



Los agentes secretos de la transferencia entre reinos: vesículas extracelulares y ARNs pequeños

LITZY NATHALIA LÁZARO-SANTOS¹, CECILIA HERNÁNDEZ-ZEPEDA², YERENI MINERO-GARCÍA¹ Y
OSCAR ALBERTO MORENO VALENZUELA^{1,*}

¹Unidad de Biología Integrativa, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C. Calle 43 No. 130
x 32 y 34, Colonia Chuburná de Hidalgo, 97205, Mérida, Yucatán, México.

²Unidad de Ciencias del Agua, Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C., Calle 8, No. 39,
Mz. 29, S.M. 64, 77524, Cancún, Quintana Roo, México.

*oamv@cicy.mx

Resumen: Aunque se conoce el rol de los pequeños ARN en la defensa interna de las plantas, su transferencia entre especies es un descubrimiento reciente y aún debatido. Este texto analiza cómo los ARN se mueven entre organismos, destacando el papel crucial de las vesículas extracelulares en el transporte durante la interacción planta-patógeno. Además, se explora la intrigante posibilidad de que los ARNm de origen vegetal puedan integrarse en el genoma del patógeno. Este campo emergente revela una nueva dimensión en la comunicación interespecie, con implicaciones significativas para comprender la inmunidad vegetal y las estrategias de ataque de los patógenos. El intercambio de material genético entre reinos podría ofrecer enfoques innovadores para la protección de cultivos.

Palabras clave: Hospedero, patógeno, silenciamiento génico.



Gobierno de
México

Ciencia y Tecnología
Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación





¿Qué son los ARN pequeños?: ¿Sabías que, dentro de todos los seres vivos, desde las bacterias hasta los humanos y las plantas, hay unas moléculas diminutas llamadas ARN pequeños (o ARNs)? Se descubrieron por primera vez en unas bacterias llamadas *Escherichia coli* (Migula, 1895) Castellani y Chalmers, 1919 en 1984 y desde entonces se ha visto que se encuentran en todos los organismos realizando trabajos importantes en muchos procesos celulares (Mizuno *et al.* 1984).

En las plantas, estos ARNs son como pequeñas moléculas que miden entre 19 y 30 "letras" de información genética o nucleótidos. Sus tareas principales son:

- **Controlar los genes:** Deciden qué genes se activan y cuándo y cuáles se quedan apagados. ¡Son como los interruptores de la actividad de la célula! (Zeng *et al.* 2019).
- **Guardianes del genoma:** Ayudan a que toda la información genética de la planta esté correcta y sin errores.
- **Comunicadores secretos:** ¡Incluso ayudan a las plantas a interactuar con otros seres vivos que las rodean! (Mueth & Hulbert 2022).

Hay diferentes tipos de ARNs, según de dónde se generan. Algunos son los ARN temporales (stARN) (¡como si tuvieran fecha de caducidad!), los ARN heterocromáticos, los microARN (miARN) y otros que son como espías, ¡moviéndose por toda la planta e incluso saliendo de ella para interactuar con otros organismos! los ARN de interferencia (siARN) (Finnegan & Matzke 2003; Zeng *et al.* 2019).

Silenciando genes no deseados: ¡Como apagar un interruptor! Estos ARNs son como unos agentes secretos muy versátiles. Su misión principal es silenciar a los genes que no deberían estar funcionando en un momento dado. Lo

hacen a través de un proceso llamado "silenciamiento génico", como si encontraran la parte del mensaje genético que no les gusta y la apagan. ¡Son como los censores a nivel molecular! ¿Cómo lo hacen? Los siARN son los encargados de esto. Se forman a partir de "dobles hebras" de ácido ribonucleico (ARN) (como dos cordones enrollados), estas hebras pueden venir de dentro o de fuera de la célula (Sánchez 2017). Una enzima llamada DICER, que es una proteína que es capaz de cortar el ADN (endonucleasa) (¡es como una tijera molecular!) corta estas hélices en fragmentos pequeños de siARN (Zhu *et al.* 2019), los cuales son reconocidos por el segundo equipo de proteínas, RISC (complejo silenciador inducido por ARN). Dentro de este equipo hay una proteína estrella llamada argonauta (AGO), que se encarga de reconocer si los siARN son el "complemento" exacto de un gen específico que quieren silenciar. Cuando lo encuentra, lo destruye o le impide realizar su trabajo, actuando como un agente que encuentra la pieza clave para desactivar un mecanismo importante (Figura 1) (Couh-Dzul *et al.* 2023, Sánchez 2017).

