

Natalia-Getsemani Franco-Jiménez, Julio-Armando Massange-Sánchez y Rafael Urrea-López

Silenciamiento de genes en plantas, una herramienta biotecnológica para la agricultura y la conservación

Resumen

El silenciamiento de genes inducido por virus (vigs, por sus siglas en inglés) es una novedosa herramienta que aprovecha los propios mecanismos de defensa de las plantas para estudiar la función de los genes de la planta. El vigs tiene el potencial de generar modernas aplicaciones biotecnológicas en la agricultura y la conservación.

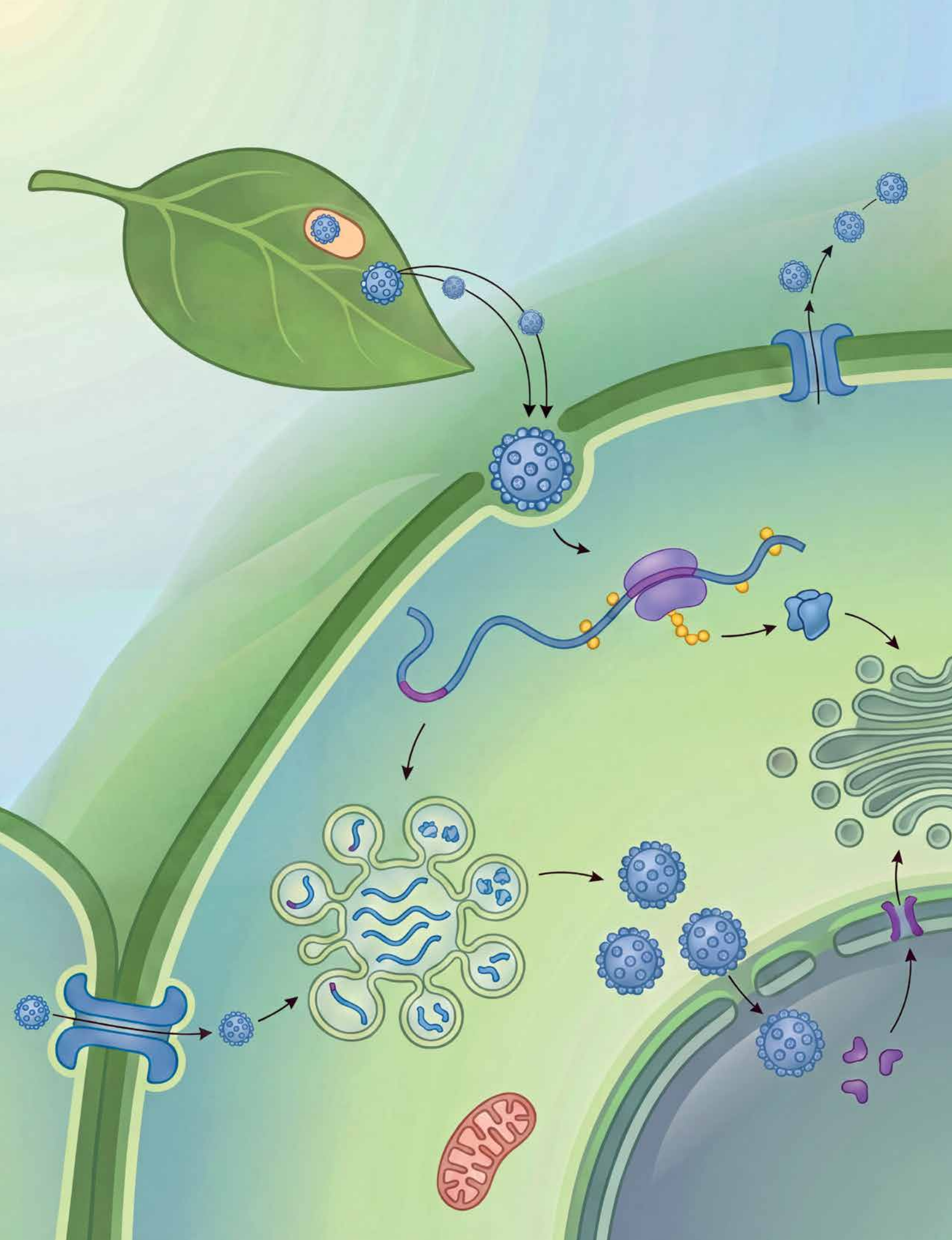
Abstract

Virus-induced gene silencing (vigs) is an innovative tool that harnesses plants' own defense mechanisms to study the function of plant genes. vigs has the potential to lead to cutting-edge biotechnological applications in agriculture and conservation.

