QUIMIOFILIA
Divulgación de la Ciencia Química

Quimiofilia, **2026**, *5*, 2, 1-7
DOI https://doi.org/10.56604/qfla20265217

OPEN ACCESS

Mecanoquímica y química verde: dos temas actuales de la química



C. Gabriela Ávila-Ortiz. Departamento de Química, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Av. IPN # 2508, San Pedro Zacatenco 07360 Ciudad de México, México. cgavila@cinvestav.mx *ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-7837-449X*

Graduada con Mención Honorífica de la carrera de Química de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, y posteriormente, realizó sus estudios de Doctorado en Ciencias Químicas en el Departamento de Química del Cinvestav. Actualmente es Auxiliar de Investigación en el grupo del Dr. Juaristi. Se especializa en Síntesis Asimétrica, Organocatálisis y Química Verde.



Carlos Naranjo Castañeda. Departamento de Química, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Av. IPN # 2508, San Pedro Zacatenco 07360 Ciudad de México, México. *ORCID: https://orcid.org/0009-0008-8332-1091*

Es egresado de la Facultad de Estudios Superiores -Zaragoza de la Universidad Nacional Autónoma de México y posteriormente, realizó sus estudios de Doctorado en Ciencias Químicas en el Departamento de Química del Cinvestav. Su trabajo de investigación se ha enfocado en el uso de la mecanoquímica en la síntesis de compuestos orgánicos.



Eusebio Juaristi. Departamento de Química, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Av. IPN # 2508, San Pedro Zacatenco 07360 Ciudad de México, México. El Colegio Nacional, Luis González Obregón # 23, Centro Histórico, 06020 Ciudad de México, México. e-mail: o ejuarist@cinvestav.mx *ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0936-7020*

Es Profesor Emérito del Departamento de Química del Cinvestav. Sus líneas de investigación incluyen síntesis asimétrica, análisis conformacional (efectos estereoelectrónicos como el efecto anomérico), organocatálisis, química verde y uso de la mecanoquímica y mecanoenzimología en la síntesis de compuestos orgánicos. Entre sus reconocimientos se encuentran el Premio Manuel Noriega, de la OEA (1990); el Premio Nacional de Química "Andrés Manuel del Río" (1994), el Premio Nacional de Ciencias y Artes (1998), "Premio Heberto Castillo, Por una Ciudad con Ciencia 2019" y Premio "Crónica" 2023 en el área de academia. Fue reconocido en el año 2024 como uno de los 18 químicos latinoamericanos más destacados en la actualidad. El Dr. Eusebio Juaristi ingresó en El Colegio Nacional el 13 de febrero de 2006.

Resumen

Uno de los principales retos para los químicos de hoy consiste en el desarrollo de procesos amigables con el medio ambiente. Históricamente, no había un interés por analizar el impacto de los reactivos, catalizadores y disolventes en cuanto a su toxicidad y degradación. Lo anterior ha puesto en peligro a numerosas especies y también la salud de diversas poblaciones que han sido expuestas a estos compuestos. Ahora, los gobiernos y las empresas han impulsado un nuevo enfoque en la manera de hacer química priorizando la preservación de nuestro entorno. Ese nuevo enfoque es la llamada Química Verde. Este artículo describe a modo general, los avances en el grupo del Dr. Eusebio Juaristi (Profesor Emérito del Departamento de Química del Cinvestav) en el área de la Química Verde y en particular en el uso de la Mecanoquímica como herramienta sustentable en la síntesis de compuestos orgánicos.

Palabras Clave

Organocatálisis, química verde, resoluciones enzimáticas.

Cite este artículo así:
APA: Ávila-Ortíz, C. Naranjo-Castañeda, C. Juaristi, E. (2026). Mecanoquímica y química verde: dos temas actuales de la química. *Quimiofilia*, *5*, (2), 1-7.
MDPI y JACS: Ávila-Ortíz, C.; Naranjo-Castañeda, C.; Juaristi, E.; *Quimiofilia*, **2026**, *5*, 2, 1-7.
DOI: https://doi.org/10.56604/qfla20265217

Recibido:06 de mayo 2026**. Aceptado:** 24 de junio 2026. **Publicado.** 15 de octubre de 2026.
www.quimiofilia.com. **ISSN: 2683-2364. Registro IMPI:** 2052060 QUIMIOFILIA. **Reserva de derechos al uso exclusivo 2022:** 04-2019-062013201300-203

Reflexión rápida

¿Son posibles procesos químicos altamente eficientes en ausencia de disolvente?

