

La capacidad de comprensión del campo conceptual de la estereoquímica: los desafíos que preceden a los problemas de visualización espacial

RESUMEN

La propuesta de este estudio exploratorio es investigar si los estudiantes de educación secundaria dominan los conceptos básicos indispensables para la comprensión de la estereoquímica, conscientes de que se trata de un campo conceptual complejo, que requiere el dominio de un vasto conjunto de conceptos como estructura molecular, constitución y conectividad de los átomos de una molécula, configuración absoluta, geometría molecular, quiralidad, simetría molecular, entre otros. Los problemas de aprendizaje de este tema que pertenece al área de la Química Orgánica han sido objeto de estudio desde hace décadas y la complejidad de la resolución de problemas en el espacio tridimensional ha sido señalada como una de los principales motivos del fracaso en su aprendizaje. Al estudiar las dificultades del campo de la estereoquímica, se investigó si además de la visualización habría otras barreras para el aprendizaje. El estudio exploratorio utilizó como instrumento de recolección de datos una prueba-diagnóstico con preguntas objetivas sobre conceptos básicos de estereoquímica, como carbono asimétrico y quiralidad. El grupo estuvo compuesto por 49 estudiantes del curso de Química de una escuela técnica de Río Grande do Sul - Brasil. El análisis de contenido fue el método utilizado para el estudio de los datos. Tuvo como contribución teórica la Teoría de los campos conceptuales de Gerard Vergnaud que postula que la esencia del desarrollo cognitivo es el proceso de construcción de conceptos y que un campo conceptual está formado por una red de conceptos, relaciones y operaciones del pensamiento. Entre los estudiantes con los que se ha hecho este estudio se verifica una carencia en relación con el conocimiento previo necesario para la comprensión de este campo, carencia que precede los problemas vinculados a la capacidad de visualización tridimensional.

PALABRAS-CLAVE: Aprendizaje. Enseñanza y formación. Proceso cognitivo.

Daniele Trajano Raupp

dtraupp@gmail.com

orcid.org/0000-0003-2314-5352

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

Tania Renata Prochnow

taniapro@gmail.com

orcid.org/0000-0003-1173-3384

Universidade Luterana do Brasil (ULBRA), Canoas, Rio Grande do Sul, Brasil.

José Cláudio Del Pino

delpinojc@yahoo.com.br

orcid.org/0000-0002-8321-9774

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

Agostinho Serrano de Andrade Neto

asandraden@gmail.com

orcid.org/0000-0002-7868-1526

Universidade Luterana do Brasil (ULBRA), Canoas, Rio Grande do Sul, Brasil.

INTRODUCCIÓN

El estudio sobre la forma de una molécula o de cómo se crea su estereoquímica y cómo ésta afecta su comportamiento a lo largo de la historia, permitió la comprensión de cómo un pequeño número de elementos químicos es capaz de formar millones de compuestos químicos, compuestos que, en su gran mayoría, pertenecen al dominio de la Química Orgánica. Parte de esta diversidad se debe a la isomería, caracterizada por la existencia de dos o más sustancias que presentan fórmulas moleculares idénticas pero que difieren en sus fórmulas estructurales o espaciales y, por ende, poseen propiedades químicas, físicas y biológicas diferentes (RAUPP; DEL PINO, 2015).

El campo de la estereoquímica es de gran importancia para la ciencia, tanto es así que algunos premios Nobel de Química fueron concedidos a investigadores de esta área. Durante las últimas seis décadas, la mayoría de los descubrimientos en química están vinculados a aspectos estructurales. Dentro de estos se incluyen estudios de aspectos químicos y estereoquímicos, nuevas metodologías de determinación de estructura, estructura de nuevos materiales y síntesis orgánica (HARGITTAI; HARGITTAI, 2012). Biomoléculas como aminoácidos, carbohidratos, ácidos nucleicos y ácidos grasos, presentan estereoquímica propia. Los medicamentos, como los biopolímeros, pueden ser enriquecidos y mejorados (CHENG; MARYANOFF; MILLER; SCHMIDT, 2017).

Los conceptos de estereoquímica son importantes porque se utilizan extensivamente, no sólo en el área de Química orgánica, sino también en Biología, Farmacia, Biomedicina, Bioquímica, Química inorgánica y Química de polímeros, entre otras. Las investigaciones sobre la enseñanza de estereoquímica muestran el interés de los educadores (LINTHORST, 2014) que durante mucho tiempo han publicado estrategias para su enseñanza (ABRAHAM, VARGHESE; TANG; 2010). Dentro de los problemas para el aprendizaje de esta materia, la dificultad para la resolución de problemas en el espacio tridimensional ha sido señalada como una de las principales razones de fracaso, motivo por el que ha sido objeto de estudios desde hace décadas. La capacidad de interpretar correctamente la información estructural de una molécula es determinante para el aprendizaje en un curso de química orgánica, esta habilidad es necesaria en casi todos los aspectos de esta área de la química (BURRMANN; MOORE, 2015).

El aprendizaje de esta área preocupa porque los contenidos de estereoquímica son considerados los más importantes y difíciles dentro del área de química orgánica fundamental (SHUI-LI, 2005; THOMAS, 2017), esto, aliado al gran volumen de contenido y la compleja naturaleza conceptual del tema contribuyen todo un desafío para su enseñanza (CRIMMINS; MIDKIFF, 2017). La problemática de enseñar estereoquímica proviene, en parte, de la capacidad limitada de algunos alumnos para visualizar estructuras en tres dimensiones. (CODY et al., 2011). Esta dificultad está relacionada al hecho de que algunos estudiantes no cuentan con una base consolidada en relación a sus conocimientos sobre la organización espacial de los átomos en una molécula, es decir, sobre la estructura química en tres dimensiones (RAUPP, 2015). De hecho, al relatar los problemas de aprendizaje de sus estudiantes, los investigadores frecuentemente argumentan que las limitaciones en su capacidad para visualizar estructuras moleculares en tres dimensiones es una de las principales dificultades (LINTHORST, 2014).

Para los alumnos de enseñanza secundaria la comprensión de estereoquímica ya llegó a ser comparada a una gimnasia mental, que “puede ser muchas veces desesperantemente frustrante para el alumno” (BEAUCHAMP, 1984). En 1963 el profesor Evans de la Tufts University, de Massachusetts, concluía que menos de la mitad de los alumnos de cada clase alcanzaba un entendimiento suficiente de los fundamentos de estereoquímica como para ser capaces de dar respuestas claras y correctas a problemas considerados “simples” y afirma que muchos estudiantes son incapaces de comprender mínimamente las visualizaciones tridimensionales.

Pero, ¿qué significaría ese ‘mínimamente’? Esa dificultad de visualización espacial ¿sería el único, o el principal problema de aprendizaje dentro de esta área? Estas fueron las preguntas clave para el desarrollo del presente estudio. La estereoquímica es un campo conceptual complejo que requiere el dominio de un conjunto de conceptos, pero la capacidad de interpretar correctamente la información estructural de una molécula requiere, además de la habilidad visuoespacial, es fundamental comprender conceptos como: estructura molecular, constitución y conectividad de los átomos en la molécula, configuración absoluta, geometría molecular, quiralidad, entre otros. El profesor, entendiendo estas dificultades, debe comprender que el estudio de esta área requiere que el alumno domine esos conocimientos previos.