Los virus y las plantas

Los virus son pequeñas partículas infecciosas que no pueden verse a simple vista, pero que llegan a tener un impacto enorme en el ambiente que los rodea. Los virus no pueden reproducirse por sí mismos, por lo que están diseñados para inyectar su material genético en una célula huésped y así tomar el control de la maquinaria celular, con el fin de producir miles de copias de sí mismos, lo cual tiene como consecuencia una carga metabólica excesiva que desgasta a la célula huésped, o incluso puede causar una lisis (ruptura) de la célula.

La infección de células por virus es como si un incendio comenzara en un pequeño rincón y, sin freno, se extendiera a lo largo de todo un bosque. Los virus usan diferentes medios de transporte para llegar hasta sus víctimas (células huésped). El SARS-CoV-2, virus causante del COVID-19, se propaga vía las secreciones de personas contagiadas –los aerosoles al estornudar, por ejemplo–. En las plantas, los virus se transmiten a través de insectos que, al alimentarse de una planta infectada, los pasan a otras sanas.



■ El silenciamiento de genes: “pausando genes” en las plantas

■ El estudio de los virus y de su interacción con las plantas ha contribuido a entender el proceso de **patogenicidad** y el sistema inmunológico celular, pero también a explorar el uso de los virus como herramientas en el estudio de la fisiología celular y molecular de las plantas. Las plantas, al igual que los seres humanos, poseen un sistema de defensa que les permite responder cuando sufren un ataque por parte de organismos patógenos, como es el caso de los virus. Al detectar estas amenazas, las plantas activan mecanismos de defensa para impedir que el virus las infecte y les cause daño. Entre estos mecanismos, destaca el “silenciamiento de genes”.

Este artículo se enfoca en el silenciamiento de genes postranscripcional y explora cómo este proceso contribuye a la defensa de las plantas contra los virus y su potencial uso en investigación. Para diferenciar entre el silenciamiento transcripcional y el postranscripcional es útil recordar el dogma central de la biología molecular, que dice que la información genética fluye en una sola dirección, el ADN se transcribe a ARN mensajero (ARNm) y éste se traduce a proteína (**Figura 1**). El silenciamiento –que es una forma de “pausar-genes”, o bien de interferir en los genes– puede bloquear la transcripción del ADN, en un proceso conocido como silenciamiento de genes transcripcional (TGS, por sus siglas en inglés); o bloquear la traducción del ARNm –la molécula que

Patogenicidad
Capacidad de un agente infeccioso para causar enfermedades.