Curso de dos minutos

Química Verde: Es el diseño y estudio de procesos y productos químicos que permitan reducir el uso y generación de compuestos peligrosos para la vida y el medio ambiente.
Organocatalizador: Es una molécula orgánica sencilla que es capaz de promover una reacción química sin la necesidad de incorporar metales o enzimas.
Mecanoquímica: Consiste en el uso de la energía mecánica (fricción e impacto) para promover reacciones químicas en condiciones libres de disolvente.
Mecanoenzimología: Es un nuevo campo de investigación que aprovecha la mecanoquímica y la biocatálisis en la obtención de compuestos orgánicos.

Minibiografía

Arthur Robert Ling (1861-1937) publicó en 1983 el primer reporte de un proceso mecanoqúimico en síntesis orgánica preparando derivados halogenados de quinhidrona.

Introducción

La química, una ciencia que ha contribuido a mejorar nuestra forma de vida, también ha tenido ocasionalmente un impacto desfavorable en la calidad del medio ambiente. Consecuentemente, en la actualidad los químicos trabajan activamente para hacer que la química sea más sustentable. En especial, la Química Verde es un enfoque innovador y prometedor, que busca eliminar la producción y el uso de sustancias tóxicas o peligrosas. Es en este contexto que la mecanoquímica emerge como una herramienta clave para lograr un futuro más limpio y sustentable (Figura 1).



Figura 1. *Una representación artística del concepto de Química Verde. Imagen generada por Meta IA.*

En este artículo, se explora la conexión entre la Química Verde y la mecanoquímica, una técnica que utiliza energía mecánica para activar reacciones químicas de manera limpia y eficiente. Así mismo, se presentan los antecedentes históricos de esta técnica, sus ventajas y aplicaciones en áreas como la síntesis química, la organocatálisis y la mecanoenzimología, además de mostrar cómo la Química Verde está revolucionando la forma en que se diseñan y realizan experimentos químicos, abriendo nuevas puertas hacia un futuro más sustentable.

La Química Verde es un concepto innovador que busca reducir o eliminar la producción y uso de sustancias potencialmente peligrosas en la química.[1] Para lograr este objetivo, hace algunos años Paul Anastas y John Warner propusieron los doce principios fundamentales que deben guiar el diseño de procesos y productos químicos sustentables[2] (Figura 2).

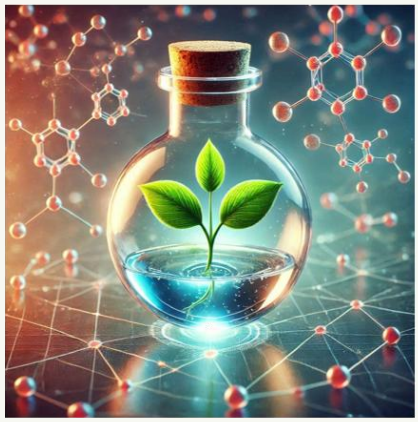
La mecanoquímica es una técnica que satisface varios principios de la Química Verde. En especial, elimina o reduce drásticamente el uso de disolventes (principio número 8). Además, al eludir el uso de disolventes se evitan los costosos procedimientos de recuperación de los disolventes utilizados y se minimiza la generación de residuos. Pero ¿qué es exactamente la mecanoquímica? Se trata de una disciplina que explora cómo la energía mecánica, generada por la fricción y el golpeteo entre sustratos sólidos, en un equipo de molienda puede activar las moléculas y desencadenar reacciones químicas sin la necesidad de disolventes o con una cantidad mínima de los mismos. Esta técnica ofrece varias ventajas clave, como son: 1) la eliminación de disolventes en el seno de la reacción de interés, 2) una reducción significativa del consumo energético, 3) el manejo de compuestos insolubles en algún disolvente o inmiscibles entre sí y 4) la posibilidad de trabajar con reactivos sensibles al aire y la humedad.

Sobresale entonces el hecho de que la mecanoquímica elimina el uso de disolventes en las reacciones químicas, lo que se ajusta al principio de la Química Verde que dicta que es conveniente reducir el empleo de sustancias auxiliares y aditivos en las reacciones químicas (Principio 8 en la Figura 2).