Los obstáculos enfrentados en el aprendizaje de estereoquímica van más allá de las dificultades relativas a la visualización, pasan por la necesidad de adquisición y dominio de conceptos imprescindibles para su comprensión. Así, la fundamentación teórica de este estudio parte de la teoría de los campos conceptuales de Vergnaud, teoría que postula que la esencia del desarrollo cognitivo es el proceso de formación o construcción de conceptos (VERGNAUD, 1996). Con el objetivo de analizar el grado de conocimiento de los alumnos en relación a esos conceptos básicos, se realizó una prueba de diagnóstico con estudiantes de nivel técnico medio en química, que se verá relatada en este estudio.

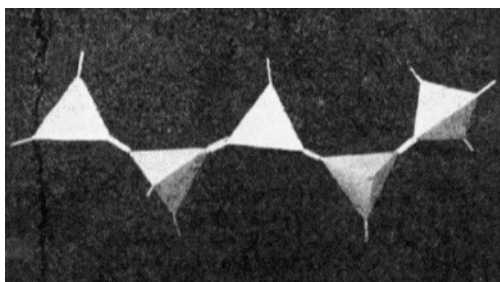
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

LAS DIFERENTES ESTRATEGIAS PARA ENFRENTAR UN PROBLEMA RECURRENTE

En todo aprendizaje y especialmente en las ciencias, los individuos forman tres tipos de visualizaciones relacionadas con los niveles representacionales (GILBERT, 2010). Entre estos niveles se encuentran: el nivel macroscópico, que corresponde a las representaciones mentales adquiridas a partir de la experiencia sensorial directa y se construye por medio de la información proveniente de los sentidos; el nivel microscópico (también denominado *submicro*), relacionado a representaciones abstractas (átomos, iones, moléculas de radicales libres); y el nivel simbólico, que expresa conceptos químicos a partir de fórmulas y ecuaciones, entre otros (JOHNSTONE, 1991; GILBERT; TREAGUST, 2009).

Durante algunas décadas, investigadores han sugerido diferentes estrategias de enseñanza para superar este problema epistemológico y conseguir familiarizar a los alumnos con los tres niveles representacionales de la química (AL-BALUSHI; SHEIKHA, 2014). En 1945, por ejemplo, un profesor de la escuela politécnica de Puerto Rico, insatisfecho con los resultados del uso de los modelos moleculares tangibles que construía y usaba para hacer las demostraciones, decidió que sus alumnos elaboraran sus propios modelos en cartulina (Figura 1) para manipularlos individualmente y concluyó que “se obtuvieron resultados mucho mejores [...]” (FROMM, 1945, p.43).

Figura 1 - Modelos moleculares de cartulina



Fuente: FROMM, 1945, p.43.

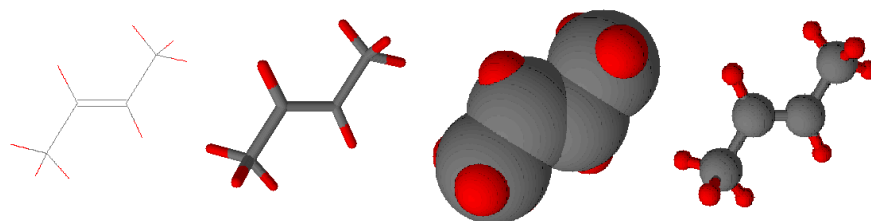
Posteriormente, en el año 1957 una profesora de la Universidad de tecnología de Texas propuso que no se utilizaran solamente modelos tridimensionales para las demostraciones, ya que su uso no era suficiente para llegar a conclusiones. Esto, según la investigadora, también indica que la principal dificultad es una visualización tridimensional inadecuada (SHINE, 1957).

Los años pasaron, nuevas tecnologías surgieron, pero el problema del aprendizaje permanece y un número considerable de estudiantes no consigue adquirir la habilidad para resolver problemas estereoquímicos, aparentemente porque no consiguen visualizar las relaciones espaciales (WU; SHAH, 2004). Aprender química es un desafío debido a su complejidad y a la necesidad de que los alumnos construyan asociaciones entre diferentes, –aunque relacionadas– representaciones de la materia y sus cambios (THOMAS, 2017). Harrison y Treagust (2000) afirman que los alumnos prefieren pensar en procesos y conceptos abstractos en términos concretos y por eso sugieren el uso de modelos analógicos. Múltiples niveles de representaciones han sido utilizados como estrategia para la enseñanza de química (TREAGUST et al., 2011; KOZMA, 2003) y algunos estudios han demostrado que la enseñanza que usa múltiples niveles de representación puede ayudar a la comprensión del alumno y las representaciones concretas, aumentar la eficacia en la instrucción (LIN; SON; RUDD, 2016).

Varios investigadores han trabajado con el uso de modelos (concretos o computacionales) que pueden ser manipulados por los alumnos y no solo ser visualizados en las manos del profesor o en la pantalla de un proyector a determinada distancia. Es el caso de profesores de México que utilizaron modelos tridimensionales construidos en papel para la enseñanza de quiralidad en moléculas con carbono asimétrico (ARROYO-CARMONA E PÉREZ-BENÍTEZ, 2003).

El uso de simulaciones y animaciones computacionales informáticas es ampliamente citado en varias investigaciones (KOZMA; RUSSELL, 2005; WU; KRAJCIK; SOLOWAY, 2001) con resultados alentadores y más recientemente, la utilización de modelado molecular también ha mostrado resultados promisorios (RAMOS; SERRANO, 2015). Visualizar los aspectos tridimensionales de las moléculas, así como su relación con otras es, sin duda, difícil (KURBANOGLU; TASKESENLIGIL; SOZBILIR, 2006); por eso las herramientas de visualización se han vuelto importantes estrategias de instrucción para las ciencias (STIEFF; BATEMAN; UTTAL, 2005). Además, nuestros actuales alumnos demandan una alfabetización tecnológica para sobrevivir en esta era basada, precisamente, en la tecnología (BHARATHY, 2015). En general, las representaciones en 3D más utilizadas son: *Wireframe* (modelo en forma de alambres), *Sticks* (modelos similares a varillas), *Spacefill* (modelo de espacios llenos por orbitales) y *Balls and Sticks* (modelo de bolas y varillas). La figura 2 muestra ejemplos de las respectivas representaciones citadas, construidas con el software ChemSketch para la molécula del but-2-eno.

Figura 2 - Representaciones Sticks, Wireframe, Spacefill y Balls and sticks

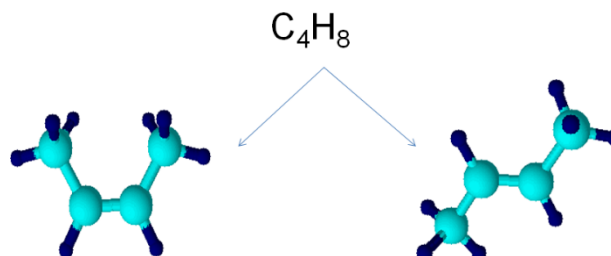


Fuente: Autoría propia (2019).

La representación tridimensional permite la percepción de detalles como geometría molecular, longitudes y ángulos de conexión. Percepción de gran utilidad para la química, ya que la representación molecular gráfica permite identificar las diferencias entre las moléculas (HABRAKEN, 2004). En el caso de los estereoisómeros del but-2-eno: la fórmula molecular para ambos es C_4H_8 . La representación simbólica no es suficiente para explicar

el fenómeno porque a partir de la misma podemos decir que el compuesto C_4H_8 es exactamente igual a otro compuesto también con la misma fórmula. Pero al visualizar sus fórmulas estructurales y/o modelos 3D como en la Figura 3, la diferencia es más evidente.