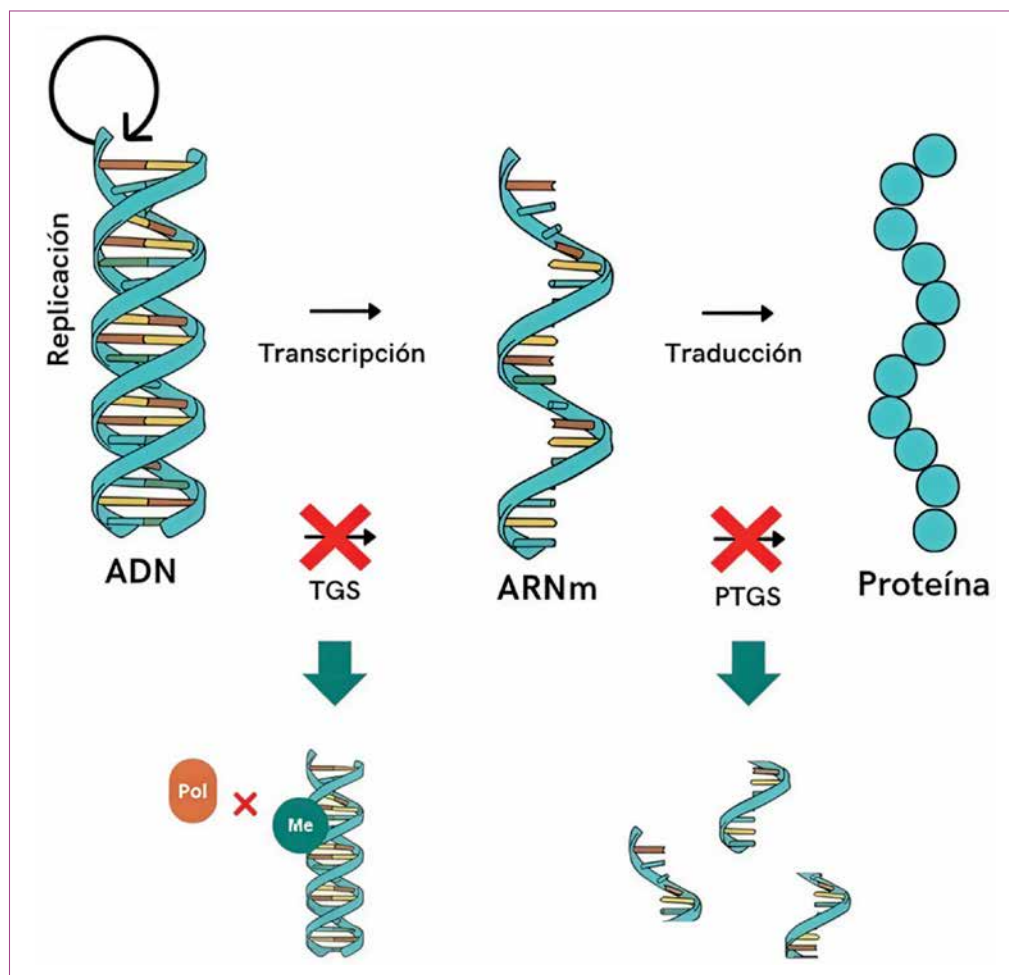


Figura 1. Representación del dogma central de la biología molecular, que muestra los procesos de transcripción y traducción. Además, se señalan los puntos de silenciamiento de genes transcripcional y postranscripcional. En el silenciamiento transcripcional, la metilación (Me) del ADN impide la unión de la ADN polimerasa (Pol) afectando su transcripción. En el silenciamiento postranscripcional, el ARN mensajero puede ser bloqueado o degradado, lo que impide su traducción a proteína.

transporta las instrucciones para fabricar proteínas—, lo que se denomina silenciamiento de genes pos-transcripcional (PTGS, por sus siglas en inglés).

¿Cómo se defiende una planta?

El silenciamiento de genes postranscripcional de las plantas se compone de diferentes elementos que actúan de forma coordinada para identificar y destruir secuencias de ARN de virus. El elemento clave para la identificación del virus proviene de la memoria inmunológica (Landeo-Ríos y cols., 2017). Cada vez que una célula sobrevive al ataque de un virus, guarda en su propio genoma un fragmento de la secuencia del virus, que luego se transcribe como un ARN pequeño de interferencia (siRNA, por sus siglas en inglés); entre 20 y 24 pares de bases son suficientes

para reconocer ARN de virus. Por otro lado, el elemento clave para destruir secuencias de ARN extrañas es un conjunto de múltiples proteínas conocido como complejo de silenciamiento inducido por ARN (RISC, por sus siglas en inglés), que tiene la función de evaluar múltiples moléculas de ARN presentes en la célula en busca de aquellas que coincidan con el siRNA y —una vez que encuentra una complementaria— de inhibir la traducción del ARN a proteínas (Figura 2), con lo cual rompe con el proceso de ensamblaje de nuevos virus, y por tanto impide el daño a la planta.