Esta estrategia es especialmente importante, ya que algunos disolventes pueden ser tóxicos o tener consecuencias desfavorables para la salud humana y el medio ambiente (Figura 3). Por ejemplo, el benceno es un conocido carcinógeno humano,[3] el cloroformo puede causar daños en el hígado y los riñones[4] y el diclorometano puede provocar problemas respiratorios y neurológicos.[5]

1. Escalante García, J., Rivera Ramírez, J. D. y Juaristi, E., Editores. "Química Verde: Un Análisis Ético, Científico y Tecnológico". Editorial Quimiofilia, México, **2025**.
2. Anastas, P. T., Warner, J. C. "Green Chemistry: Theory and Practice", Oxford University Press: Oxford, UK, 1998.
3. Sigma-Aldrich. (2025, 8 de noviembre). (Ficha de datos de seguridad n.º 319953) [Ficha de Datos de Seguridad]. Merck. https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/sds/sigald/319953?userType=red
4. Sigma-Aldrich. (2024, 3 de marzo). (Ficha de datos de seguridad n.º CX1060) [Ficha de Datos de Seguridad]. Merck. https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/sds/mm/cx1060?userType=red
5. Sigma-Aldrich. (2024, 24 de diciembre). (Ficha de datos de seguridad n.º 270997) [Ficha de Datos de Seguridad]. Merck. https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/sds/sial/270997?userType=red

1. Prevención de la generación de residuos
2. Economía atómica
3. Síntesis químicas menos tóxicas
4. Diseño de productos químicos seguros
5. Empleo de disolventes seguros
6. Disminución del consumo energético



7. Uso de materias primas renovables
8. Minimizar el empleo de sustancias auxiliares como son los disolventes.
9. Uso de procesos catalíticos
10. Diseño de productos que sean degradables
11. Análisis de contaminantes en tiempo real
12. Minimización de riesgos

Figura 2. *Los 12 principios de la Química Verde. Imagen generada por Meta IA.*

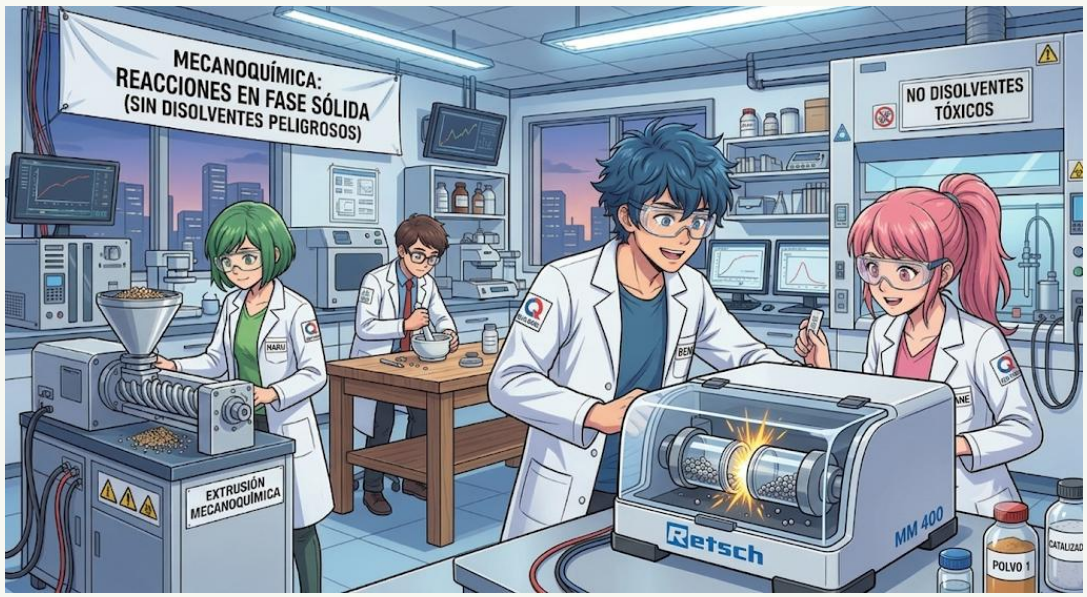


Figura 3. *La mecanoquímica como una alternativa sustentable. Figura creada con Gemini.*

¿Es posible eliminar el uso de disolventes en los procesos químicos?

La respuesta a esta pregunta es interesante. Durante mucho tiempo se creyó que los disolventes eran necesarios para que las reacciones químicas ocurrieran. Sin embargo, la historia nos muestra que esto no siempre es así. En la antigüedad, el filósofo griego Aristóteles sostuvo que "ninguna reacción procede en ausencia de disolvente". Sin embargo, su alumno Teofrasto de Ereso desafió esta aseveración en su obra Acerca de las Piedras (310 a. C.), donde describió un proceso sorprendente: al triturar el mineral cinabrio (sulfuro de mercurio, HgS) en un mortero de cobre, aparecían pequeñas gotas de mercurio metálico – plata líquida, como se le conocía entonces–. ¡La simple molienda de un mineral sólido permitía aislar el mercurio sin necesidad de disolventes! (Figura 4). Este descubrimiento cuestionó la sabiduría convencional de la época y demostró que, en algunos casos, la química puede ocurrir sin la ayuda de líquidos disolventes.[6, 7]

