

Estrategia docente para enseñar estereoquímica: una propuesta para convertir de una representación a otra

A teaching strategy for teaching stereochemistry: a proposal for converting from one representation to another

Claudio Barrientos¹, Silvana Moris¹ y Javiera Gutiérrez López*²

Resumen

En este estudio se desarrolló una propuesta para enseñar estereoquímica con estudiantes universitarios de la carrera de química y farmacia, con el objetivo de identificar las representaciones de estructuras orgánicas que son más sencillas para el estudiantado utilizando una estrategia didáctica para la identificación, asignación de la configuración absoluta y la comprensión de la estereoquímica en el estudio de la estereoquímica de compuestos orgánicos. Se presentó al estudiantado un esquema con diferentes representaciones y se explicaron las relaciones entre unas y otras, para facilitar la interconversión y que pudieran asignar correctamente las configuraciones de los estereocentros. Se aplicó un pretest previo a la intervención con las proyecciones de Fischer, fórmulas de Haworth, y de cuñas y líneas y conformación silla, mostrando que sólo en las proyecciones de Fischer y en las fórmulas de cuñas y líneas pudieron asignar las configuraciones absolutas de los estereocentros. Sin embargo, después de la intervención, el estudiantado pudo realizar interconversiones en las representaciones de Haworth y silla, aumentando su rendimiento de 0% a 65% y de 0% a 52,5% respectivamente, en el caso de las cuñas y líneas el aumento fue de 22,2% a 60%, y en las representaciones de Fischer de 81,3% a 100%, lo que demuestra que la proyección Fischer era la representación más sencilla para la asignación de la configuración absoluta de los estereocentros.

Palabras clave: química orgánica; didáctica de la química; enseñanza universitaria; representaciones para compuestos orgánicos; estereoquímica.

Abstract

The objective of this study was to develop a proposal for the teaching of stereochemistry to university chemistry and pharmacy students. The aim was to identify the representations of organic structures that are easiest for the students, using a didactic strategy for the identification, assignment of the absolute configuration and understanding of stereochemistry in the study of the stereochemistry of organic compounds. A scheme comprising different representations was presented to the students, with the relationships between them explained. This was done to facilitate interconversion and enable the students to correctly assign the configurations of the stereocentres. A pre-test was applied before the intervention, which involved Fischer projections, wedge and line formulas, Haworth and chair formulas. The results showed that only in Fischer projections and wedge and line formulas were the students able to assign the absolute configurations of the stereocentres. However, following the intervention, the students demonstrated the ability to perform interconversions in the Haworth and chair representations, resulting in an improvement in their performance from 0% to 65% and from 0% to 52.5%, respectively, in the case of wedges and lines the increase was from 22.2% to 60%, and from 81.3% to 100% for Fischer representations, indicating that the Fischer projection was the simplest representation for the assignment of the absolute configuration of the stereocentres.

Keywords : organic chemistry; chemistry didactics; university teaching; representation of organic compounds; stereochemistry.

CÓMO CITAR:

Barrientos, C., Moris, S., y Gutiérrez López, J. (2024). Estrategia docente para enseñar estereoquímica: una propuesta para convertir de una representación a otra. *Educación Química*, 35(4). <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2024.4.88280>

¹Centro de Investigación de Estudios Avanzados del Maule (CIEAM), Vicerrectoría de Investigación y Postgrado, Universidad Católica del Maule, Avenida San Miguel 3605, Talca, Chile.

²Doctorado en Didáctica de las Ciencias Experimentales, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Católica del Maule, Avenida San Miguel 3605, Talca, Chile.

Introducción

El aprendizaje de la química orgánica puede ser un reto en los distintos niveles de enseñanza debido a múltiples factores (Gutiérrez-Mosquera y Barajas-Perea, 2019). Uno de los desafíos que tiene el estudiantado es entender las distintas representaciones que puede tener una misma molécula o macromolécula (Salgado-Chavarría y Palacios-Alquisira, 2021) a través de representaciones en 2-D a una visualización mental en 3-D. Tradicionalmente, las estructuras químicas tridimensionales se representan bidimensionales, y el estudiantado está expuesto a todas ellas en los cursos de química (Marzábal et al., 2024), en especial en los cursos de química orgánica cuando se estudia estereoquímica (Stieff, 2011; Durmaz, 2018; Pineda et al., 2019) la cual estudia la distribución espacial de las moléculas tridimensionalmente (López et al., 2023). Sin embargo, la comprensión de la estereoquímica no es una tarea fácil, especialmente cuando se abordan conceptos complejos como la quiralidad (Da Silva et al., 2021; Elford et al., 2021), la cual se refiere a la propiedad que tiene una molécula de no ser superponible con su imagen especular, esto quiere decir, que un carbono al tener un centro asimétrico posee cuatro átomos o grupos de átomos diferentes entre sí (McMurry, 2017; Zuñiga-Estrada y García, 2023).