Sin embargo, esto no sucede solo a nivel intracelular, ya que estos ARNs ¡también son viajeros! Pueden moverse dentro de las células de la planta y entre diferentes células. Esto es muy importante para que la planta se adapte a su entorno. ¡Incluso pueden usarlos para comunicarse con otros seres vivos, aunque no sean de su mismo reino, por ejemplo, con sus patógenos, iniciando el mecanismo del silenciamiento génico (Zhou *et al.* 2017)! A esta "conversación" entre diferentes tipos de seres vivos la llamamos **"comunicación entre reinos"**.

El movimiento bidireccional de ARNs entre el hospedero y el patógeno se reportó por primera vez por Garbian y colaboradores en el

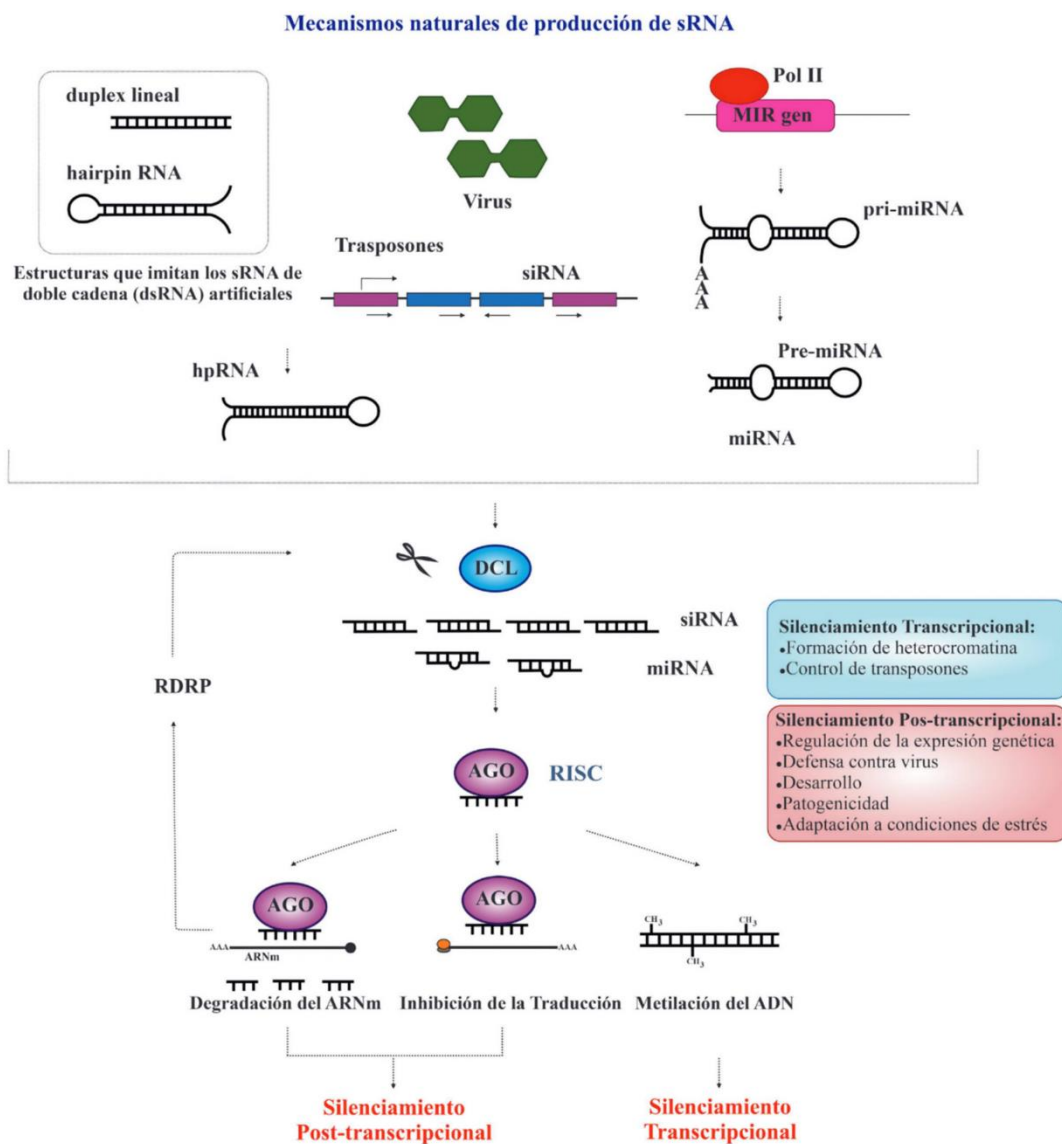


Figura 1 Representación de las diferentes formas de ARN pequeños en eucariotas (siRNA, miRNA) y precursores de los dsARN. El silenciamiento génico inicia con el reconocimiento de los ARN de doble cadena por la proteína DICER que corta y genera los siRNA y los pre-miRNA respectivamente. Para posteriormente ser reconocidos por el complejo RISC (complejo de silenciamiento inducido por ARN), que separa la doble hebra del siRNA, para que una hebra se una a la enzima argonauta (AGO) y guíe al ARNi complementario para lograr el silenciamiento transcripcional o post transcripcional (Couoh-Dzul *et al.* 2023).



2012, en dónde identificaron que los ARNs podían viajar entre una abeja y un ácaro que la ataca llamado *Varroa destructor* Anderson & Trueman, 2000. Ahora sabemos el transporte de los siARN entre reinos puede ocurrir entre diversas especies, especialmente entre plantas y sus diferentes patógenos. ¡Es como si las plantas tuvieran una forma secreta de defenderse o de interactuar con su entorno a través de estos pequeños mensajeros! Esta arma secreta se encuentra en estudio por diferentes grupos de investigación en el mundo, incluyendo el nuestro.