Figura 3 - Estereoisómeros but-2-eno



Fuente: Autoría propia (2019).

Investigadores del área destacan que es innegable la necesidad de comprender los aspectos tridimensionales de las moléculas para un buen desempeño en estereoquímica. La instrucción espacial es esencial ya que la falta de habilidades para su visualización es lo que dificulta la comprensión conceptual, afectando un buen entendimiento de la química. (OLIVER-HOYO; BABILONIA-ROSA, 2017). Pero para que haya un aprendizaje satisfactorio los estudiantes deben dominar previamente conceptos básicos (BHARATHY, 2015) o, siguiendo la teoría de los campos conceptuales, dominar la red de conceptos y su entramado. Aquí no se trata de reforzar que para aprender estereoquímica el estudiante deba contar con los conocimientos previos necesarios, además de tener la capacidad de visualización tridimensional. Se trata, en realidad, de cuestionar si la falta de capacidad de visualización tridimensional no ha sido sobrestimada como un problema central en el aprendizaje de estereoquímica en detrimento de otros problemas de aprendizaje que, a nuestro modo de ver, preceden a la necesidad cognitiva de visualización espacial.

EL PROCESO DE FORMACIÓN DE CONCEPTOS SEGÚN LA TEORÍA DE LOS CAMPOS CONCEPTUALES

La Teoría de los Campos Conceptuales desarrollada en la década del 70 por el psicólogo y matemático francés Gerard Vergnaud, ha buscado entender mejor cuáles son los problemas específicos para la comprensión de un área de conocimiento determinada. La conceptualización, entendida como el proceso de formación o construcción de conceptos, se considera la piedra angular de la cognición, la esencia del desarrollo cognitivo (VERGNAUD, 1998; 1996).

Una de las particularidades que se destacan de este aporte teórico, es que los conceptos son vistos relacionados entre sí y no como entidades aisladas. El conocimiento está organizado en un conjunto de situaciones y conceptos, denominado campo conceptual (VERGNAUD, 1993). Los campos conceptuales se caracterizan por la presencia de conceptos, procedimientos, lenguajes y representaciones simbólicas; definidos como un conjunto informal y heterogéneo de problemas, situaciones, relaciones, estructuras, contenidos y operaciones del pensamiento, conectados unos a otros y que posiblemente están vinculados durante el proceso de adquisición de conocimiento (VERGNAUD, 1982).

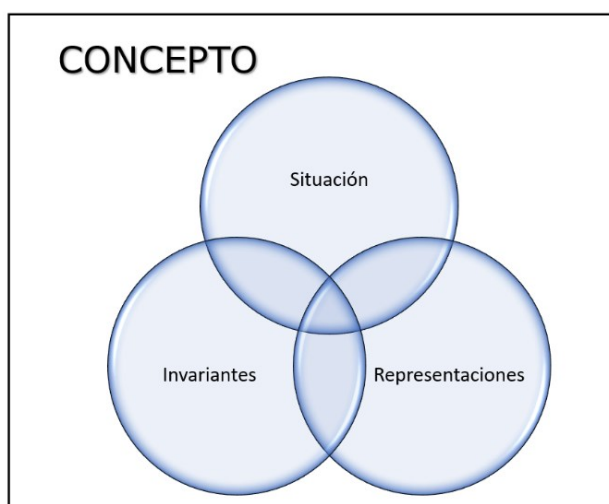
Muchas veces, el mayor desafío de un profesor es brindarles a los alumnos oportunidades para que desarrollen esquemas y superen sus dificultades, una vez que un buen desempeño didáctico, según Vergnaud, “se basa, necesariamente, en el conocimiento de las dificultades relativas a las tareas cognitivas, los obstáculos habitualmente enfrentados, el repertorio de procedimientos disponible y las representaciones posibles” (1993, p.17).

El dominio de un campo conceptual es algo progresivo y requiere el uso de una variedad de conceptos, esquemas y representaciones simbólicas, todos fuertemente conectados (VERGNAUD, 1996). El estudio del campo conceptual busca investigar las dificultades constatadas durante el proceso de conceptualización (MOREIRA, 2002) y existen básicamente tres justificaciones señaladas por Vergnaud (1983) para que se utilice la noción de campo conceptual en la comprensión del proceso de adquisición de conocimiento:

- a) Un concepto no se forma a partir de un único tipo de situación;
- b) Una situación no se analiza con un único concepto;
- c) La construcción y asimilación de todas las propiedades de un concepto se elabora a lo largo de años, a partir de analogías y equívocos, contraponiendo situaciones entre concepciones, procedimientos y significantes.

Suponiendo que sea prácticamente imposible estudiar un concepto de manera aislada, fragmentada (VERGNAUD, 1983), la teoría propone que un concepto se considere una tríada de conceptos (Figura 4) que puede representarse de la siguiente forma: C = SIR (concepto = situación, invariantes operatorias y representaciones simbólicas).

Figura 4 - Componentes del concepto



Fuente: Autoría propia (2019).

El hecho de considerar el concepto como una tríada de diferentes elementos implica que siempre se observe simultáneamente (MOREIRA, 2002). En definitiva, es por este motivo que no se estudian situaciones o conceptos aislados, sino campos conceptuales. La tabla 1 presenta una breve definición de cada uno de los conceptos de la tríada.

Tabla 1 - El concepto de concepto

Componentes del concepto	Definición (VERGNAUD, 1998, 2009)
Conjunto de situaciones	Facilitan el proceso de conceptualización y le dan sentido al concepto. Un concepto se vuelve significativo para el individuo a partir de una serie de situaciones. Las situaciones son las tareas a ser resueltas, la solución de los problemas.
Invariantes operatorias	En una situación dada, el sujeto dispone de conocimientos variados para identificar los objetos y sus relaciones, a partir de los objetivos y las reglas de conducta que se movilizan en los

Componentes del concepto	Definición (VERGNAUD, 1998, 2009)
	esquemas (estructuras mentales). Las invariantes operatorias son los componentes cognitivos que serán utilizados para enfrentar las situaciones.
Representaciones	El conjunto de las formas de lenguaje que permite representar simbólicamente el concepto, sus propiedades, las situaciones y los procedimientos para efectuar la resolución.

Fuente: Autoría propia (2019).

En resumen, "hay un conjunto de situaciones que le dan sentido al concepto; un conjunto de invariantes operatorias asociadas al concepto y un conjunto de significantes que pueden representar los conceptos y las situaciones que permiten entenderlos" (VERGNAUD, 1983, p. 393). El concepto de situación empleado por Vergnaud (1993) no es el de la situación didáctica, sino el de tarea, siendo que toda situación compleja puede ser analizada como una combinación de tareas cuya naturaleza y dificultades propias es importante conocer. La dificultad de una tarea no es, ni la suma, ni el producto de las diferentes subtareas involucradas, pero está claro que el rendimiento en cada subtarea afecta el rendimiento global.

Los esquemas se refieren necesariamente a situaciones, o clases de situaciones. Vergnaud (1993) considera la existencia de dos tipos de situaciones:

a) Las situaciones para las que el sujeto cuenta en su repertorio con la competencia necesaria para la resolución inmediata de la situación.

b) Las situaciones ante las que el sujeto no dispone de todas las competencias necesarias para resolverlas, lo que lo obliga a un tiempo de reflexión y de exploración de todos los ítems abordados para la resolución de la tarea y le conduce eventualmente al éxito o al fracaso.

