesar de

sus importantes ventajas aún enfrenta importantes limitaciones como la alta variabilidad en los niveles de expresión de antígenos, los requerimientos regulatorios y su limitada adopción a nivel industrial.

En comparación con los sistemas convencionales, las microalgas ofrecen una alternativa más económica, segura y ambientalmente sostenible. Sin embargo, la optimización de los vectores de transformación y la estabilidad de las proteínas recombinantes siguen siendo retos por superar.

Los avances en edición génica en tecnologías como CRISPR/Cas9 y mejoras en los procesos de cultivo, podrían favorecer una adopción más rápida a escala industrial. Finalmente, estas innovaciones podrían redefinir la manera en la que enfrentamos a las patógenos mediante la vacunación.

Conclusión

Las microalgas emergen como una plataforma revolucionaria para la producción de vacunas comestibles, combinando sostenibilidad, bajo costo y facilidad de administración oral. Su capacidad para expresar proteínas recombinantes con actividad terapéutica, su perfil nutrimental y seguridad para su uso en aplicaciones médicas las posicionan como una alternativa viable frente a sistemas tradicionales. Sin embargo, persisten desafíos asociados a la estandarización de dosis y barreras regulatorias. Diversos desarrollos de vacunas contra influenza A y SARS-CoV-2, demuestran su potencial para inducir inmunidad sistémica y mucosa. Las microalgas podrían favorecer una mejor y mayor respuesta para hacer frente a los principales retos en salud pública global.

Bibliografía

[1] Arias, C. A. D., Oliveira, C. F. M. de, Molino, J. V. D., Ferreira-Camargo, L. S., Matsudo, M. C., & Carvalho, J. C. M. de. (2022). Production of recombinant biopharmaceuticals in Chlamydomonas reinhardtii. International Journal of Plant Biology, 14(1), 39–52. https://doi.org/10.3390/ijpb14010004

[2] Ramos-Martinez, E. M., Fimognari, L., & Sakuragi, Y. (2017). High-yield secretion of recombinant proteins from the microalga Chlamydomonas reinhardtii. Plant Biotechnology Journal, 15(9), 1214–1224. https://doi.org/10.1111/pbi.12710

[3] Cezare-Gomes, E. A., Mejia-da-Silva, L. D. C., Pérez-Mora, L. S., Matsudo, M. C., Ferreira-Camargo, L. S., Singh, A. K., & de Carvalho, J. C. M. (2019). Potential of microalgae carotenoids for industrial application. Applied Biochemistry and Biotechnology, 188(3), 602–634. https://doi.org/10.1007/s12010-018-02945-4

[4] Muthukrishnan, L. (2022). Bio-engineering of microalgae: Challenges and future prospects toward industrial and environmental applications. Journal of Basic Microbiology, 62(3–4), 310–329. https://doi.org/10.1002/jobm.202100417

[5] Castiglia, D., Landi, S., & Esposito, S. (2021). Advanced applications for protein and compounds from microalgae.

Plants, 10(8), 1686. https://doi.org/10.3390/plants10081686

[6] Gupta, A., Kang, K., Pathania, R., Saxton, L., Saucedo, B., Malik, A., Torres-Tiji, Y., Diaz, C. J., Dutra Molino, J. V., & Mayfield, S. P. (2024). Harnessing genetic engineering to drive economic bioproduct production in algae. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 12, 1350722. https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1350722

[7] Hallmann, A. (2019). Advances in genetic engineering of microalgae. In Grand Challenges in Algae Biotechnology (pp. 159–221). Springer International Publishing.

[8] Xie, Z., He, J., Peng, S., Zhang, X., & Kong, W. (2023). Biosynthesis of protein-based drugs using eukaryotic microalgae. Algal Research, 103219, 103219. https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103219

[9] Banerjee, A., & Ward, V. (2022). Production of recombinant and therapeutic proteins in microalgae. Current Opinion in Biotechnology, 78(102784), 102784. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2022.102784

[10] Doron, L., Segal, N., & Shapira, M. (2016). Transgene expression in microalgae-from tools to applications. Frontiers in Plant Science, 7, 505. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00505

[11] Naeem, S., Hameed, R., Sadaqat, S., Shahid, N., Latif, A., Yasmeen, A., Azam, S., & Rao, A. Q. (2024). Microalgae as a bioreactor for molecular farming for the production of oral edible vaccines against infectious diseases of humans and animals. In Concepts and Strategies in Plant Sciences (pp. 631–647). Springer Nature Singapore.