Existen diversas estrategias que ayudan al desarrollo de habilidades visoespaciales (Pineda et al., 2019) para la comprensión de las diferentes representaciones y su relación con las moléculas en tres dimensiones. Las principales representaciones utilizadas en química orgánica son las fórmulas de Haworth, y de cuñas y líneas, proyecciones de Fischer, conformación de silla y representaciones de Newman (Kumi et al., 2013; Dickenson et al., 2020; Butler, 2021), y cada representación nos brinda una información diferente (Stieff et al., 2016), por lo que es importante trabajar simultáneamente con esas representaciones para profundizar los conceptos (Treagust et al., 2003; Habig, 2020). A su vez, el proceso de cambio entre representaciones, es decir, interconvertir, se conoce como traducción representacional (Mistry et al., 2020), y para ello, se debe crear una imagen mental, utilizando habilidades espaciales o visoespaciales (Carlisle et al., 2015; Suárez y Betancourt, 2023). Las habilidades visoespaciales están relacionadas con el rendimiento académico (Elford et al., 2022). Para la asignación de configuración absoluta de estereocentros los estudiantes pueden utilizar rotaciones mentales o estrategias específicas diseñadas por el docente, y la evidencia muestra que aquellos estudiantes que aplican esas estrategias específicas son más precisos en la asignación (Wu y Shah, 2004).

En química orgánica, el uso de modelos representacionales de estructuras químicas es fundamental para comprender sus propiedades fisicoquímicas, la reactividad o un mecanismo de reacción (Marzábal et al., 2024), por ello, es muy importante que el estudiantado logre desarrollar competencias representacionales para construir modelos de las moléculas. Las habilidades para comprender con precisión representaciones visuales se denominan competencias representacionales perceptivas (Oliver-Hoyo y Babilonia-Rosa, 2017; Rau, 2017). El profesorado suele utilizar modelos físicos, teóricos o visuales para representar compuestos químicos (Casselman et al., 2021), y con el desarrollo tecnológico estos últimos se convierten en una opción interesante. Las competencias perceptivas y representacionales podrían abordarse a través de múltiples ejemplos en un juego, donde los estudiantes deben interconvertir entre diferentes representaciones (Eastwood, 2013; Rizzatti y Prestes-Jacaúna, 2022). El uso de la tecnología en el desarrollo de la traducción

representacional ayuda a visualizar estructuras químicas en 3-D y, junto con juegos interactivos, podemos mejorar la participación en el proceso de aprendizaje en química (Da Silva Junior et al., 2019; Monnot et al., 2020; Elford et al., 2021).

En este estudio se aborda un método instruccional para representar un monosacárido de proyección de Fischer a fórmula de Haworth y finalmente a la representación de cuñas y líneas para reducir los conceptos erróneos o las propias suposiciones (Carlisle et al., 2015). La elección de utilizar monosacáridos es debido a que tienen una fórmula molecular que puede representar a más de cien estructuras diferentes, ya sean de formas lineales o cíclicas, y comúnmente se abordan en diferentes representaciones, como Fischer, Haworth, cuñas y líneas, y silla (Rahi, 1991; Arya y Kumar, 2020), por lo que existen múltiples posibilidades que generan isómeros (Figura 1). El objetivo de este estudio es identificar las representaciones que son más sencillas para el estudiantado, utilizando una estrategia didáctica para la comprensión y asignación de configuración absoluta de estereocentros en la estereoquímica de compuestos orgánicos.