¿Por qué los problemas de aprendizaje de esta área no se resumen al nivel de las habilidades de visualización?

El campo conceptual es una unidad de estudio para darle sentido a las dificultades observadas en la conceptualización, que es la esencia del desarrollo cognitivo (MOREIRA, 2002). La teoría de Vergnaud (1993) al poner el foco en la comprensión de los problemas específicos de un campo de conocimiento determinado requiere que el profesor analice las formas más eficientes de trabajar los contenidos para poder superar las dificultades.

Los conceptos desarrollados en el proceso de aprendizaje serán necesario para comprender nuevas situaciones. Así el dominio de un campo conceptual puede pensarse en términos de producción de conocimiento científico (CEDRAN, KIOURANIS; 2019). Para dominar el campo de la estereoquímica, por ejemplo, antes de comprender cómo una misma fórmula molecular origina diferentes compuestos, es preciso entender conceptos como átomo, molécula, enlaces químicos (simples, dobles). Y además de dominar esta red de conceptos es necesario comprender los diferentes modelos de representación utilizados: fórmulas químicas, fórmula estructural (plana y espacial) o estructuras bi y tridimensionales, para recién entonces comprender el concepto de estereoquímica como un todo. Consecuentemente, el campo conceptual que abarca la estereoquímica está delimitado por los conceptos, situaciones y representaciones que corresponden a esta área (RAUPP, 2015). Cuando analizamos la comprensión de las estructuras tridimensionales, debemos tener en cuenta que, en clase, a los alumnos se les enseñan los conceptos de geometría molecular, cómo dibujar estructuras orgánicas en una variedad de formatos, estereoquímica, entre otros, todos conceptos que requieren contar con habilidades espaciales. (HARLE; TOWNS, 2010). Con el dominio de esos conceptos junto con habilidades de percepción espacial, el estudiante puede movilizar sus invariantes operatorias para resolver las situaciones de las tareas.

Un concepto no puede ser examinado y comprendido solo, se necesitan varias situaciones para entenderlo. Y una situación no se puede analizar solamente a partir de un concepto, para utilizar en clase estrategias que permitan el desarrollo, tanto de habilidades visuoespaciales como el dominio conceptual de los estudiantes, es indispensable investigar si existe el dominio de los conceptos previos necesarios. En otras palabras, si los estudiantes cuentan con herramientas para lidiar con situaciones de estereoquímica, ya que las habilidades de visualización (que son indispensables) no son las únicas competencias necesarias para la resolución de situaciones en ese campo.

METODOLOGÍA

LOS PARTICIPANTES DE LA INVESTIGACIÓN Y SU CONTEXTO

Buscando responder a la pregunta de si los estudiantes de secundaria cuentan con el necesario dominio de los conceptos básicos para comprender estereoquímica ha sido realizado un estudio exploratorio con dos grupos de enseñanza media de un curso técnico de química. En esta investigación participaron voluntariamente 49 estudiantes de 15 a 17 años, de dos grupos de segundo año de enseñanza secundaria de un curso técnico de química. Ambos grupos ya habían trabajado con el contenido "isomería" en clase. Todos los estudiantes ya habían estudiado este tema con la misma profesora titular de la asignatura Química Orgánica I.

La escuela donde se realizó el estudio es una escuela técnica tradicional de Río Grande do Sul, situada en la región metropolitana de Porto Alegre, en Brasil, con una estructura orientada a la educación profesional de nivel técnico de forma integrada. Los alumnos participantes debían haber concluido la enseñanza secundaria en la fecha de la inscripción. Se trabajó con cerca de tres mil alumnos matriculados, provenientes de más de 50 municipios de Río Grande do Sul. La enseñanza técnica integrada se ofrece de forma articulada con la enseñanza secundaria, está dirigida a alumnos que han concluido la enseñanza primaria y tiene una duración de cuatro años además de la pasantía en una empresa.

El curso técnico de Química busca específicamente desarrollar las competencias necesarias para la operación, monitoreo y control analítico de procesos industriales, así como para la prestación de servicios de asistencia técnica en el área industrial y comercial, el control de calidad de insumos y productos y el desarrollo de proyectos de investigación en diferentes tecnologías de producción, fundamentándose en los principios de gestión y preservación ambiental.

EL INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN Y EL PROCESO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La investigación relatada en este artículo es un recorte de un trabajo de doctorado, y aborda el análisis de tres aspectos que son considerados conceptos clave para el entendimiento y avance en el campo de la estereoquímica: carbono asimétrico, enantiómeros y quiralidad. Como instrumento de investigación se utilizó una prueba diagnóstica desarrollada por el profesor Venkat Vishnumolakala (2013) con la colaboración de su orientador David Treagust, ambos de la Curtin University de Australia. Este instrumento fue recomendado personalmente por el Profesor David Treagust durante la presentación de un trabajo que contenía los datos preliminares de esta investigación, en la Conferencia de la Asociación de Educación Europea –ESERA– en la ciudad de Nicosia, Chipre, en septiembre de 2013. La prueba mencionada fue creada por los autores citados para evaluar los pareceres de estudiantes en estereoquímica sobre determinados "conceptos clave". Según Vishnumolakala (2013), esta prueba fue elaborada a partir de los

principios que defiende Treagust (1988) quien indica una investigación bibliográfica previa en la temática sobre concepciones alternativas de los estudiantes (ideas que los alumnos aportan y que no coinciden con los saberes científicos), seguida de entrevistas a estos estudiantes y la elaboración, refinando las preguntas de la prueba. Se eligió un grupo de tres estudiantes ejemplares para realizar una prueba piloto y después de la corrección y validación, ésta fue analizada usando la opinión de expertos (incluyendo autores de libros didácticos de estereoisomería e investigadores del área de educación química). Para la validación de la construcción de la prueba se han investigado grupos con índices de dificultad (VISHNUMOLAKALA, 2013). Más detalles sobre la elaboración de la prueba y el significado didáctico de las respuestas incorrectas aparecen en el trabajo citado.

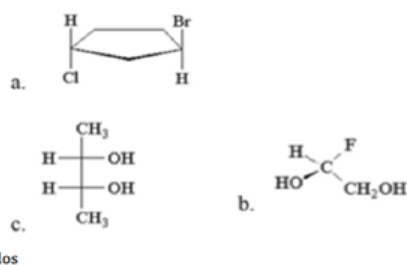
La prueba completa fue traducida al portugués y quedó compuesta por cinco preguntas objetivas en las cuales los alumnos debían marcar con una “X” la respuesta correcta, además de indicar la alternativa con una justificación para el concepto elegido en cada respuesta. Esta prueba diagnóstica fue seleccionada porque requiere relacionar los diferentes conceptos del campo de la estereoquímica para obtener un conjunto correcto de respuestas *versus* justificación. Es un ensayo inicial para investigar cómo se entienden los conceptos básicos de estereoquímica que puede ser valioso para los educadores de ciencias interesados en medir la comprensión conceptual y la percepción de aprendizaje de los estudiantes (VISHNUMOLAKALA, 2013). Las tres preguntas seleccionadas para la discusión en este trabajo se definieron en función de tratarse de algunos de los conceptos clave para la comprensión inicial del área: carbono asimétrico, enantiómeros y quiralidad.