La biología del silenciamiento y nuestro mundo informático

El silenciamiento génico postranscripcional sucede a nivel molecular en la planta, pero se puede

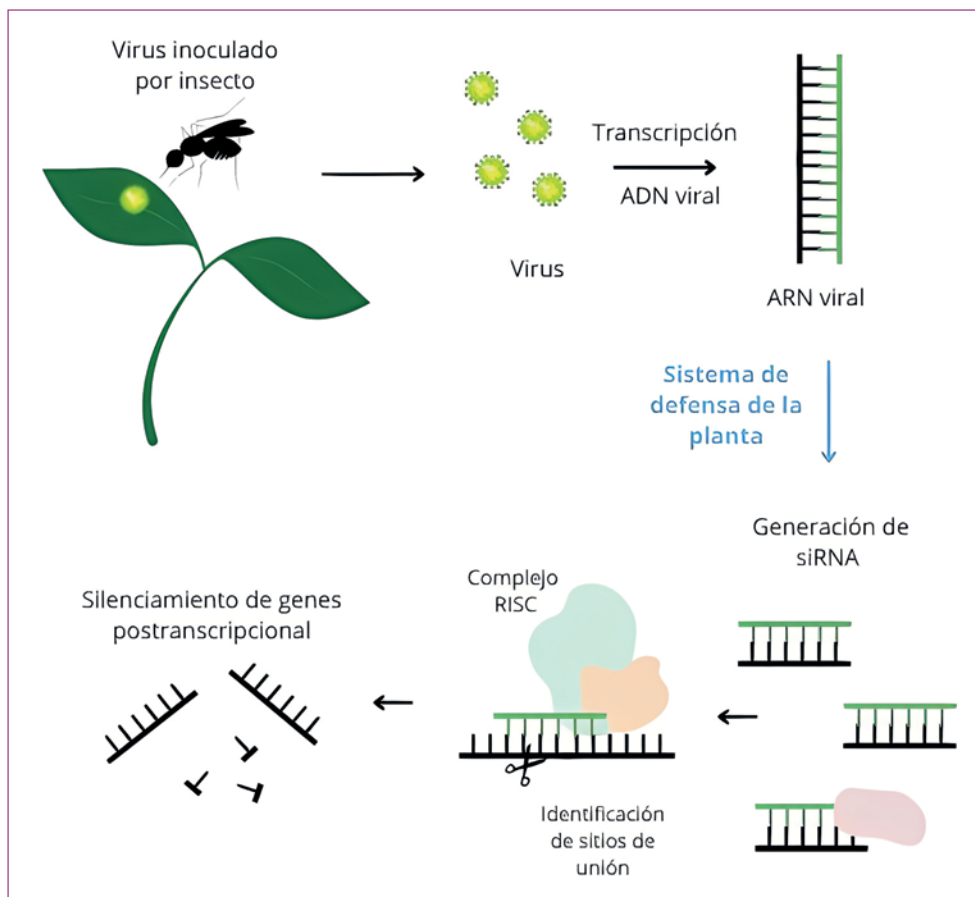


Figura 2. Los virus pueden infectar a las plantas a través de diversos mecanismos, aunque uno de los vectores más comunes son los insectos. En respuesta, el sistema de defensa de la planta detecta el material genético viral y activa el silenciamiento de genes postranscripcional, lo que trunca la producción de nuevas proteínas virales y por tanto la replicación del virus.

visualizar de una manera más clara con algo de uso cotidiano. Cuando se inserta en una computadora portátil una memoria USB, por ejemplo, se lleva a cabo un escaneo para determinar si la memoria tiene un virus. Si detecta uno, el sistema activa un antivirus que intenta bloquear el daño y proteger los documentos. De manera similar, cuando un virus transfiere su material genético a las células de una planta, el sistema de defensa de la planta se activa. Primero, detecta el material genético del virus y, después, silencia sus genes para evitar que se traduzcan en proteínas, las cuales son esenciales para que el virus se multiplique y propague dentro de la planta.

En otras palabras, la planta “detecta” el ARNm viral y lo degrada antes de que pueda cumplir su función. Así, la planta bloquea la propagación del virus y se protege de la infección.

■ **¿Cómo funciona el silenciamiento de un gen?**

■ Ahora bien, ¿qué significa realmente “silenciar un gen”? Es un término que despierta curiosidad; pero ¿cómo se silencia un gen? ¿Acaso los genes pueden