Transferencia de ARNs entre reinos ¿mito o realidad?: Durante mucho tiempo, los científicos se preguntaban si las plantas podían enviarse "mensajes" entre ellas a larga distancia, ¡como si tuvieran su propio internet vegetal! Dado a esto es como se descubrió que unas moléculas llamadas ARNs son como los mensajeros de este mundo verde (Xoconostle-Cázarez *et al.* 1999). Aunado a esto, en 2013 unos investigadores aún más curiosos, Weiberg y colaboradores realizaron un descubrimiento alucinante. Un hongo patógeno llamado *Botrytis cinerea* Pers. (un tipo de moho malvado) no solo ataca a las plantas, sino que también les ¡envía sus propios ARNs! es como si el hongo les enviara comentarios psicológicos a las células de la planta para que bajen la guardia y se dejen infectar. A esto le llamaron "transporte de ARNi entre reinos", debido a que las plantas y los hongos pertenecen a diferentes equipos en la naturaleza (reinos vegetal y fungi respectivamente).

Sin embargo, las plantas saben contraatacar a esta cizaña, mediante el envío de sus propios ARNs a los invasores, como si les dijeran: "¡Aquí no eres bienvenido!". Estos ARNs de la planta hacen que los genes del patógeno se callen, ¡como si les pusieran un bozal genético!

(Zeng *et al.* 2019). Más recientemente, en 2022 Mueth & Hulbert demostraron la transferencia horizontal de ARNs en la interacción del trigo con el patógeno *Puccinia striiformis* Westend. y como estos ARNs intervienen en la virulencia del hongo y/o en la defensa de las plantas.

Así que, ¿mito o realidad? ¡Definitivamente realidad! La comunicación entre seres vivos de diferentes "equipos" a través de estos mensajeros moleculares es un campo súper emocionante que nos está mostrando lo compleja y fascinante que es la vida en nuestro planeta. ¡Quién diría que las plantas y los microorganismos tenían tanto que contarse!

Las vesículas extracelulares de las plantas son un agente esencial para el transporte de ARNs: ¿Recuerdas que hablamos de cómo las plantas y los patógenos se mandan mensajes usando ARNs? Pues bien, ahora vamos a descubrir cómo viajan esos mensajes.