PREGUNTA CARBONO ASIMÉTRICO

Un carbono asimétrico es un átomo con enlaces a cuatro grupos diferentes, que consecuentemente no presenta un plano de simetría y sus imágenes especulares no son superponibles (BRUICE, 2014). Saber identificar un carbono asimétrico es fundamental para comprender el concepto de centro quiral y de enantiomería (normalmente es el caso del carbono, pero otros átomos también pueden originar centros quirales). Para responder a esta pregunta y realizar la identificación el concepto de “cuatro diferentes enlaces” era suficiente, pero para elegir la justificación correcta se esperaba que los estudiantes utilizaran, además del concepto de carbono asimétrico, los conceptos de plano de simetría e imágenes especulares. Es decir, es necesario que utilicen un conjunto de conceptos. Todos los compuestos presentaban al menos un carbono asimétrico. Siendo así, el conjunto D1(*) expresa la correcta relación entre respuesta y justificación (Fig. 5).

Figura 5 - Tema carbono asimétrico

1: Determine cuál(es) de estos compuestos tiene(n) carbono asimétrico (centro quiral)



Justificación

1. Las moléculas no son superponibles con sus imágenes especulares.
2. Las moléculas son superponibles con sus imágenes especulares.
3. El carbono quiral no está enlazado a cuatro diferentes grupos.
4. No tienen un plano de simetría.

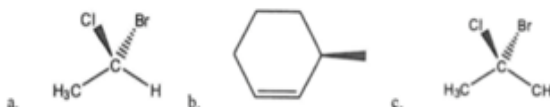
Fuente: Autoría propia (2019).

PREGUNTA ENANTIÓMEROS

Los enantiómeros son moléculas quirales que forman imágenes especulares unas de las otras y no son superponibles. Cuando estudiamos la estereoquímica de una reacción, debemos estar atentos a si el producto de la reacción puede existir como dos o más enantiómeros, un único estereoisómero o todos los estereoisómeros posibles (BRUICE,2014). La pregunta 2 (Fig. 6) buscó analizar qué entendían los estudiantes sobre la quiralidad de la molécula y la posibilidad de que ésta forme enantiómeros. Una molécula con un centro asimétrico es un compuesto quiral. Sin embargo, esa no es la única causa de la quiralidad en las moléculas. Como es el caso de un compuesto meso que posee dos o más centros quirales y un plano de simetría y es un compuesto aquiral. En la molécula c, el átomo de carbono cuaternario posee dos enlaces iguales (-CH₃), por lo tanto, el conjunto C3(*) expresa la correcta relación entre respuesta y justificación.

Figura 6 - Tema enantiómeros

2: ¿Cuáles compuestos no poseen un enantiómero?



Justificación

1. Tiene un centro quiral.
2. No tiene un plano de simetría.
3. Es aquiral.

Fuente: Autoría propia (2019).

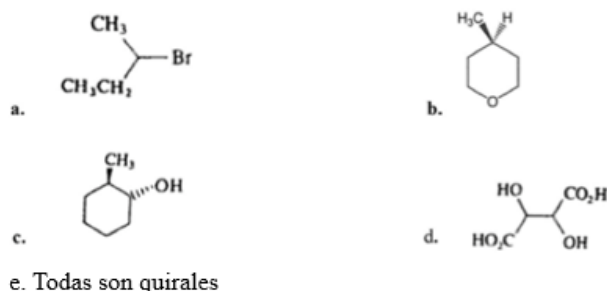
PREGUNTA QUIRALIDAD

Cualquier molécula aquiral presenta al menos un plano de simetría y por lo tanto tiene una imagen especular superponible (BRUICE, 2014). A partir de la constatación de que las diferencias isoméricas pueden dar lugar a diferencias en las propiedades, se percibe que la quiralidad molecular desempeña un papel crucial en la ciencia y la tecnología. La vida depende de la quiralidad molecular, pues la mayoría de los fenómenos fisiológicos provienen de interacciones moleculares altamente precisas, un compuesto quiral biológicamente activo interactúa con su lugar receptor de una manera quiral, y los enantiómeros pueden ser discriminados por el receptor de maneras muy diferentes. (COSTA, 2018). Generalmente se espera que los estudiantes analicen cada molécula basados en su plano de simetría y cualquier error puede conducir a una incomprensión del concepto de quiralidad (VISHNUMOLAKALA, 2013).

La combinación correcta para esta pregunta (Fig. 7) es B4, pues la molécula B tiene un plano de simetría interno y su imagen especular es idéntica a la original. Otra forma de identificar una molécula aquiral es por la ausencia de un carbono quiral, ya que la causa más común de quiralidad en moléculas orgánicas es la presencia del mismo (MCMURRY, 2005).

Figura 7 - Tema quiralidad

3: Identifique las moléculas aquirales.



Justificación

1. La molécula no tiene plano de simetría, por lo tanto no es quiral.
2. Sus imágenes especulares no son idénticas.
3. El estereocentro está enlazado a cuatro diferentes grupos.
4. Sus imágenes especulares son idénticas a la original, por lo tanto la molécula no es quiral.

Fuente: Autoría propia (2019).

Se les entregaron a los alumnos las pruebas impresas con las preguntas y la cuadrícula de respuestas como parte de una tarea de evaluación de la disciplina. En las preguntas objetivas los estudiantes deberían marcar con una "X" la respuesta correcta y la justificación correspondiente para cada respuesta. Cada una de las preguntas sólo tenía una combinación correcta de justificación. La figura 8 muestra una cuadrícula de respuestas.

Figura 8 - Cuadrícula de respuestas

RESPOSTAS	JUSTIFICATIVA
1 <input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4
2 <input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4
3 <input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D <input type="radio"/> E	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4
4 <input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4
5 <input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C <input type="radio"/> D	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4

Fuente: Autoría propia (2019).

ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS

Las pruebas pasaron por un análisis cuantitativo y los datos obtenidos se organizaron de acuerdo con el método estadístico de distribución de frecuencias, considerando la frecuencia absoluta (n) y la frecuencia relativa porcentual (FP). La frecuencia absoluta indica el número de alumnos que marcan cada alternativa y la frecuencia relativa porcentual de un elemento está dada por la razón entre la frecuencia absoluta del mismo y el número total de elementos de la distribución (suma de las frecuencias absolutas) y se obtiene por medio del resultado frecuencia relativa multiplicada por cien ($FP = Fr \times 100$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se analizan por separado los resultados obtenidos con cada una de las preguntas sobre conceptos clave de estereoquímica.

PREGUNTA CARBONO ASIMÉTRICO

La Tabla 2 presenta los resultados de esta pregunta e indica el número de alumnos con el respectivo porcentaje para cada alternativa. Aunque el concepto de carbono asimétrico sea un requisito básico para la comprensión de estereoquímica, sólo un 14,28% de los estudiantes escogió la combinación respuesta-justificación correcta. Un total del 22,44% señaló la repuesta cierta, mostrándose capaces de identificar la presencia de carbono asimétrico en todas las estructuras presentadas, sin embargo, no fueron capaces de relacionarlo a la debida justificación.

Tabla 2 - Resultados de la pregunta carbono asimétrico

Respuesta	Justificación								Total (%)
	1		2		3		4		
	n	FP	n	FP	N	FP	n	FP	
A	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	24	48,97	6	12,24	4	8,16	1	2,04	71,4
C	1	2,04	1	2,04	1	2,04	0	0	6,10
D	7*	14,28*	3	6,12	0	0	1	2,04	22,4

Fuente: Autoría propia (2019).