6. Takacs, L. "The Historical Development of Mechanochemistry". *Chem. Soc. Rev.* **2013**, *42*, 7649-7659. DOI: 10.1039/c2cs35442j

7. Valerio-Carmona, K.; Rivera-Ramírez, J. *Quimiofilia*, **2023**, *2*, 23-24. DOI: https://doi.org/10.56604/qfla2023224647

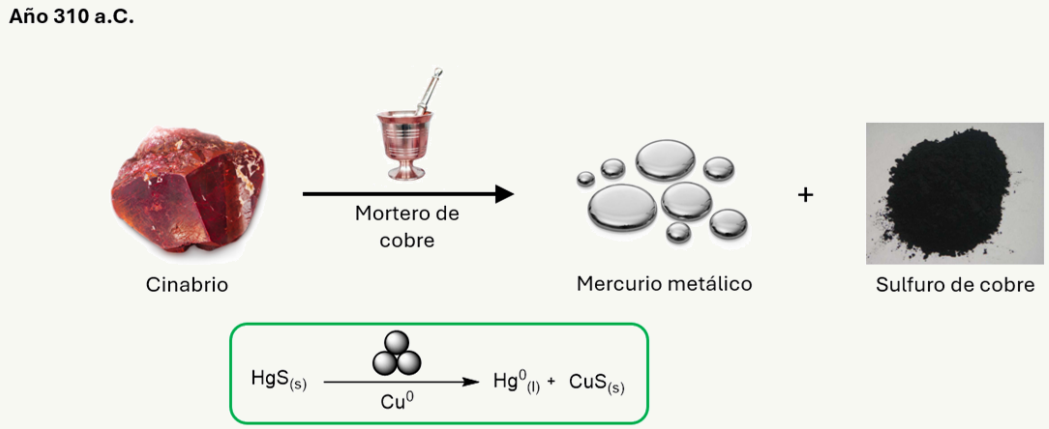


Figura 4. *Obtención de mercurio metálico a partir de cinabrio bajo condiciones de molienda en 310 a.C.*

Según la explicación más aceptada para comprender cómo se llevan a cabo las reacciones bajo condiciones de molienda, durante el proceso de maceración se obtienen fragmentos que son cada vez más pequeños de los sustratos sólidos, con lo que se incrementa el área de contacto con las moléculas presentes en la superficie de los reactivos que son activados por la energía mecánica para reaccionar en esa zona de contacto.

En la actualidad, existe una amplia gama de molinos que permiten realizar reacciones mecanoquímicas a diferentes escalas, desde analíticas hasta de planta piloto. Estos incluyen desde el mortero tradicional hasta molinos de bolas provistos de vibración horizontal, molinos planetarios y tornillos de extrusión que permiten la conducción de procesos de manera continua (Figura 5). Algunos sistemas son tan avanzados que incluyen control de temperatura y monitores para el análisis *in situ* del avance de reacción, lo que permite un control más preciso del proceso.

El material de los reactores y balines también juega un papel importante en una reacción mecanoquímica. Entre los materiales más comunes destacan el ágata, el acero inoxidable, el teflón y el policarbonato. Resulta claro que la dureza de estos materiales determina la fuerza del impacto y fricción en el sitio de la reacción y por lo tanto, la energía aplicada al proceso. En algunas ocasiones, se requiere una cantidad mínima de algún disolvente que actúe como "lubricante" de molienda (LAG, por sus siglas en inglés: Liquid Assisted Grinding).