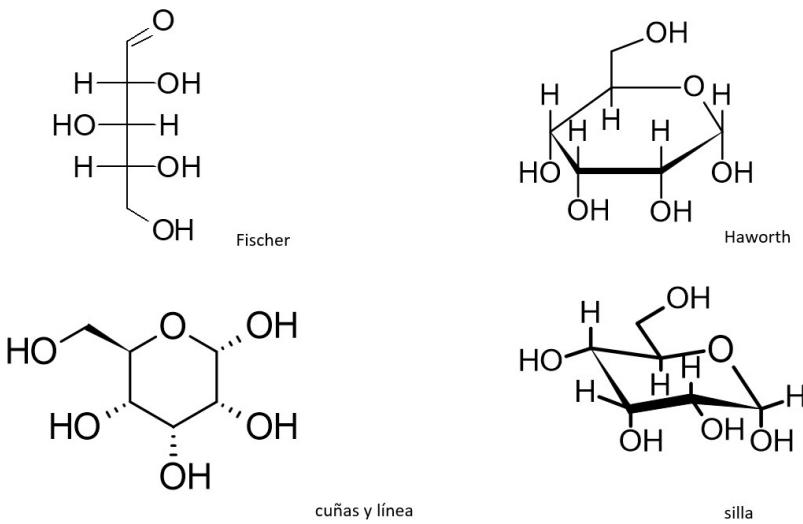


FIGURA 1.

Representaciones de las fórmulas de Haworth, y de cuñas y líneas, proyección de Fischer y conformación de silla utilizadas en el aula.

Metodología

La química orgánica tiene como objetivo desarrollar en los estudiantes las habilidades necesarias para explicar la formación, composición, estructura y reacciones químicas de los compuestos químicos orgánicos y sus derivados, utilizando los conceptos básicos de la química orgánica. Esta asignatura proporciona el conocimiento de la nomenclatura y propiedades fisicoquímicas de las diferentes estructuras presentes en fármacos, correspondientes a las bases del conocimiento de los mecanismos de acción y funcionamiento de los fármacos que se profundizan en cursos específicos posteriores y que son de gran interés para los estudiantes de la carrera de Química y Farmacia.

Contexto y muestra

La muestra de 17 estudiantes correspondiente al estudiantado de cuarto semestre de la carrera de Química y Farmacia que se encuentran cursando la actividad curricular Química Orgánica.

Esta actividad curricular pertenece al ciclo inicial del plan de estudios de la carrera de Química y Farmacia. Además, el curso de Química Orgánica corresponde al área de formación teórico-práctica, permitiendo la síntesis de fármacos en laboratorio y es un requisito previo para la asignatura de Fármaco-Química que se imparte en el semestre siguiente (Barrientos y Moris, 2022).

Para llevar a cabo la intervención, el estudiantado fue dividido en dos grupos, grupo control (Grupo A) de 9 estudiantes y un grupo experimental (Grupo B) 8 estudiantes, en el que posterior a la intervención, se les aplicó una prueba con el mismo número y tipo de ejercicios. La subdivisión del curso es debido a que trabaja en talleres de no más de 10 estudiantes por grupo siguiendo los lineamientos de la universidad.

- Grupo A: se le explicaron las reglas de Cahn Ingold Prelog (CIP) para estereoquímica sólo con diapositivas que mostraban diferentes estructuras con diferentes representaciones, así como muchos libros de química orgánica, donde deben asignar la configuración absoluta con estereodescriptores (R y S).
- Grupo B: al grupo se les explica la interconversión entre la proyección de Fischer, la conformación de silla, las fórmulas de Haworth y de cuñas y líneas utilizando la Figura 2, siguiendo los pasos de la estrategia didáctica.