Como las moléculas están presentadas usando la fórmula de líneas de enlace, los estudiantes necesitan “completar la molécula” con los átomos de hidrógeno que no están representados, para después verificar la presencia o no de un carbono asimétrico. Otro factor es cómo es entendido por los estudiantes el término “cuatro diferentes grupos” que se limita a “cuatro diferentes átomos” conectados directamente al carbono. Además, como se ha constatado en estudios preliminares, los estudiantes tienen más dificultad para identificar la presencia de isomería en compuestos de cadena cerrada (RAUPP; SERRANO; MOREIRA, 2009). Según Vergnaud (1993) éste es un ejemplo de una situación para cuya resolución el sujeto no dispone de las habilidades necesarias, lo que le exige un considerable tiempo de reflexión y análisis de todas las opciones ofrecidas que lo conducirán probablemente al éxito o al fracaso.

PREGUNTA ENANTIÓMEROS

Como fue señalado anteriormente, los enantiómeros son moléculas quirales que forman imágenes especulares unas de las otras y no son superponibles (Bruice, 2014). La pregunta 2 buscó analizar cómo comprendían los estudiantes la quiralidad de la molécula y la posibilidad de que ésta forme enantiómeros. Una molécula con un centro asimétrico es un compuesto quiral. La Tabla 3 presenta los resultados relacionados a este problema.

Tabla 3 - Resultados de la pregunta sobre enantiómeros

Respuesta	Justificación								Total (%)
	1		2		3		4		
	n	FP	n	FP	n	FP	n	FP	
A	3	6,12	0	0	0	0	0	0	6,12
B	0	0	8	16,32	14	28,57	1	2,04	46,9
C	1	2,04	1	2,04	20*	40,82*	1	2,04	46,9

Fuente: Autoría propia (2019).

Curiosamente, para las moléculas B y C fue verificado el mismo porcentaje total. La molécula B (incorrecta) es una molécula de cadena cerrada que contiene un carbono asimétrico y es un enantiómero. La molécula A presenta claramente 4 enlaces diferentes, aun así, un pequeño número de estudiantes (6,12%), eligió la combinación A1; justificando que la molécula es aquiral porque posee sólo un centro quiral. Esto muestra una comprensión errónea de quiralidad y de su relación con el enantiomerismo, ya que éste se asocia a la presencia de al menos un carbono quiral en la molécula. En comparación con los resultados originales de Vishnumolakala (2013), un porcentaje similar de los alumnos en su post prueba (42,86%) elige la alternativa correcta después de utilizar el método didáctico *Process-Oriented Guided Inquiry Learning* (POGIL) como se discutió en el trabajo del autor. En su pre prueba, sólo el 14,75% eligió la combinación de respuesta y justificación correcta. También hay un gran porcentaje de estudiantes que seleccionan la molécula B (43% en la post prueba, y el 39% en la pre prueba).

PREGUNTA QUIRALIDAD

En la Tabla 4, identificamos que un 28,48% de los estudiantes escogieron la molécula B, pero solamente un 12,2% escogió la combinación respuesta-justificación correcta. Más de la mitad de los estudiantes eligió incorrectamente la molécula C (50,97%). Las moléculas, A, C y D poseen al menos un carbono asimétrico.

Tabla 4 - Resultados de la pregunta sobre quiralidad

Respuesta	Justificación								Total (%)
	1		2		3		4		
	n	FP	n	FP	n	FP	n	FP	
A	0	0	0	0	1	2,04	0	0	2,04
B	6	12,2	1	2,04	1	2,04	6*	12,2*	28,48
C	6	12,2	1	2,04	4	8,16	14	28,57	50,97
D	2	4,08	2	4,08	1	2,04	2	4,08	14,28
E	0	0	0	0	2	4,08	0	0	4,08

Fuente: Autoría propia (2019).

La identificación del plano de simetría es una de las mayores dificultades para la enseñanza de química molecular, ya que la visualización de las estructuras moleculares y sus elementos, su simetría y disposición, son esenciales para la comprensión de diversos aspectos (NÚÑEZ, 2008). Esta dificultad para determinar relaciones basadas en la estructura espacial está vinculada a la dificultad de visualizar y manejar mentalmente la representación tridimensional, habilidad que no todos los estudiantes dominan (KOZMA, CHIN, RUSSEL, MARX, 2000; KEIG; RUBBA, 1993); particularmente la transición de la representación 2D para 3D.

En el trabajo original de Vishnumolakala (2013), un 16,39% de los estudiantes elige la combinación correcta en la pre prueba y después de la utilización de su método didáctico los aciertos alcanzan un 50%. De este modo, se observa una diferencia importante con nuestro resultado y esto puede indicar que la metodología activa que invita a los estudiantes a discutir conceptos, definiciones y trabajar en la resolución de problemas con sus compañeros, es relativamente eficiente para facilitar el papel del docente al definir su estrategia de enseñanza. Por otro lado, en el trabajo original hubo una cantidad inexpresiva de estudiantes (un 5% en la pre prueba) que eligió la molécula C, indicando que la muestra de Vishnumolakala (2013) no presenta dificultad para la resolución de la pregunta.

CONCLUSIONES

Los datos recolectados en la prueba diagnóstico dejan en evidencia un aspecto que afecta el aprendizaje de los estudiantes analizados en este estudio exploratorio: una laguna en los conocimientos previos básicos para un buen desempeño en estereoquímica, laguna que puede afectar la capacidad de relacionar conceptos y dominar mejor y de una forma más amplia este campo conceptual. Esta investigación inicial ha puesto en evidencia problemas en el dominio de conceptos básicos que indudablemente impactan el progreso del aprendizaje del campo. Se ha observado, por ejemplo, que cuando comparamos nuestros resultados sobre enantiómeros con los resultados de Vishnumolakala (2013), hemos obtenido resultados semejantes a los del autor después de utilizar su metodología didáctica SOGIL, específicamente para el concepto de enantiómeros. Sin embargo, para la pregunta sobre quiralidad los resultados de indican que su muestra presenta una evolución en el dominio de este concepto en particular y se destaca cuando los comparamos a los resultados de nuestra muestra. En resumen, el aprendizaje de ciertos conceptos requiere el uso de diferentes y variadas estrategias didácticas. Creemos que en el caso de la estereoquímica, dada la red de conceptos que deben dominarse para la comprensión de cómo las estructuras de las moléculas en tres dimensiones impacta en las propiedades de los compuestos y en la estereoquímica de las reacciones, además de las estrategias para el desarrollo de habilidades visuoespaciales, es fundamental la discusión sobre los conceptos básicos del área y la verificación de la adquisición de los mismos. Esta es la principal contribución de este trabajo.

La muestra del presente estudio sugiere que las dificultades del campo de la estereoquímica, históricamente relacionadas a los problemas de visualización, en realidad pueden ser atribuidas a aspectos más simples, como el dominio de conceptos clave del área. Se puede afirmar que el dominio de estos conceptos, puede impactar o añadirle problemas al desafío indiscutible de la visualización, una vez que el dominio de un concepto está vinculado a situaciones, invariantes operatorias y representaciones simbólicas

REPERCUSIONES EN LA ENSEÑANZA

En un proceso progresivo de adquisición del dominio de un campo conceptual, el gran desafío para el profesor es ofrecerles a los estudiantes oportunidades para que desarrollen sus esquemas y superen sus dificultades (VERGNAUD, 1993), siendo que un buen desempeño didáctico se basa necesariamente en estar consciente de estas dificultades

cognitivas y de los obstáculos que normalmente se enfrentan en la construcción del conocimiento.