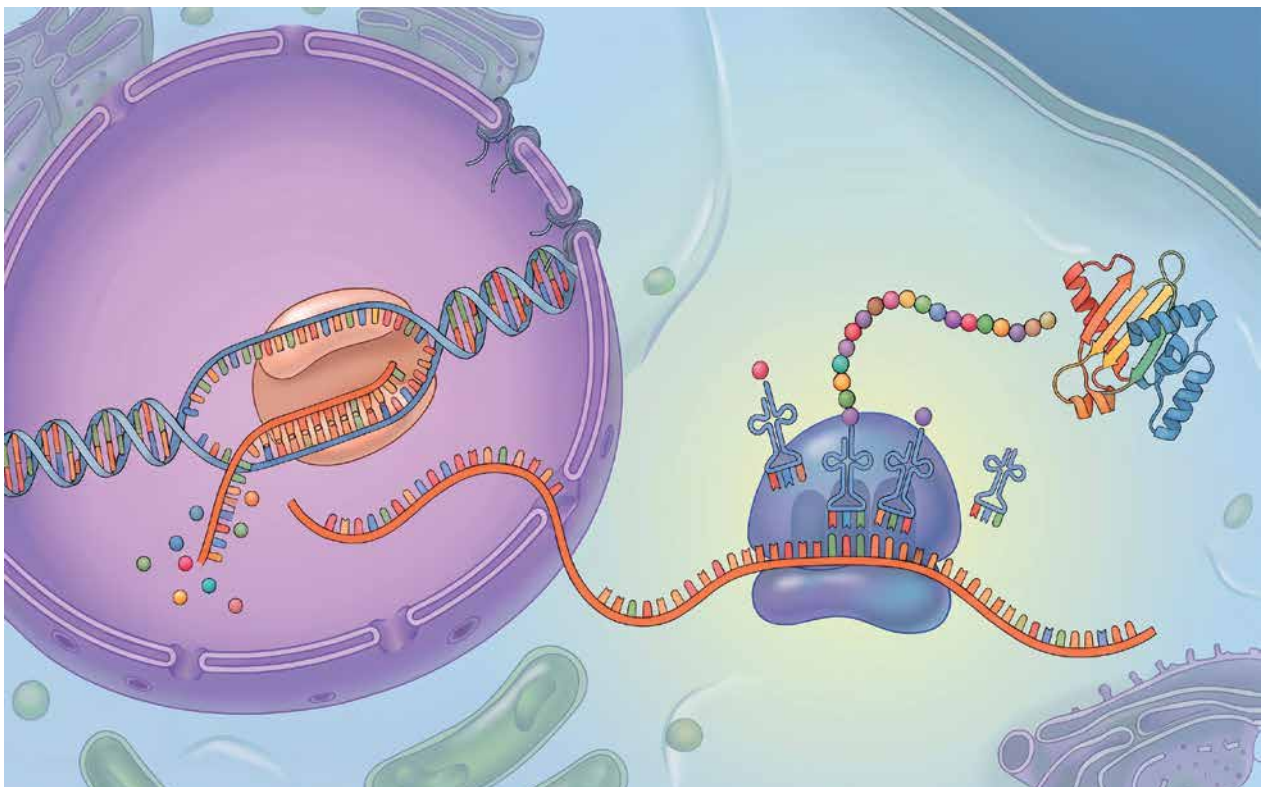
“hablar”? Por supuesto que no se trata de silenciar sonidos. En este contexto, “silenciar un gen” se refiere a interferir en su expresión, pues aunque el gen sigue presente en la célula, lo que se busca es impedir que se manifieste (exprese) y por tanto se evita su función.

En términos más específicos, silenciar un gen significa bloquear el proceso por el cual la información contenida en el ADN se convierte en una proteína funcional. Al interrumpir esta cadena de eventos, se logra que el gen “guarde silencio” y no produzca la proteína que normalmente generaría.

En el estudio de la biología de plantas, el mecanismo de silenciamiento puede utilizarse como herramienta para estudiar la función de genes de la misma planta. Al silenciar de forma transitoria un gen, se puede indagar su actividad en los diferentes procesos celulares.

■ **El silenciamiento de genes como herramienta de biología molecular**

■ Las plantas cuentan con miles de genes, y muchos de ellos aún guardan secretos sobre sus funciones.