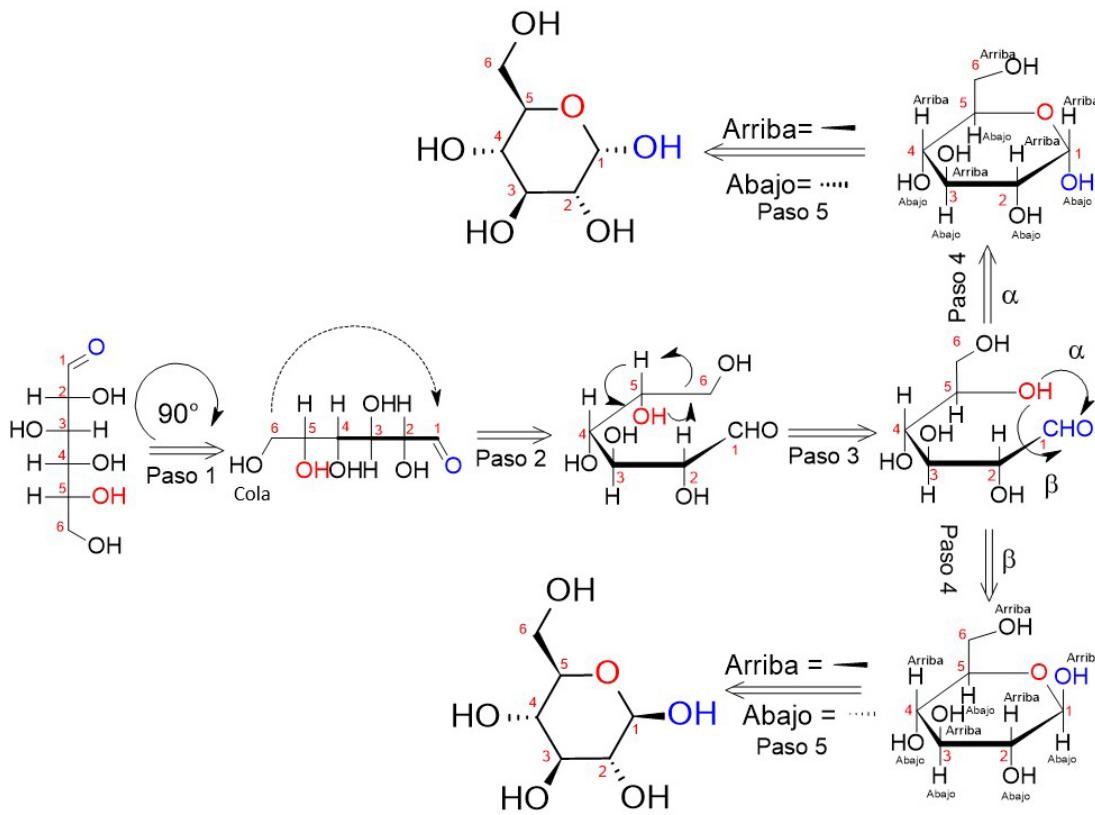
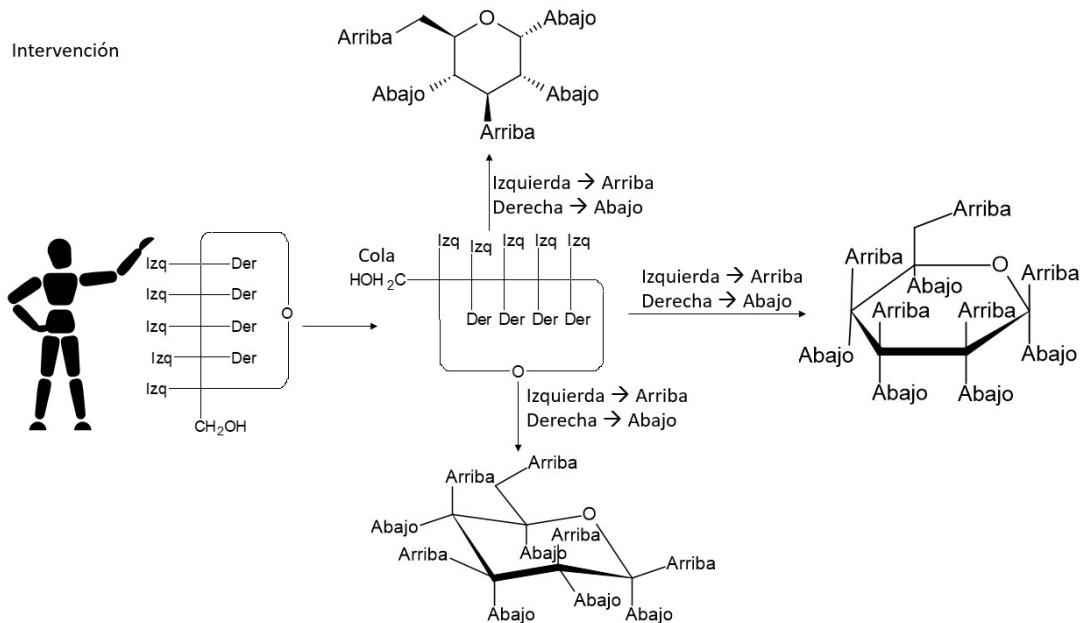


FIGURA 2. Instrucción sistemática para dibujar formación de anómeros a partir de la proyección de Fischer.