Para que un mensaje de ARN llegue de un punto a otro dentro de la planta (Colombo *et al.* 2014, Guduric-Fuchs *et al.* 2012) o incluso de una planta a un patógeno (Yu *et al.* 2022, Zeng *et al.* 2019), necesita un vehículo, algo que lo transporte de forma segura. Y aquí entran en juego las **vesículas extracelulares (VEs)**, que son como pequeñas burbujas o cápsulas hechas de grasa, como la membrana de una célula hospedero (Mueth & Hulbert 2022, Wang & Dean 2020) (Figura 2).

Como las células de las plantas tienen algo así como autopistas internas (membranas), los ARNs pueden ser llevados dentro de estas VEs y luego "enviados" fuera de la célula. Lo más sorprendente es que estas VEs también pueden fusionarse con la membrana de la célula que recibe el mensaje, ¡como si la cápsula se abriera para entregar su contenido directamente dentro! Así es como los ARNs pueden pasar de una célula a otra, o de una planta a un

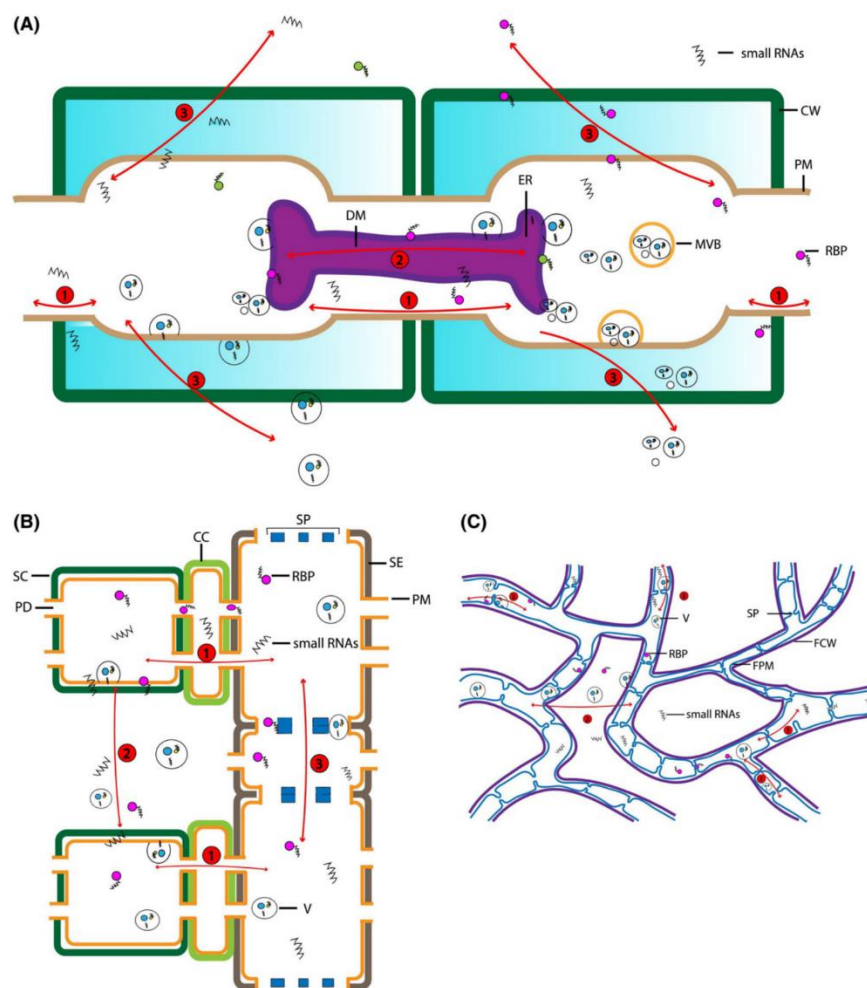


Figura 2. Transporte de sARN en organismos. (A) Movimiento de célula a célula en las plantas, los sARN desnudos, sARN unidos a proteínas de unión a ARN (RBP) y los sARN en (cuerpos vesiculares múltiples, MVB) pueden viajar de una célula a otra a través de plasmodesmos hasta los espacios extracelulares, y otras células también pueden absorber sARN. (B) Movimiento de larga distancia en plantas, los sARN pueden transportarse desde las células fuente (SC) a las células compañeras (CC), los sARN pueden secretarse a partir de PM y viajar a través de la pared celular vegetal (CW) hasta espacios extracelulares y posteriormente ser absorbidos por otras células (C) Movimiento en hongos, los sARN pequeños se transportan a distancias cortas de célula a célula a través del poro septal (SP); pueden secretarse fuera de la membrana plasmática y viajar a través de la pared celular hasta los espacios extracelulares (Wang & Dean 2020).



patógeno (Ahmadi Badi 2020, Cai *et al.* 2018, Schatz 2021, Yu *et al.* 2022).