Comprender para qué sirve cada uno es un paso esencial en la investigación científica, ya que ayuda a entender procesos biológicos fundamentales y desarrollar nuevas aplicaciones en agricultura o biotecnología. Una forma de estudiar la función de un gen ha sido provocando una pérdida de la función del gen por medio de la mutación de su secuencia, lo que se conoce como “noqueo” del gen (del inglés *knockout*). Esto requiere una modificación estable del genoma que puede ser costosa, compleja y requerir mucho tiempo. Otra desventaja es que puede ser letal en estadios jóvenes de desarrollo de la planta. Como alternativa a esas dificultades han surgido las técnicas de transformación transitorias, que no modifican el genoma, sino que reducen la **expresión génica** mediante el silenciamiento postranscripcional, sin modificar de forma estable su genoma; es decir, sin noquear al gen.

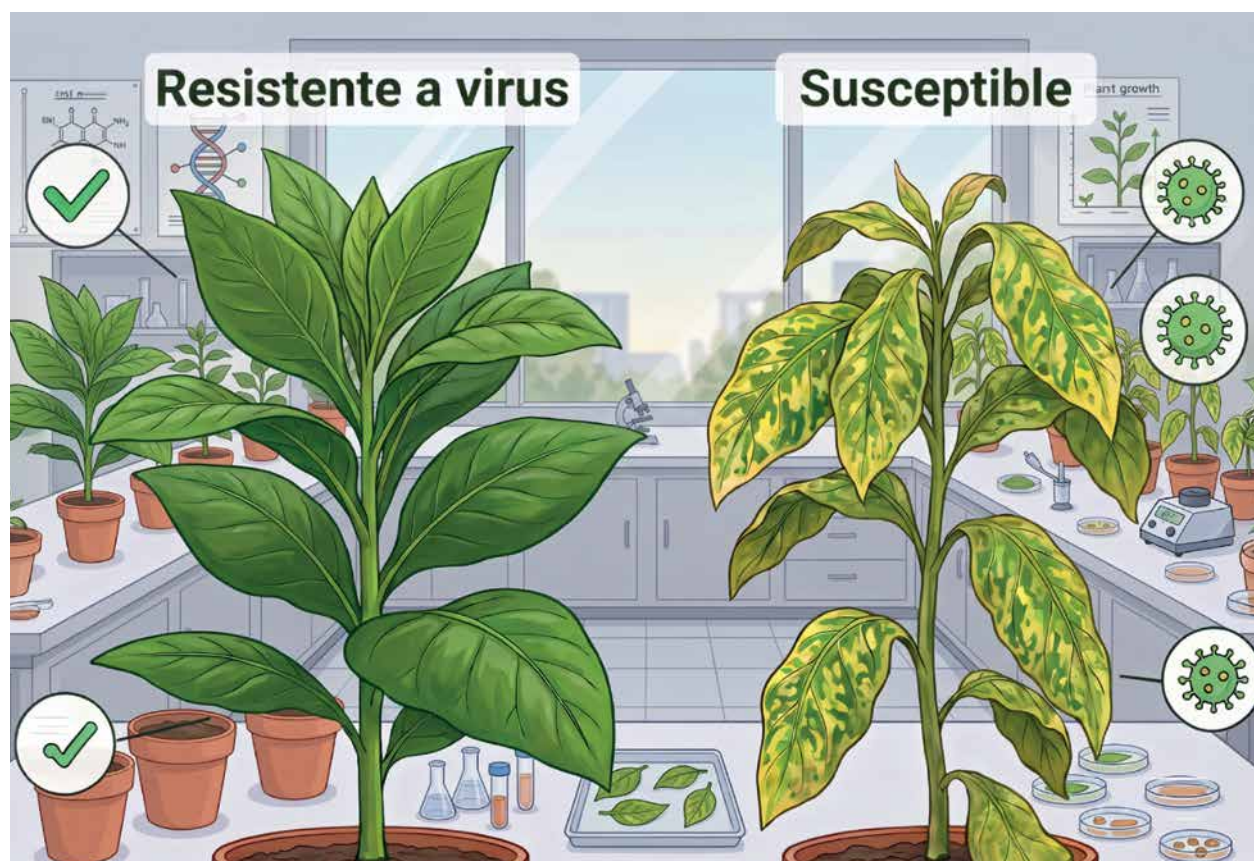
Una de las técnicas transitorias es, precisamente, el silenciamiento genético inducido por virus (VIGS). Este enfoque aprovecha el propio sistema de defensa

natural de las plantas para silenciar de forma temporal y específica genes seleccionados y usa como vectores a virus vegetales, para transportar y replicar dentro de las células vegetales el gen de interés, lo que permite estudiar sus funciones sin necesidad de generar modificaciones genéticas permanentes (Adhikary y cols., 2019).