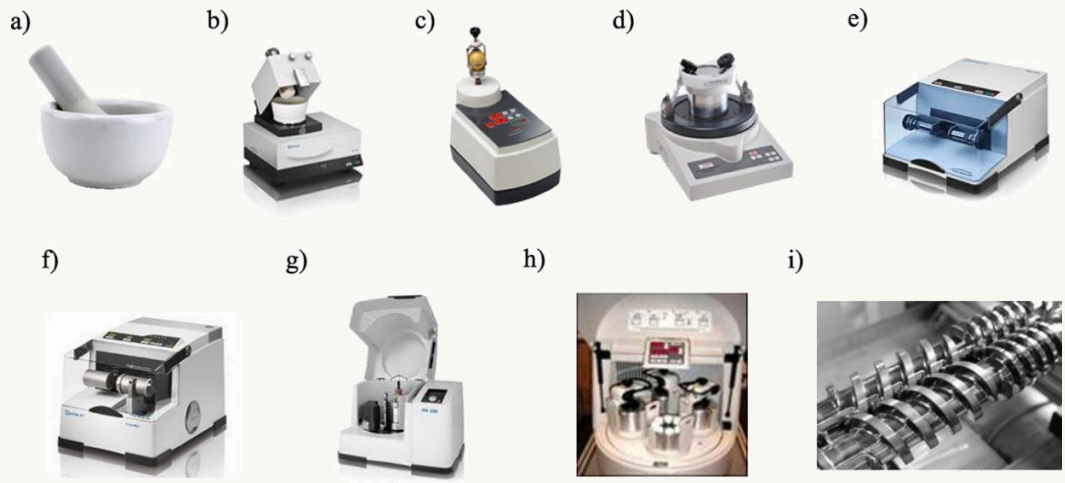
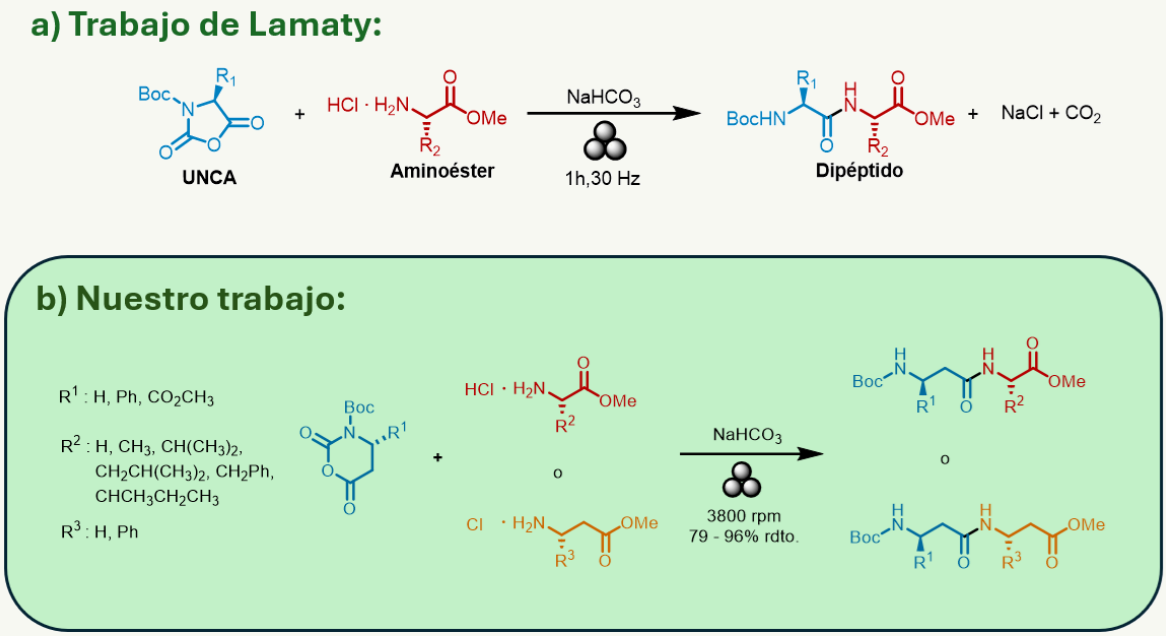


Figura 5. *Equipos de molienda más comunes. a) Mortero y pistilo. b) Mini mortero automático (Retsch). c) Mini molino vibratorio vertical (Fritsch). d) Micro molino vibratorio (Fritsch). e) Molino vibratorio de bolas (Retsch). f) Molino vibratorio de bolas con control de temperatura (Retsch, Cryomill). g) Molino planetario de bolas (Retsch). h) Molino con muestreador (Automaxion). i) Tornillo gemelo de uso en procesos mecanoquímicos en flujo continuo. Reproducido con permiso de la American Chemical Society (Pérez-Venegas y Juaristi, 2020).*

En el año 2009, varios químicos de la Universidad de Montpellier[8] reportaron la mecanosíntesis de α,α-dipéptidos, mediante la condensación de dos α-aminoácidos, que son los bloques constituyentes de las proteínas. En este proceso, se elimina una molécula de agua por deshidratación del grupo carboxilo en el primer α-aminoácido y el grupo amino presente en el segundo α-aminoácido (Figura 6a). Lo más destacable de este estudio es que la reacción se llevó a cabo sin disolventes.

Inspirados por este trabajo y aprovechando nuestra experiencia en la síntesis de β-aminoácidos,[9,10] nos preguntamos si podríamos aplicar esta metodología para obtener α,β- y β,β-dipéptidos, es decir, moléculas que combinan α- y β-aminoácidos. La respuesta fue que sí es posible (Esquema 1b).[11]



***Esquema 1**. Síntesis de α,β-dipéptidos bajo condiciones de molienda en ausencia de disolvente.*

Así pues, este trabajo permitió la obtención de una familia de α,β- y β,β-dipéptidos en la síntesis de péptidos sin disolvente, demostrando la eficacia de la mecanoquímica (Esquema 1b).