El siguiente paso de la transferencia de ARN entre reinos: Ahora la investigación ha dado un paso más allá y ha descubierto algo fascinante sobre cómo las plantas usan estas "cápsulas" para defenderse. Recientemente, un grupo de científicos (Wang *et al.* 2024) infectaron dos tipos de plantas (*Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. y *Nicotiana benthamiana* Domin) con un hongo patógeno llamado *Fusarium oxysporum* Schltdl. Lo que encontraron fue sorprendente: ¡las plantas son capaces de enviar sus propios ARNm (un tipo de ARN que contiene instrucciones para fabricar proteínas) dentro de sus vesículas extracelulares directamente al hongo! Estos ARNm vegetales transportados en las "cápsulas" incluían genes relacionados con cómo la planta responde al estrés, se defiende y cómo funciona su metabolismo. Al llegar al hongo, estos mensajes genéticos de la planta ¡provocaban que el hongo creciera más lento y fuera menos dañino para la planta! Esto sucedía porque los ARNm de la planta silenciaban genes importantes del hongo, genes que el hongo necesitaba para poder atacar y causar la enfermedad.

Este descubrimiento ofrece una idea muy prometedora para proteger a las plantas de enfermedades. ¡Podríamos aprender a potenciar esta capacidad natural de las plantas para enviar "mensajes de defensa" a los hongos y así desarrollar nuevas estrategias para mantener nuestros cultivos sanos!

Referencias

Ahmadi Badi S., Bruno S. P., Moshiri A., Tarashi S., Siadat S. D., & Masotti A. 2020. Small RNAs in outer membrane vesicles and their

function in host-microbe interactions. *Frontiers in Microbiology* 11: 517563.

<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01209>

Cai Q., Qiao L., Wang M., He B., Lin F. M., Palmquist J., Huang S. D., & Jin H. 2018. Plants send small RNAs in extracellular vesicles to fungal pathogen to silence virulence genes. *Science* 360(6393): 1126-1129.

<https://orcid.org/0000-0001-9219-9608>

Couh-Dzul O. J., Carreón-Anguiano K. G., Moreno-Valenzuela O. A., & Canto-Canché B. 2023. Considerations about interference RNA for the control of fungal diseases in Mexican and Latin American agriculture. *Revista Mexicana de Fitopatología* 41(3): 479-513.

<http://dx.doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2210-5>

Colombo M., Raposo G., & Théry C. 2014. Biogenesis, secretion, and intercellular interactions of exosomes and other extracellular vesicles. *Annual review of cell and developmental biology* 30: 255-289.

<https://doi.org/10.1146/annurev-cellbio-101512-122326>

Finnegan E. J. & Matzke M. A. 2003. The small RNA world. *Journal of cell Science* 116(23): 4689-4693.

<https://doi.org/10.1242/jcs.00838>

Garbian Y., Maori E., Kalev H., Shafir S., & Sela I. 2012. Bidirectional transfer of RNAi between honey bee and Varroa destructor: Varroa gene silencing reduces Varroa population. *PLoS pathogens* 8(12): e1003035.

<https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1003035>

Guduric-Fuchs J., O'Connor A., Camp B., O'Neill C. L., Medina R. J., Simpson D. A 2012. Selective extracellular vesicle-mediated export of an overlapping set of microRNAs from multiple cell types. *BMC genomics* 13: 1-14.