El proceso es ingenioso: se inserta un fragmento de un gen (no el gen completo) de la misma planta en un vector viral. Al infectar la planta con el vector viral, se activa en la planta el sistema de defensa natural PTGS, que ataca al virus. Pero, adicionalmente, el sistema inmunológico de la planta reconoce el fragmento del gen como algo extraño que debe interrumpir a través del silenciamiento PTGS. Es decir, al integrar una secuencia de un gen de la propia planta, la maquinaria de defensa, al intentar combatir el fragmento que reconoce como extraño, se dirigirá a los ARNm correspondientes de la propia planta, reduciendo la producción de proteínas y, en consecuencia, silenciando su actividad. De esta

Expresión génica

Controla cuándo y cuánto ARN y proteínas se producen en las células.



forma, mediante el silenciamiento de un gen de la propia planta se puede indagar su función.

El método vigs ha demostrado ser eficiente para desactivar la expresión de un gen y se ha convertido en una herramienta clave para regular la expresión génica, y es aplicable a la **genética inversa** en estudios funcionales de genes en plantas. Para lograr esto, se utilizan vectores virales de ADN o ARN, y estos últimos son los más usados debido a su pequeño peso molecular, mayor capacidad de movimiento dentro de la planta y alta eficiencia de infección.

El uso de vectores virales en la investigación científica varía según la planta que se esté estudiando. Esto se debe a que la mayoría de los vectores virales son efectivos únicamente en un número limitado de especies huésped. Por esta razón, se han desarrollado diversos tipos de vectores diseñados específicamente para diferentes familias de plantas. La elección del vector adecuado para un experimento depende directamente de los resultados previos observados en plantas relacionadas (Senthil-Kumar y Mysore, 2011).

Para evaluar y monitorear con precisión la eficiencia del silenciamiento mediante vigs, se recomienda empezar utilizando **genes reporteros** que actúan significativamente en los rasgos fenotípicos visibles, debido a que éstos impactan en la pigmentación de la planta (Tian y cols., 2024) cambiando las hojas de color verde o morado a blanco.

La técnica de vigs ha transformado la manera en que los científicos estudian los genes en plantas. Con

el método vigs, es posible identificar rápidamente las funciones de genes específicos sin necesidad de recurrir a procedimientos largos y complicados, lo que abre nuevas posibilidades para la investigación y la innovación en biología vegetal.

■ ■ ■ El futuro del método vigs

■ La pérdida de cultivos a causa de enfermedades provocadas por patógenos es un problema creciente en la agricultura moderna, que afecta la rentabilidad económica y compromete la seguridad alimentaria global. Una de las estrategias más eficientes y rentables para enfrentar este desafío es el desarrollo de cultivos resistentes a virus. Sin embargo, la complejidad y agresividad de estos patógenos requiere el desarrollo de variedades con resistencias duraderas y efectivas (Zhao y cols., 2020).

En este contexto, la ingeniería genética ha revolucionado el panorama al introducir metodologías más rápidas y eficientes. A diferencia de los métodos convencionales, el vigs no requiere modificaciones permanentes en el ADN de la planta, lo que reduce significativamente los tiempos de transformación y experimentación. Esto convierte al vigs en una herramienta de gran utilidad para la validación funcional de genes en plantas no modelo y para el desarrollo de cultivos con características mejoradas en menor tiempo.

Técnicas innovadoras como el vigs permiten acelerar el desarrollo de cultivos más resistentes y

Genética inversa
Estudio de la función de un gen modificando su secuencia de ADN y observando los efectos que produce en el organismo.

Gen reportero
Al expresarse permite su visualización de forma rápida y sencilla.

Tabla 1. Ejemplos de la utilidad del vigs en el estudio y mejoramiento de cultivos.