Estrategia didáctica para la interconversión de representaciones

A continuación, se describe el paso a paso de la estrategia planteada para dibujar la formación de anómeros a partir de la proyección de Fischer asignando los estereocentros (Figura 3).

- Paso 1. Girar 90° hacia la derecha la proyección de Fischer.
- Paso 2. Etiqueta el grupo de la izquierda como “cola”.
- Paso 3. Etiquetar la cola como “arriba” si el sustituyente en el carbono más cercano está en la posición inferior, o etiquetar “abajo” si está el sustituyente se encuentra en la posición superior.
- Paso 4. Etiqueta como “abajo” el resto de los sustituyentes que se encuentran en la posición inferior.
- Paso 5. Etiqueta como “arriba” el resto de los sustituyentes que se encuentran en la posición superior.
- Paso 6. Para la fórmula de Haworth y la conformación de silla, mantenga la etiqueta “arriba” y “abajo” y, si el sustituyente más cercano a la “cola” está etiquetado como “abajo” o “arriba”, entonces la cola estará “arriba” o “abajo” respectivamente.
- Paso 7. Utilice cuña sólida o punteada para los sustituyentes etiquetados como “arriba” y “abajo” respectivamente, para la fórmula de cuñas y líneas.



Resultados y discusión

Previo a la intervención con el grupo B, se desarrolló una clase de introducción a la estereoquímica con un barrido histórico desde los primeros planteamientos hasta los más actuales, además se trabajaron con ejemplos de cómo se presenta una molécula en proyección de Fischer. Posteriormente, se aplicó un pretest con ambos grupos, en el que se plantean cuatro ejercicios para asignar la configuración absoluta de estereocentros a las representaciones de Fischer, Haworth, cuñas y líneas, y silla, como se presenta en la Figura 1, dando como resultados que sólo asignaron la configuración absoluta de los estereocentros a las representaciones de Fischer, y cuñas y líneas.

Durante la intervención, al estudiantado del grupo B se les explicó cómo realizar la interconversión a partir de las proyecciones de Fischer a conformaciones de silla, fórmulas de Haworth y de cuñas y líneas descrita con la estrategia didáctica y la Figura 3. En paralelo, con ambos grupos se trabajó con modelos moleculares concretos, en los que pudieron generar moléculas en 3-D a partir de las representaciones planas 2-D que se visualizan en las guías de trabajo. Tras las 10 sesiones de clases de la unidad completa y solo 2 correspondientes a estereoquímica y quiralidad, se aplicó un test posterior a ambos grupos similar en número y tipo de ejercicios al test previo. De esta manera, en el posttest, el estudiantado pudo asignar la configuración absoluta de los estereocentros en las proyecciones de Fischer y en las fórmulas de cuñas y líneas, así mismo, pudieron realizar la interconversión entre las fórmulas de Haworth y las fórmulas de silla a partir de la proyección de Fischer (Figura 4).