Este estudio exploratorio nos lleva a reflexionar que si asumimos que las habilidades visuales son la principal –o única– fuente de dificultad, sin antes comprender cuáles son las dificultades específicas de la clase, estaríamos dejando de lado la importancia de diagnosticar cuál es el problema de desarrollo real de los estudiantes: las carencias en el dominio de los conceptos básicos que forman parte de la red de conceptos del campo.

La comprensión de los aspectos tridimensionales es un obstáculo significativo para el avance en el campo conceptual, y puede ser que, para algunos alumnos, ésta sea la única dificultad, puesto que es un desafío innegable y discutido también en otras áreas. Se debe enfatizar que la visualización es una de las competencias dentro de un conjunto de procedimientos y esquemas para la conceptualización pero, además, creemos que ciertos conceptos clave (que este trabajo no discute de forma exhaustiva una vez que nos limitamos a tres) se constituyan en una dificultad que precede e incluso supera las dificultades de visualización espacial.

No obstante, dado que comprender un campo conceptual es una actividad progresiva que requiere el uso de varios conceptos, esquemas y representaciones simbólicas en estrecha relación (VERGNAUD, 1996), al pensar una estrategia para la enseñanza de este tema, es evidente que sólo entendiendo esa especificidad de la clase el profesor podrá determinar formas más eficientes de trabajar el contenido.

Assim, cuando un profesor percibe que sus alumnos necesitan discutir conceptos básicos que preceden los problemas de visualización puede preparar modelos de problemas puntuales para la superación de esta dificultad, mientras que otro profesor que percibe que sus alumnos dominan los conceptos básicos y no tienen habilidades visuoespaciales, deberá seleccionar actividades para que desarrollarlas. Esto, obviamente, no debe verse como una dicotomía –puede ser, incluso, que ambos caminos sean necesarios para todos los estudiantes.

The ability of understanding of the conceptual field of stereochemistry: the challenges that precede the problems of spatial visualization

ABSTRACT

The purpose of this exploratory study is to investigate whether high school students have mastery of basic concepts which are indispensable for the understanding of stereochemistry, taking as fact that this subject is a complex conceptual field, that requires the domain of a vast set of concepts such as: molecular structure, constitution and connectivity of atoms in a molecule, absolute configuration, molecular geometry, chirality, molecular symmetry, among others. The learning problems associated with this conceptual field, that belongs to the field of Organic Chemistry, have been the object of study for decades, and the complexity in solving problems in three-dimensional space has been stressed as one of the main reasons that impair learning. When investigating the difficulties of the field of stereochemistry, it was inquired if beyond the visualization there would be other barriers for learning. This exploratory study used as a data collection instrument a diagnostic test with objective questions on basic concepts of stereochemistry, such as asymmetric carbon and chirality. The group was composed of 49 students of the second year of high school of a technical school in chemistry of Rio Grande do Sul - Brazil. The data analysis method was content analysis. Having as theoretical contribution Gerard Vergnaud's Theory of Conceptual Fields which postulates that the essence of cognitive development is the process of constructing concepts and that a conceptual field is formed by a network concepts, relations and operations of thought. In the analyzed students there is a gap in relation to the previous knowledge necessary for the understanding of this field, which precedes the problems related to the three-dimensional visualization capacity.

KEYWORDS: Learning. Teaching and training. Cognitive process.

NOTAS

1. Este texto foi traduzido para o Espanhol por Gabriela Petit, tradutora pública espanhol/português (gbpetit@gmail.com).

REFERÊNCIAS

- ABRAHAM, M.; VARGHESE, V.; TANG, H. Using molecular representations to aid student understanding of stereochemical concepts. **Journal of Chemical Education**, v. 87, n. 12, p. 1425-1429, 2010.
- AL-BALUSHI, S. M.; AL-HAJRI, S. H. Associating animations with concrete models to enhance students' comprehension of different visual representations in organic chemistry. **Chemistry Education Research and Practice**, v. 15, n. 1, p. 47-58, 2014.
- ARROYO-CARMONA, R. E.; PÉREZ-BENÍTEZ, A. Modelos tridimensionales para la enseñanza de la quiralidad en átomos tetraédricos. **Educación Química**, v. 14, n. 1, p. 31-35, 2003.
- BEAUCHAMP, P. S. "Absolutely" simple stereochemistry. **Journal of Chemical Education**, v. 61, n. 8, p. 666, 1984.
- BERNARDINHO, F. ; GAMA, W. F. D. ; REZENDE, V. Ideias base do conceito de função mobilizadas por estudantes do ensino fundamental e ensino médio. **ACTIO**, Curitiba, v. 4, n. 2, p. 127-147, 2019. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/actio>.
- BHARATHY, J. B. Importance of Computer Assisted Teaching & Learning Methods for Chemistry. **Science**, v. 3, n. 4, p. 11-16, 2015.
- BRUICE, P. Y. **Química Orgânica**, vol. 1. São Paulo: Person Prentice Hall, 2014.
- BURRMANN, N. J.; MOORE, J. W. Implementation and student testing of a web-based, student-centered stereochemistry tutorial. **Journal of Chemical Education**, v. 92, n. 7, p. 1178-1187, 2015.
- CEDRAN, D. P.; KIOURANIS, N. M. M. Teoria dos campos conceituais: visitando seus principais fundamentos e perspectivas para o ensino de ciências. **ACTIO**, Curitiba, v. 4, n. 1, p. 63-86, 2019. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/actio>.
- CHENG, H. N.; MARYANOFF, C. A.; MILLER, B. D.; SCHMIDT, D. G. (Eds.). **Stereochemistry and Global Connectivity: The Legacy of Ernest L. Eliel** Volume 2. American Chemical Society, 2017. American Chemical Society.
- CODY, J. A.; CRAIG, P. A.; LOUDERMILK, A. D.; YACCI, P. M.; FRISCO, S. L.; MILILLO, J. R. Design and implementation of a self-directed stereochemistry lesson using embedded virtual three-dimensional images in a portable document format. **Journal of chemical education**, v. 89, n. 1, p. 29-33, 2011.

COSTA, M. M. **Síntese assimétrica organocatalítica de aminas quirais na fase homogênea e heterogênea**. 2018. (Dissertação de Mestrado). Departamento de Química. Universidade de Évora, Évora, 2018

CRIMMINS, M. T.; MIDKIFF, B. High structure active learning pedagogy for the teaching of organic chemistry: Assessing the impact on academic outcomes. **Journal of Chemical Education**, v. 94, n. 4, p. 429-438, 2017.

FROMM, F. On teaching stereochemistry. **Journal of Chemical Education**. (Letter) v. 22, n.2, p.98, 1945.

GILBERT, J. K. The role of visual representations in the learning and teaching of science: An introduction. *In: Asia-Pacific Forum on Science Learning & Teaching*. 2010.

GILBERT, J. K.; TREAGUST, D. F. Introduction: Macro, submicro and symbolic representations and the relationship between them: Key models in chemical education. *In: Multiple representations in chemical education*. Springer, Dordrecht, p. 1-8, 2009.

HABRAKEN, C. L. Integrating into chemistry teaching today's student's visuospatial talents and skills, and the teaching of today's chemistry's graphical language. **Journal of Science Education and Technology**, v. 13, n. 1, p. 89-94, 2004.

HARGITTAI, B.; HARGITTAI, I. **Struct Chem.**, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11224-011-9932-7>.

HARLE, M.; TOWNS, M. A review of spatial ability literature, its connection to chemistry, and implications for instruction. **Journal of Chemical Education**, v. 88, n. 3, p. 351-360, 2010.