Cultivo	Gen silenciado	Vector viral	Objetivo agronómico	Referencia
<i>Pisum sativum</i> (guisante)	PsPT4	PEBV	Estudio de genes clave en la simbiosis con hongos micorrícicos arbusculares (HMA).	Grønlund y cols., 2010
<i>Triticum aestivum</i> (trigo)	<i>Era1</i> y <i>Sal1</i>	BSMV	Tolerancia a la sequía.	Manmathan y cols., 2013
<i>Glycine max</i> (soya)	GmRPA3	BPMV	Mayor contenido de clorofila en condiciones de deficiencia de hierro.	Atwood y cols., 2014
<i>Prunus persica</i> (durazno)	eIF(iso)4E	PPV	Resistencia al virus (<i>Sharka</i>).	Cui y Wang, 2017
<i>P. avium</i> (cereza)	PaCYP78A6	TRV	Desarrollo y maduración del fruto.	Qi y cols., 2019

resilientes, ofreciendo soluciones precisas y eficientes a los desafíos de la agricultura. Estas tecnologías prometen transformar la producción agrícola haciéndola más sostenible y adaptada a las crecientes demandas globales y a los cambios ambientales. En la **Tabla 1** se presentan diferentes ejemplos.

Natalia-Getsemani Franco-Jiménez

Unidad de Biotecnología Vegetal, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ).

natalia.009904@gmail.com

Julio-Armando Massange-Sánchez

Unidad de Biotecnología Vegetal, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ).

jmassange@ciatej.mx

Rafael Urrea-López

Unidad de Biotecnología Vegetal, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ).

rurrea@ciatej.mx



Lecturas recomendadas

- Adhikary, D., U. Khatri-Chhetri, F. J. M. Tymms, S. J. Murch y M. K. Deyholos (2019), "A virus-induced gene-silencing system for functional genetics in a betalainic species, *Amaranthus tricolor* (Amaranthaceae)", *Applications in Plant Sciences*, 7(2):1-9. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/aps3.1221>.
- Atwood, S. E., J. A. O'Rourke, G. A. Peiffer, T. Yin, M. Majumder *et al.* (2014), "Replication protein A subunit 3 and the iron efficiency response in soybean", *Plant, Cell and Environment*, 37(1):213-234. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/pce.12147>.
- Cui, H. y A. Wang (2017), "An efficient viral vector for functional genomic studies of Prunus fruit trees and its induced resistance to Plum pox virus via silencing of a host factor gene", *Plant Biotechnology Journal*, 15(3):344-356. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/pbi.12629>.
- Grønlund, M., A. Olsen, E. I. Johansen e I. Jakobsen (2010), "Protocol: Using virus-induced gene silencing to study the arbuscular mycorrhizal symbiosis in *Pisum sativum*", *Plant Methods*, 6(28):1-8. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/1746-4811-6-28>.
- Landeo-Ríos, Y., J. Navas-Castillo, E. Moriones y M. C. Cañizares (2017), "Supresión viral del silenciamiento por RNA en plantas", *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40(2):181-197. Disponible en: <https://revistafitotecniamexicana.org/documentos/40-2/7a.pdf>, consultado el 13 de julio de 2026.
- Manmathan, H., D. Shaner, J. Snelling, N. Tisserat y N. Lapitan (2013), "Virus-induced gene silencing of *Arabidopsis thaliana* gene homologues in wheat identifies genes conferring improved drought tolerance", *Journal of Experimental Botany*, 64(5):1381-1392. Disponible en: <https://doi.org/10.1093/jxb/ert003>.
- Qi, X., C. Liu, L. Song y M. Li (2019), "*Arabidopsis* EOD3 homologue PaCYP78A6 affects fruit size and is involved in sweet cherry (*Prunus avium* L.) fruit ripening", *Scientia Horticulturae*, 246:57-67. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.10.041>.
- Senthil-Kumar, M. y K. S. Mysore (2011), "New dimensions for vigs in plant functional genomics", *Trends in Plant Science*, 16(12):656-665. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.08.006>.
- Tian, Y., Y. Fang, K. Zhang, Z. Zhai, Y. Yang *et al.* (2024), "Applications of Virus-Induced Gene Silencing in Cotton", *Plants*, 13(2):1-16. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/plants13020272>.
- Zhao, Y., X. Yang, G. Zhou y T. Zhang (2020), "Engineering plant virus resistance: from RNA silencing to genome editing strategies", *Plant Biotechnology Journal*, 18(2):328-336. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/pbi.13278>.