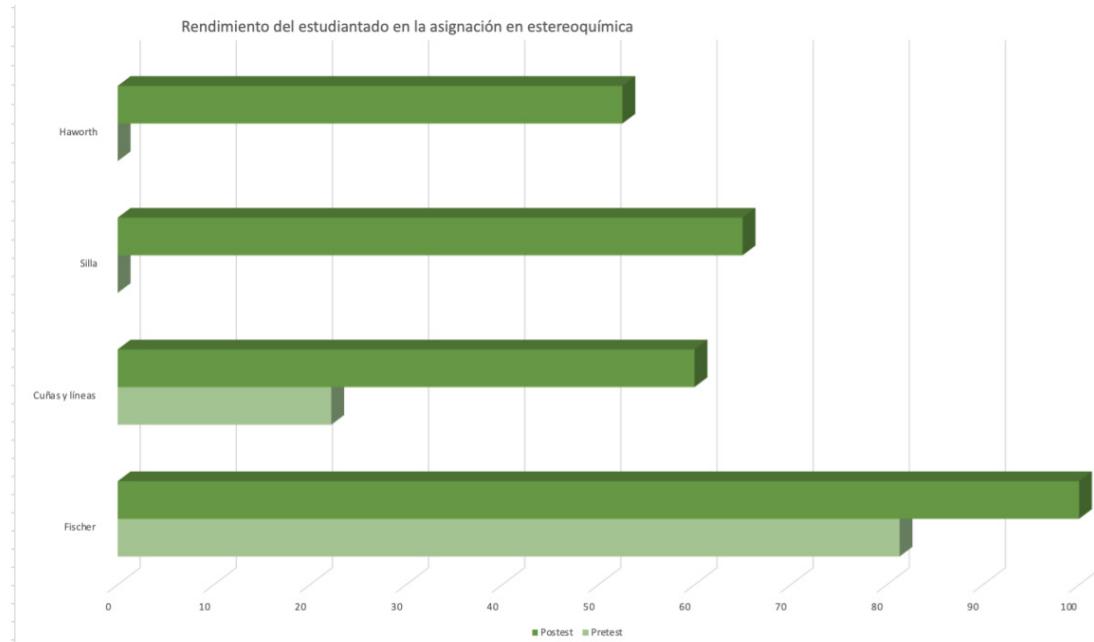


FIGURA 4. Rendimiento del estudiantado en la asignación de configuración absoluta de estereocentros en moléculas orgánicas.

Como se muestra en la Figura 4, hubo un gran aumento en el rendimiento académico para asignar la configuración absoluta de estereocentros para las fórmulas de Haworth y silla, de 0% a 65% y de 0% a 52,5% respectivamente; para las fórmulas de cuñas y líneas el aumento fue de 22,2% a 60% y para las proyecciones de Fischer de 81,3% a

100% mostrando que la proyección de Fischer fue la representación más sencilla para la asignación de configuración absoluta de estereocentros. Los datos anteriores permiten visualizar que la estrategia didáctica que se presentó al estudiantado los ayudó para la asignación de la configuración absoluta de estereocentros de diversas moléculas orgánicas, pudiendo desarrollar habilidades visoespaciales para la interconversión de las diferentes representaciones.

Los mejores resultados para la asignación de estereocentros son para las proyecciones de Fischer y las fórmulas de cuñas y líneas, lo que indica una mayor facilidad para comprender la estereoquímica de un compuesto con tales representaciones. Sin embargo, ¿a qué se debe que sea más sencillo para el estudiantado entender las representaciones de Fischer y cuñas y líneas? Según lo reportado por la literatura y lo analizado en este estudio, el estudiantado logra dimensionar y visualizar de mejor manera la asignación de estereocentros por la disposición de la estructura molecular de las moléculas (García-Ruiz et al., 2012), ya que se encuentra abierta para observar y analizar la quiralidad de la molécula (Valdivia-Giménez, 2022), muy similar a lo que ocurre en las fórmulas de cuñas y líneas, identificando los enlaces que van hacia adelante y hacia atrás del plano.

Consideraciones finales

Con este estudio se evidencia una forma sencilla para la comprensión de la interconversión a partir de las proyecciones de Fischer a fórmulas de Haworth, de cuñas y líneas, y conformaciones de silla. Esta intervención permitió a los estudiantes realizar con mayor facilidad interconversiones entre las diferentes representaciones, aumentando radicalmente el porcentaje de logros en la prueba realizada. Este tipo de estrategia posiblemente ayudó al estudiantado a crear una imagen mental 3-D a partir de una representación 2-D y facilitó la asignación de estereocentros con los estereodescriptores R y S y cómo se ve este estereocentro con diferentes representaciones (Valdivia-Giménez, 2022).

El estudiantado puede utilizar las diferentes representaciones para asignar correctamente una configuración en una representación desconocida, y esto beneficiará la comprensión de la disposición espacial y los sitios reactivos, lo que permitirá un mejor entendimiento de cómo se desarrollan los mecanismos de reacción en la química orgánica.

Agradecimientos

BECA DOCTORAL UCM - Programa de Doctorado en Didáctica de las Ciencias Experimentales de la Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Católica del Maule.