<https://doi.org/10.1186/1471-2164-13-357>



- Mizuno T., Chou M. Y., & Inouye M. 1984. A unique mechanism regulating gene expression: translational inhibition by a complementary RNA transcript (micRNA). *Proceedings of the National Academy of Sciences* 81(7): 1966-1970.
<https://doi.org/10.1073/pnas.81.7.1966>
- Mueth N. A. & Hulbert S. H. 2022. Small RNAs target native and cross-kingdom transcripts on both sides of the wheat stripe rust interaction. *Genomics* 114(6): 110526.
<https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2022.110526>
- Sánchez M. L. 2017. El silenciamiento génico. Asociación Bioquímica Argentina (Ed.). *Bioquímica y Patología Clínica* 81(3): 41-51.
<http://dx.doi.org/10.62073/bypc.v81i3.101>
- Schatz D. S., Schleyer G., Saltvedt M. R., Sandaa R.-A., Feldmesser E., & Vardi A. 2021. Ecological significance of extracellular vesicles in modulating host-virus interactions during algal blooms. *The ISME Journal* 15(12): 3714-3721.
<https://doi.org/10.1038/s41396-021-01018-5>
- Wang M. & Dean R. A. 2020. Movement of small RNAs in and between plants and fungi. *Molecular Plant Pathology* 21(4): 589-601.
<https://doi.org/10.1111/mpp.12911>
- Wang S., He B, Wu H., Cai Q., Ramírez-Sánchez O., Abreu-Goodger C., Birch P. R. J., & Jin H. 2024. Plant mRNAs move into a fungal pathogen via extracellular vesicles to reduce infection. *Cell Host & Microbe* 32(1): 93-105.
<https://doi.org/10.1016/j.chom.2023.11.020>
- Weiberg A. W., Wang M, Lin F. M., Zhao H., Zhang Z., Kaloshian I., Huang H. D., & Jin H. 2013. Fungal small RNAs suppress plant immunity by hijacking host RNA interference pathways. *Science* 342(6154): 118-123.
<https://doi.org/10.1126/science.1239705>
- Xoconostle-Cázares B., Xiang Y., Ruiz-Medrano R., Wang H. L., Monzer J., Yoo B. C., McFarland K. C., Franceschi V. R., & Lucas W. J. 1999. Plant paralog to viral movement protein that potentiates transport of mRNA into the phloem. *Science* 283(5398): 94-98.
<https://doi.org/10.1126/science.283.5398.94>
- Yu S. Z., Zhao Z., Hao P., Qiu Y., Zhao M., Zhou G., Zhang C., Kang J., & Li P. 2022. Biological functions and cross-Kingdom host gene regulation of small RNAs in *Lactobacillus Plantarum* derived extracellular vesicles. *Frontiers in microbiology* 13: 944361.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.944361>
- Zeng J., Kumar Gupta V., Jiang Y., Yang B., Gong L., & H. Zhu 2019. Cross-kingdom small RNAs among animals, plants and microbes. *Cells* 8(4): 371.
<https://doi.org/10.3390/cells8040371>
- Zhou G., Zhou Y., & Chen X. 2017. New insight into inter-kingdom communication: horizontal transfer of mobile small RNAs. *Frontiers in Microbiology* 8: 768.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00768>
- Zhu C., Liu T., Chang Y. N., & Duan C. G. 2019. Small RNA functions as a trafficking effector in plant immunity. *International Journal of Molecular Sciences* 20(11): 2816.
<https://doi.org/10.3390/ijms20112816>



Desde el Herbario CICY, 17: 111-118 (22-mayo-2025), es una publicación semanal editada por el Herbario CICY del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., con oficinas en Calle 43 x 32 y 34 No. 130, Col. Chuburná de Hidalgo, C.P. 97205, Mérida, Yucatán, México. Tel. 52 (999) 942-8330 Ext. 110, www.cicy.mx/Sitios/Desde_Herbario/, webmas@cicy.mx. Editores responsables: Germán Carnevali, Patricia Rivera Pérez y José Luis Tapia Muñoz. Reserva de Derechos al Título Exclusivo No. 04-2016-041413195700-203, otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor, ISSN: 2395-8790. Responsable de la publicación: José Fernely Aguilar Cruz, Calle 43 x 32 y 34 No. 130, Col. Chuburná de Hidalgo, C.P. 97205, Mérida, Yucatán, México. Fecha de última modificación: 22 de mayo de 2025. Las opiniones expuestas por los autores no necesariamente expresan la postura del editor de la publicación. De la misma manera, la responsabilidad sobre la veracidad y la precisión de los contenidos, le corresponde totalmente a los autores de los ensayos.