[12] Bolaños-Martínez, O. C., Malla, A., Rosales-Mendoza, S., & Vimolmangkang, S. (2022). Construction and validation of a chloroplast expression vector for the production of recombinant proteins in Chlorella vulgaris. Frontiers in Marine Science, 9. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.884897

[13] Dhokane, D., Shaikh, A., Yadav, A., Giri, N., Bandyopadhyay, A., Dasgupta, S., & Bhadra, B. (2023). CRISPR-based bioengineering in microalgae for production of industrially important biomolecules. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 11, 1267826. https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1267826

[14] García, D. M. G. (2024). Diseño de una vacuna contra el virus H5N1 en microalgas usando una plataforma inmunoinformática abierta. Universidad Autónoma de Nuevo León. http://eprints.uanl.mx/id/eprint/27

944

[15] Zou, L.-G., Balamurugan, S., Zhou, T.-B., Chen, J.-W., Li, D.-W., Yang, W.-D., Liu, J.-S., & Li, H.-Y. (2019). Potentiation of concurrent expression of lipogenic genes by novel strong promoters in the oleaginous microalga Phaeodactylum tricornutum. Biotechnology and Bioengineering, 116(11), 3006–3015. https://doi.org/10.1002/bit.27110

[16] Shi, Q., Chen, C., Zhang, W., Wu, P., Sun, M., Wu, H., Wu, H., Fu, P., & Fan, J. (2021). Transgenic eukaryotic microalgae as green factories: providing new ideas for the production of biologically active substances. Journal of Applied Phycology, 33(2), 705–728. https://doi.org/10.1007/s10811-020-02350-7

[17] Grama, S. B., Liu, Z., & Li, J. (2022). Emerging trends in genetic engineering of microalgae for commercial applications. Marine Drugs, 20(5), 285. https://doi.org/10.3390/md20050285

[18] Jiji, M. G., Ninan, M. A., Thomas, V. P., & Thomas, B. T. (2023). Edible microalgae: potential candidate for developing edible vaccines. Vegetos (Bareilly, India), 37(3), 1–6. https://doi.org/10.1007/s42535-023-00636-y

[19] Ashraf, F., Khan, M. A., Ahmed, N., Umar, M., Khan, M. I., Akram, M., Bhatti, R., & Malik, K. (2023). Development of transgenic algae strain expressing CTB-M2e fusion gene an approach towards the development of a universal edible vaccine in algae. Journal of Biotechnology, 374, 31–37. https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2023.07.004

[20] Govea-Alonso, D. O., Malla, A., Bolaños-Martínez, O. C., Vimolmangkang, S., & Rosales-Mendoza, S. (2022). An algae-made RBD from SARS-CoV-2 is immunogenic in mice. Pharmaceuticals (Basel, Switzerland), 15(10), 1298. https://doi.org/10.3390/ph15101298

[21] Goshtasbi, H., Okolodkov, Y. B., Movafeghi, A., Awale, S., Safary, A., Barar, J., & Omidi, Y. (2023). Harnessing microalgae as sustainable cellular factories for biopharmaceutical production. Algal Research, 74(103237), 103237. https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103237

[22] Trujillo, E., Monreal-Escalante, E., & Angulo, C. (2024). Microalgae-made human vaccines and therapeutics: A decade of advances. Biotechnology Journal, 19(5), e2400091. https://doi.org/10.1002/biot.202400091

[23] Gamberi, C., Leverette, C. L., Davis, A. C., Ismail, M., Piccialli, I., Borbone,

N., Oliviero, G., Vicidomini, C., Palumbo, R., & Roviello, G. N. (2024). Oceanic breakthroughs: Marine-derived innovations in vaccination, therapy, and immune health. Vaccines, 12(11). https://doi.org/10.3390/vaccines12111263

[24] Ahmad, N., Mehmood, M. A., & Malik, S. (2020). Recombinant protein production in microalgae: Emerging trends. Protein and Peptide Letters, 27(2), 105–110. https://doi.org/10.2174/0929866526666191014124855

[25] Pereira, J. S., Gomes, K. N. F., Pereira, C. de S. F., Jardim, G. E., Santiago, P. S., Rocha, L. M., & Faria, R. X. (2023). Microalgae and the medicine of the future. In Health of Tomorrow: Innovations and Academic Research. Seven Editora.

[26] Rosales-Mendoza, S., García-Silva, I., González-Ortega, O., Sandoval-Vargas, J. M., Malla, A., & Vimolmangkang, S. (2020). The potential of algal biotechnology to produce antiviral compounds and biopharmaceuticals. Molecules (Basel, Switzerland), 25(18), 4049. https://doi.org/10.3390/molecules25184049

[27] Dehghani, J., Movafeghi, A., Mathieu-Rivet, E., Mati-Baouche, N., Calbo, S., Lerouge, P., & Bardor, M. (2022). Microalgae as an efficient vehicle for the production and targeted delivery of therapeutic glycoproteins against SARS-CoV-2 variants. Marine Drugs, 20(11), 657. https://doi.org/10.3390/md20110065