HARRISON, A. G.; TREAGUST, D. F. Learning about atoms, molecules, and chemical bonds: A case study of multiple-model use in grade 11 chemistry. **Science Education**, v. 84, n. 3, p. 352-381, 2000.

JOHNSTONE, A. H. Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. **Journal of computer assisted learning**, v. 7, n. 2, p. 75-83, 1991.

KEIG, P. F.; RUBBA, P. A. Translation of representations of the structure of matter and its relationship to reasoning, gender, spatial reasoning, and specific prior knowledge. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 30, n. 8, p. 883-903, 1993.

KOZMA, R. The material features of multiple representations and their cognitive and social affordances for science understanding. **Learning and Instruction**, v. 13, n. 2, p. 205-226, 2003.

KOZMA, R.; RUSSELL, J. Students becoming chemists: Developing representational competence. *In: Visualization in science education*. Springer, Dordrecht. p. 121-145, 2005.

KOZMA, R.; CHIN, E.; RUSSELL, J.; MARX, N. The roles of representations and tools in the chemistry laboratory and their implications for chemistry learning. **The Journal of the Learning Sciences**, v. 9, n. 2, p. 105-143, 2000.

KURBANOGLU, N. I.; TASKESENLIGIL, Y.; SOZBILIR, M. Programmed instruction revisited: a study on teaching stereochemistry. **Chemistry Education Research and Practice**, v. 7, n. 1, p. 13-21, 2006.

LIN, Y. I.; SON, J. Y.; RUDD, J. A. Asymmetric translation between multiple representations in chemistry. **International Journal of Science Education**, v. 38, n. 4, p. 644-662, 2016.

LINTHORST, J. A. Polarimetry and stereochemistry: the optical rotation of Vitamin C as a function of pH. **Educación Química**, v. 25, n. 2, p. 135-138, 2014.

MCMURRY, J. **Química Orgânica**, Tradução: Ana Flávia Nogueira et al: 6ª edição. Norte-Americana, edição Combo, Editora: Thomson, São Paulo, 2005.

MOREIRA, M. A. A teoria dos campos conceituais de Vergnaud, o ensino de ciências e a pesquisa nesta área. **Investigações em ensino de ciências**. Porto Alegre. Vol. 7, n. 1 (jan./mar. 2002), p. 7-29, 2002.

NÚÑEZ, M.; QUIRÓS, R.; NÚÑEZ, I.; CARDA, J. B.; CAMAHORT, E.; MAURI, J. L. Collaborative augmented reality for inorganic chemistry education. In: WSEAS International Conference. Proceedings. **Mathematics and Computers in Science and Engineering**. WSEAS, p. 271-277, 2008.

OLIVER-HOYO, M.; BABILONIA-ROSA, M. A. Promotion of spatial skills in chemistry and biochemistry education at the college level. **Journal of Chemical Education**, v. 94, n. 8, p. 996-1006, 2017.

RAMOS, A.; SERRANO, A. Uma proposta para o ensino de estereoquímica cis/trans a partir de uma unidade de ensino potencialmente significativa (UEPS) e do uso de modelagem molecular. **Experiências em Ensino de Ciências**, São Paulo, v. 10, n. 3, p. 94-106, 2015.

RAUPP, D. T. **Alfabetização tridimensional, contextualizada e histórica no campo conceitual da estereoquímica**. Tese (Doutorado em Educação em Ciências). Programa de Pós- Graduação em Educação em Ciências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2015.

RAUPP, D. T.; DEL PINO, J. C. Estereoquímica no Ensino Superior: historicidade e contextualização em livros didáticos de Química Orgânica. **Acta Scientiae**, v. 17, n. 1, 2015.

RAUPP, D.; SERRANO, A.; MOREIRA, M. A. Desenvolvendo habilidades visuoespaciais: uso de software de construção de modelos moleculares no ensino de isomeria geométrica em química. **Experiências em ensino de ciências**, v. 4, n. 1, p. 65-78, 2009.

SHINE, H. J. aids in teaching stereochemistry: Plastic sheets for plane projection diagrams. **Journal of Chemical Education**, v. 34, n. 7, p. 355, 1957.

SHUI-LI, L. A. I. Discussion on teaching of some problems in stereochemistry. **Journal of Shaanxi Normal University** (Natural Science Edition), S1, 2005.

STIEFF, M.; BATEMAN, R. C.; UTTAL, D. H Teaching and learning with three-dimensional representations. *In: Visualization in science education*. Springer, Dordrecht, p. 93-120, 2005.

THOMAS, G. P. 'Triangulation:' an expression for stimulating metacognitive reflection regarding the use of 'triplet' representations for chemistry learning. **Chemistry Education Research and Practice**, v. 18, n. 4, p. 533-548, 2017.

TREAGUST, D. F. Development and use of diagnostic tests to evaluate students' misconceptions in science. **International Journal of Science education**, v. 10, n. 2, p. 159-169, 1988.

TREAGUST, D. F.; CHANDRASEGARAN, A. L.; ZAIN, A. N.; ONG, E. T.; KARPUDEWAN, M.; HALIM, L. Evaluation of an intervention instructional program to facilitate understanding of basic particle concepts among students enrolled in several levels of study. **Chemistry Education Research and Practice**, v. 12, n. 2, p. 251-261, 2011.

VERGNAUD, G. A classification of cognitive tasks and operations of thought involved in addition and subtraction problems. *In: Addition and subtraction: A cognitive perspective*, p. 39-59, 1982.

VERGNAUD, G. Quelques problèmes théoriques de la didactique a propos d'un exemple: les structures additives. **Atelier International d'Eté: Recherche en Didactique de la Physique**, v. 26, 1983.

VERGNAUD, G. Teoria dos campos conceituais. **Anais do 1º Seminário Internacional de Educação Matemática do Rio de Janeiro**, p. 1-26, 1993.

VERGNAUD, G. A trama dos campos conceituais na construção dos conhecimentos. **Revista do GEMPA**, v. 4, n. 4, 1996.

VERGNAUD, G. A comprehensive theory of representation for mathematics education. **The Journal of Mathematical Behavior**, v. 17, n. 2, p. 167-181, 1998.

VERGNAUD, G. The theory of conceptual fields. **Human development**, v. 52, n. 2, p. 83, 2009.

VISHNUMOLAKALA, V. R. **An exploration of process oriented guided inquiry learning in undergraduate Chemistry classes**. Tese de Doutorado. Curtin University, Bentley, 2013.

WU, H. K.; SHAH, P. Exploring visuospatial thinking in chemistry learning. **Science education**, v. 88, n. 3, p. 465-492, 2004.

WU, H. K.; KRAJCIK, J. S.; SOLOWAY, E. Promoting understanding of chemical representations: Students' use of a visualization tool in the classroom. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 38, n. 7, p. 821-842, 2001.

Recebido: 02 out. 2019

Aprovado: 19 nov. 2019

DOI: 10.3895/actio.v5n1.10703

Como citar:

RAUPP, D.T; PROCRONOW, T. R.; DEL PINO, J.C. ANDRADE NETO, A.S.; La capacidad de comprensión del campo conceptual de la estereoquímica: los desafíos que preceden a los problemas de visualización espacial. **ACTIO**, Curitiba, v. 5, n. 1, p. 1-21, jan./abr. 2020. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/actio>>. Acesso em: XXX

Correspondência:

Daniele Trajano Raupp

Av. Bento Gonçalves, 9500 – Prédio 43131 - Sala 20, Campus do Vale, Agronomia, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