Referencias

- Arya, A., y Kumar, A. (2020). Teaching structural diversity of hexoses to graduate and postgraduate students: Methods to correlate stereochemistry. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 48(1), 8-20. <https://doi.org/10.1002/bmb.21305>
- Barrientos, C., y Moris, S. (2022). Teaching organic nomenclature for pharmacy students: Adapting a course to online mode during COVID-19. *Pharmacy Education*, 22(1), 360-375. <https://doi.org/10.46542/pe.2022.221.360375>

- Butler, S. C. (2020). Conformational tug of war: A technique for converting bond-line structures into Fischer projections. *Journal of Chemical Education*, 98(2), 678-681. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c01201>
- Carlisle, D., Tyson, J., y Nieswandt, M. (2015). Fostering spatial skill acquisition by general chemistry students. *Chemistry Education Research and Practice*, 16(3), 478-517. <https://doi.org/10.1039/C4RP00228H>
- Casselman, M. D., Eichler, J. F., y Atit, K. (2021). Advancing multimedia learning for science: Comparing the effect of virtual versus physical models on student learning about stereochemistry. *Science Education*, 105(6), 1285-1314. <https://doi.org/10.1002/sce.21675>
- da Silva Júnior, J. N., Junior, A. J. M. L., Winum, J. Y., Basso, A., de Sousa, U. S., Do Nascimento, D. M., y Alves, S. M. (2021). HSG400—Design, implementation, and evaluation of a hybrid board game for aiding chemistry and chemical engineering students in the review of stereochemistry during and after the COVID-19 pandemic. *Education for Chemical Engineers*, 36, 90-99. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2021.04.004>
- da Silva Júnior, J. N., Uchoa, D. E. D. A., Sousa Lima, M. A., y Monteiro, A. J. (2019). Stereochemistry game: Creating and playing a fun board game to engage students in reviewing stereochemistry concepts. *Journal of Chemical Education*, 96(8), 1680-1685. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00897>
- Dickenson, C. E., Blackburn, R. A., y Britton, R. G. (2020). 3D printing workshop activity that aids representation of molecules and student comprehension of shape and chirality. *Journal of Chemical Education*, 97(10), 3714-3719. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00457>
- Durmaz, M. (2018). Determination of prospective chemistry teachers' cognitive structures and misconceptions about stereochemistry. *Journal of Education and Training Studies*, 6(9), 13-20. <https://doi.org/10.11114/jets.v6i9.3353>
- Eastwood, M. L. (2013). Fastest fingers: A molecule-building game for teaching organic chemistry. *Journal of Chemical Education*, 90(8), 1038-1041. <https://doi.org/10.1021/ed3004462>
- Elford, D., Lancaster, S. J., y Jones, G. A. (2021). Stereoisomers, not stereo enigmas: A stereochemistry escape activity incorporating augmented and immersive virtual reality. *Journal of Chemical Education*, 98(5), 1691-1704. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c01283>
- Elford, D., Lancaster, S. J., y Jones, G. A. (2022). Exploring the effect of augmented reality on cognitive load, attitude, spatial ability, and stereochemical perception. *Journal of Science Education and Technology*, 31(3), 322-339. <https://doi.org/10.1007/s10956-022-09957-0>
- García-Ruiz, M. A., Valdez-Velazquez, L. L., y Gómez-Sandoval, Z. (2012). Estudio de usabilidad de visualización molecular educativa en un teléfono inteligente. *Química Nova*, 35, 648-653. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000300037>

Gutiérrez-Mosquera, A., y Barajas-Perea, D. S. (2019). Incidencia de los recursos lúdicos en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la Química Orgánica I. *Educación Química*, 30(4), 57-70. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2019.4.69991>

Habig, S. (2020). Who can benefit from augmented reality in chemistry? Sex differences in solving stereochemistry problems using augmented reality. *British Journal of Educational Technology*, 51(3), 629-644. <https://doi.org/10.1111/bjet.12891>

Kumi, B. C., Olimpo, J. T., Bartlett, F., y Dixon, B. L. (2013). Evaluating the effectiveness of organic chemistry textbooks in promoting representational fluency and understanding of 2D-3D diagrammatic relationships. *Chemistry Education Research and Practice*, 14(2), 177-187. <https://doi.org/10.1039/C3RP20166>

López, A. O. C., Ramírez, C. F. E., Martínez, J. A. R., Gómez, C. V., y Cruz, D. C. (2023). Espejos moleculares: descifrando la quiralidad. *Jóvenes en la Ciencia*, 21, 1-6. <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/9755>

Marzábal, A., Manrique, F., Delgado, V., y Moreira, P. (2024). Hacia una progresión de aprendizaje multidimensional del modelo escolar de sustancia. *Educación Química*, 35(1), 91-110. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2024.1.85989>

McMurry, J. (2017). *Química Orgánica*. Cengage.