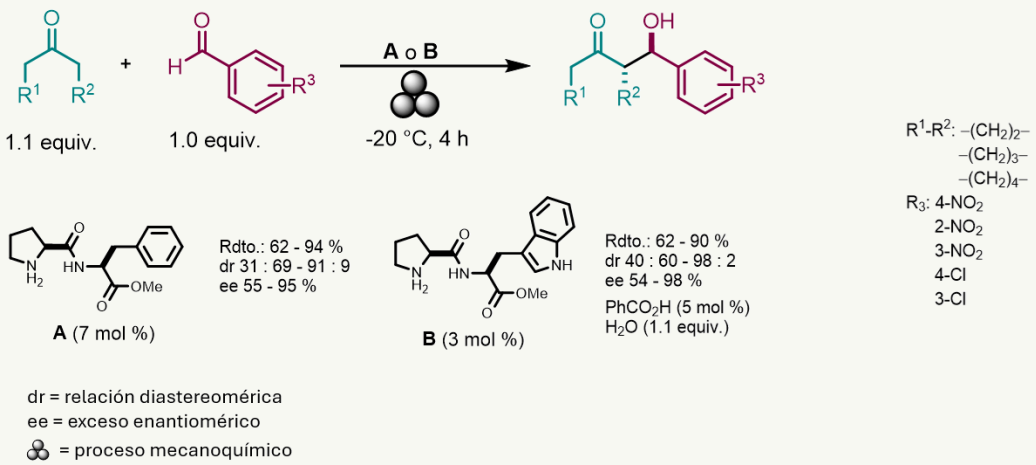
Por otro lado, la *organocatálisis asimétrica,* que se viene desarrollando a partir del año 2000, es otra área de actualidad en la química orgánica. En esta se emplean moléculas orgánicas quirales pequeñas como catalizadores, induciendo la formación estereoselectiva (enantio- o diastereoselectiva) de otras moléculas quirales. Los trabajos pioneros de List, Lerner y Barbas,[12] así como los de MacMillan y colaboradores[13] en el año 2000 sentaron las bases de esta línea de investigación y fue reconocida en 2021 cuando List y MacMillan fueron galardonados con el Premio Nobel.[14]

Nuestro grupo de investigación ha desarrollado una línea de trabajo en organocatálisis asimétrica, enfocada en el uso de dipéptidos derivados de la *L*-prolina como organocatalizadores, y utilizando activación mecanoquímica en ausencia de disolvente.[15,16]

8. Lamaty, F.; Martinez, J.; Nun, P.; Declerck, V. "Solvent-free synthesis of peptides". *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2009**, *48*, 9318-9321. https://doi.org/10.1002/anie.200903510
9. Juaristi, E. Ed. "Enantioselective Synthesis of b-amino Acids", Wiley, New York, 1997.
10. Juaristi, E.; Soloshonok, V. A., Eds. "Second Edition of Enantioselective Synthesis of b-Amino Acids", Wiley, New York, 2005.
11. Hernández, J.; Juaristi, E. "Green synthesis of α,β- and β,β-dipeptides under solvent-free conditions", *J. Org. Chem.*, **2010**, *75*, 7107-7111. https://doi.org/10.1021/jo101159a
12. List, B.; Lerner, R. A.; Barbas, C. F. "Proline-Catalyzed Direct Asymmetric Aldol Reactions". *J. Am. Chem. Soc.*, **2000**, *122*, 2395-2396. https://doi.org/10.1021/ja994280y
13. Ahrendt, K.; Borths, C.; MacMillan, D. "New Strategies for Organic Catalysis: The First Highly Enantioselective Organocatalytic Diels−Alder Reaction". *J. Am. Chem. Soc.*, **2000**, *122*, 4243-4244. https://doi.org/10.1021/ja000092s
14. Juaristi, E. "The 2021 Nobel Prize in Chemistry: Relevance of Asymmetric Organocatalysis and Green Chemistry", IntechOpen-UDLAP, México, 2023; Capítulo 1, pp. 1-14.
15. Hernández, J.; Juaristi, E. "Asymmetric Aldol Reaction Organocatalyzed by (*S*)-Proline-Containing Dipeptides: Improved Stereoinduction under Solvent-Free Conditions". *J. Org. Chem*., **2011**, *76*, 1464-1467. https://doi.org/10.1021/jo1022469
16. Hernández, J.; Juaristi, E. "Efficient ball-mill procedure in the 'green' asymmetric aldol reaction organocatalyzed by (*S*)-proline-containing dipeptides in the presence of water". *Tetrahedron*, **2011**, *67*, 6953-6959. https://doi.org/10.1016/j.tet.2011.06.042

***La Organocatálisis Asimétrica** se basa en el uso de moléculas órgánicas quirales pequeñas, en cantidades sub-estequiométricas, para llevar a cabo la activación de sustrato en ausencia de metales.*

Para preparar los dipéptidos de interés (A y B en la Esquema 2), se combinó la L-prolina con otros aminoácidos como la L-fenilalanina y el L-triptófano. Los dipéptidos resultantes actuaron como catalizadores en la reacción aldólica asimétrica entre cetonas como la ciclohexanona y aldehídos aromáticos (Esquema 2).