Mistry, N., Singh, R., y Ridley, J. (2020). A web-based stereochemistry tool to improve students' ability to draw Newman projections and chair conformations and assign R/S labels. *Journal of Chemical Education*, 97(4), 1157-1161. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00688>

Monnot, M., Laborie, S., Hébrard, G., y Dietrich, N. (2020). New approaches to adapt escape game activities to large audiences in chemical engineering: Numeric supports and students' participation. *Education for Chemical Engineers*, 32, 50-58. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2020.05.007>

Oliver-Hoyo, M., y Babilonia-Rosa, M. A. (2017). Promotion of spatial skills in chemistry and biochemistry education at the college level. *Journal of Chemical Education*, 94(8), 996-1006. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00094>

Pineda, D. Y., Torres Merchán, N. Y., y Vargas Aguilar, E. E. (2019). Desarrollo de habilidades visoespaciales: un reto para la enseñanza de química orgánica. *Repositorio Institucional UPTC*, 1, 1-23. <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/5141>

Rahi, H. (1991). Cyclic structures of monosaccharides: The Fischer and Haworth projection formulae; The α -and β -anomers. *Biochemical Education*, 19(1), 29-30. [https://doi.org/10.1016/0307-4412\(91\)90141-T](https://doi.org/10.1016/0307-4412(91)90141-T)

Rau, M. A. (2017). Conditions for the effectiveness of multiple visual representations in enhancing STEM learning. *Educational Psychology Review*, 29, 717-761. <https://doi.org/10.1007/s10648-016-9365-3>

Rizzatti, I. M., y Prestes-Jacaúna, R. D. (2022). Tecnologías asistivas y la aprendizaje significativa en el enseñanza de química para alumnos sordos. *Educación Química*, 33(3), 48-60. <http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2022.3.81151>

Salgado-Chavarría, D., y Palacios-Alquisira, J. (2021). Cien años de química macromolecular. *Educación Química*, 32(1), 20-30. <http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2021.1.76662>

Stieff, M. (2011). When is a molecule three dimensional? A task-specific role for imagistic reasoning in advanced chemistry. *Science Education*, 95(2), 310-336. <https://doi.org/10.1002/sce.20427>

Stieff, M., Scopelitis, S., Lira, M. E., y Desutter, D. (2016). Improving representational competence with concrete models. *Science Education*, 100(2), 344-363. <https://doi.org/10.1002/sce.21203>

Suárez Millán, M. D. C., y Betancourt Arango, J. P. (2023). La Química Computacional como mediación pedagógica para el aprendizaje de conceptos inorgánicos. *Educación Química*, 34(1), 70-85. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2023.1.77684>

Treagust, D., Chittleborough, G., y Mamiala, T. (2003). The role of submicroscopic and symbolic representations in chemical explanations. *International Journal of Science Education*, 25(11), 1353-1368. <https://doi.org/10.1080/0950069032000070306>

Valdivia-Giménez, V. E. (2022). Experimentando un nuevo modelo de enseñanza-aprendizaje aplicado a la estereoquímica. En *Ciclos de mejora en el aula: Experiencias de innovación docente de la Universidad de Sevilla*. <https://editorial.us.es/es/detalle-libro/720329/ciclos-de-mejora-en-el-aula-ano-2021>

Wu, H. K., y Shah, P. (2004). Exploring visuospatial thinking in chemistry learning. *Science Education*, 88(3), 465-492. <https://doi.org/10.1002/sce.10126>

Zuñiga-Estrada, E. A., y García, A. (2023). La importancia de la estereoquímica. *XAHNI Boletín Científico de la Escuela Preparatoria*, 6(1), 20-22. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa6/issue/archive>