***Esquema 2.** Reacción aldólica simétrica catalizada por dipéptidos bajo condiciones de molienda.*

Una contribución de nuestro grupo en el área de la mecanoquímica consiste en la combinación de la catálisis enzimática con la activación mecanoquímica, que constituye un avance significativo en la química sustentable: la *mecanoenzimología*. Las enzimas son conocidas por su capacidad para promover reacciones químicas con altos rendimientos y estereoselectividad; su estabilidad en condiciones de molienda y su disponibilidad comercial las convierten en una opción atractiva para la síntesis sustentable.

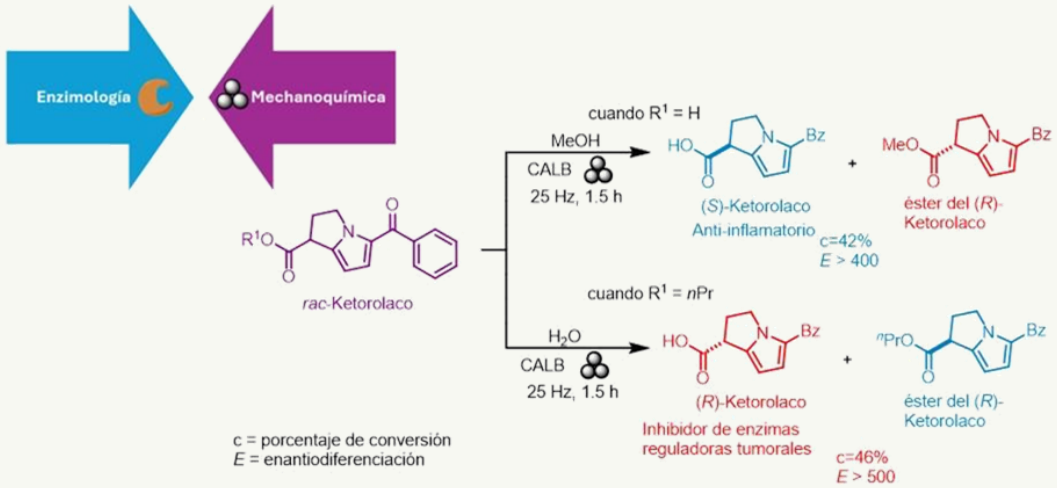
Al emplear enzimas en procesos químicos sin disolventes se cumplen la mayoría de los principios de la Química Verde. [17,18] Por ejemplo, la mecanoenzimología se alinea con los Principios 1 y 2 (prevención de la generación de desechos y economía atómica) al aprovechar la posibilidad de eliminar el uso de disolventes y por tratarse de procesos altamente eficientes (altos rendimientos y selectividades de los productos deseados); con el Principio 3 (síntesis menos peligrosas) ya que se involucran sustancias que en general presentan baja toxicidad; el Principio 5 (uso de solventes y auxiliares seguros) queda satisfecho toda vez que las reacciones mecanoenzimáticas pueden realizarse en condiciones libres de disolvente o, mediante el uso de una mínima cantidad de éste como asistente de molienda (LAG- *liquid assisted grinding*-); el Principio 6 (eficiencia energética) se cumple al tratarse de procesos que requieren condiciones suaves de reacción y ser bastante eficientes); el Principio 7 (uso de recursos renovables) se satisface debido a que las enzimas son renovables, el Principio 8 (disminución de derivados) también se cumple al quedar eliminados varios pasos de protección y desprotección con sus respectivos procesos de aislamiento y purificación; el Principio 9 (uso de catalizadores) está claramente cumplido ya que las enzimas son catalizadores; el Principio 11 (análisis en tiempo real) se cumple para este tipo de procesos y finalmente, el Principio 12 (seguridad del proceso) también se satisface ya que las reacciones mecanoenzimáticas no requieren condiciones drásticas de reacción y la tecnología involucrada es bastante segura.

Una de las enzimas más utilizadas en la industria farmacéutica es la lipasa B de *Candida antarctica* (CALB por sus siglas en inglés). En nuestro grupo de investigación, hemos aprovechado las propiedades de esta enzima para la resolución de mezclas enantioméricas de fármacos, es decir, separar mezclas de moléculas que son imágenes especulares, conocidas como enantiómeros.[19]

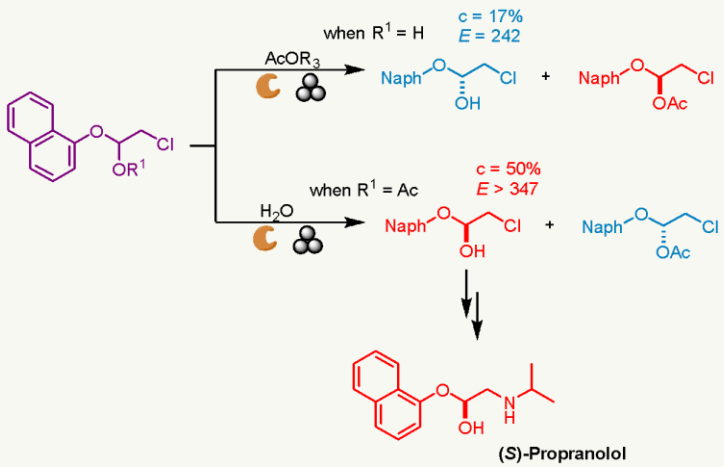
La resolución de fármacos es muy importante porque los enantiómeros pueden presentar actividad biológica distinta en el cuerpo humano.[19] Al obtener exclusivamente la forma enantiomérica de un fármaco que es más efectiva y segura, se puede asegurar su eficacia y evitar los efectos secundarios del enantiómero "incorrecto".[19] La mecanoenzimología ofrece una forma innovadora y

17. Pérez-Venegas, M.; Juaristi, E. "Mechanochemical and Mechanoenzymatic Synthesis of Pharmacologically Active Compounds: A Green Perspective". *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **2020**, *8*, 8881-8893. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c01645
18. Sheldon, R.; Woodley, J. Role of Biocatalysis in Sustainable Chemistry. *Chem. Rev.* **2018**, *118*, 801-838. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00203
19. Juaristi, E. "Introducción a la Estereoquímica y al Análisis Conformacional", El Colegio Nacional, Ciudad de México, 2007(versión impresa); 2024 (versión electrónica).

sustentable para obtener los enantiómeros por separado, con lo que abre nuevas posibilidades para la síntesis de fármacos y otros productos químicos quirales. En nuestro grupo de investigación se desarrollaron metodologías para la resolución del ketorolaco (Esquema 3) un potente analgésico,[20] así como de un precursor del propranolol (Esquema 4) un potente agente antihipertensivo.[21]



Esquema 3. *Resolución mecanoenzimática del Ketorolaco.*



Esquema 4. *Resolución mecanoenzimática del Propranolol.*

Conclusión

En resumen, la mecanoquímica se presenta como una herramienta valiosa y prometedora para la Química Verde. Al reducir la necesidad de disolventes, minimizar la generación de residuos y proceder de manera catalítica en el caso de la mecanoenzimología, esta técnica ofrece una forma más sustentable y eficiente de realizar reacciones químicas. Así pues, la mecanoquímica desafía la idea tradicional de que los disolventes son necesarios para que las reacciones químicas puedan ocurrir, y ofrece nuevas posibilidades para la síntesis química más segura. En un entorno que es cada vez más consciente de la importancia de la sustentabilidad y la protección del medio ambiente, la mecanoquímica se perfila como una técnica clave para lograr un futuro más verde y responsable. Efectivamente, ¡la IUPAC clasifica a la mecanoquímica como una de las 10 tecnologías emergentes que transformarán el mundo en el siglo XXI![22]

20. Pérez-Venegas, M.; Rodríguez-Treviño, A.; Juaristi, E. "Dual Mechanoenzymatic Kinetic Resolution of (±)-Ketorolac". *ChemCatChem,* **2020**, *12*, 1782-1788. https://doi.org/10.1002/cctc.201902292
21. Gamboa-Velázquez, G.; Juaristi, E. "Mechanoenzymology in the Kinetic Resolution of β-Blockers: Propranolol as a Case Study". *ACS Org. Inorg. Au*, **2022**, *2*, 343-350. https://doi.org/10.1021/acsorginorgau.1c00049
22. Gomollón-Bel, F. (2019). "Ten Chemical Innovations That Will Change Our World: IUPAC Identifies Emerging Technologies in Chemistry with Potential to Make Our Planet more Sustainable", *Chem. Int.*, **2019**, *41*, 12-17. https://doi.org/10.1515/ci-2019-0203