



La representación gráfica de la estructura espacial de las moléculas: eligiendo entre múltiples sistemas de notación

MARÍA-GABRIELA LORENZO¹ Y JUAN-IGNACIO POZO²

¹Universidad de Buenos Aires; ²Universidad Autónoma de Madrid



Resumen

El aprendizaje de la química requiere dominar los diferentes códigos mediante los que se representa gráficamente la organización espacial de las moléculas. Los alumnos deben no sólo aprender la nomenclatura de esos sistemas de representación, sino también sus reglas sintácticas, siendo capaces de traducir de un código o lenguaje a otro, y de decidir cuándo y con qué metas deben usar cada uno de esos sistemas de representación. Para investigar cómo proceden y qué dificultades tienen estudiantes universitarios de química para usar esos sistemas de representación realizamos dos estudios. En total participaron 201 estudiantes universitarios, 174 estudiantes argentinos de un primer curso de química orgánica y 27 estudiantes españoles de la carrera de Psicología, que respondieron a tareas escritas diseñadas específicamente para esta investigación.

Los resultados mostraron que en general los estudiantes de química utilizan los diferentes sistemas de representación de forma adecuada. Sin embargo, aunque son eficaces en los procesos de traducción, no lo son en cuanto a su uso estratégico dependiente del marco teórico-conceptual. Por otra parte, al presentarles en el segundo estudio una tarea sin contenido químico, pero gráficamente isomorfa a las tareas químicas, los estudiantes de química, a diferencia de los de psicología, cometían errores característicos como consecuencia de interpretar el problema con una tarea dentro de un sistema representacional químico. Se discuten también algunas de las implicaciones de los resultados para el aprendizaje y la enseñanza de la química en la universidad.

Palabras clave: Química, aprendizaje universitario, fórmulas químicas, sistema externo de representación.

The graphic representation of the spatial structure of molecules: Choosing between multiple notation systems

Abstract

To learn chemistry, students must master the different codes used for representing molecular structures in space. Students must not only learn the nomenclature of those representation systems, but also the syntactic rules necessary to translate them from one code or language to another. Moreover, they have to be able to decide when and with what goal they must use each of these representational systems. In order to investigate how university chemistry students use representational systems and what difficulties they encounter, two different studies were carried out. A total of 201 university students participated, 174 first year Argentine organic chemistry students, and 27 Spanish psychology students. They all answered writing tasks specifically designed for this research study. The results showed that chemistry students are proficient in translating chemical representations from one system to another, and generally use the different representational systems correctly. However, they are not so proficient in using their knowledge strategically, i.e., when they are required to use the most adequate representation for a given situation. Moreover, in the second study when chemistry and psychology students were compared in an isomorphic task without chemical content, chemistry students, but not psychology students, made typical mistakes, as they interpreted the task within a chemical representation system. We also discuss some of the implications of these results for learning and teaching chemistry at university.

Keywords: Chemistry, university learning, chemical depictions, external representational system.

Agradecimientos: Agradecemos especialmente a la profesora María del Puy Pérez Echeverría, por su ayuda para llevar a cabo esta investigación.

Este trabajo se realizó en el marco de los proyectos UBACyT B-055 (2008-2010), PICT 2005 N° 31947 (FONCyT-ANPCyT) y SEJ2006-15639-CO2-01/EDUC.

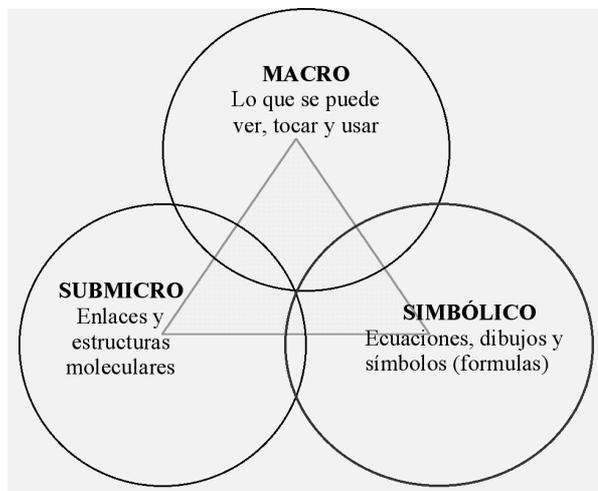
Correspondencia con los autores: María-Gabriela Lorenzo. Centro de Investigación y Apoyo a la Educación Científica (CIAEC). Departamento de Química Orgánica. Facultad de Farmacia y Bioquímica. Universidad de Buenos Aires. Junín 956 (CP 1113). Ciudad Autónoma de Buenos Aires (Argentina). E-mail: glorenzo@ffyb.uba.ar



La química: de los sentidos a los símbolos a través de diferentes niveles y sistemas de representación

En apariencia, la química es la ciencia de los sentidos. Desde sus orígenes, más vinculados con la técnica que con lo científico, los químicos han hecho uso de la percepción a través de la experiencia directa. No obstante, para comprender los fenómenos que observaban, los químicos se vieron obligados a ir más allá de esa información sensorial y desarrollar complejos sistemas de símbolos¹, de modo que en la Química, tal como la conocemos hoy, pueden diferenciarse tres niveles de representación (Johnstone, 1982, 1993, 2000; también Lorenzo, 2008) señalados por cada uno de los vértices de un hipotético triángulo: los niveles macroscópico, submicroscópico y simbólico, mediados a su vez por diferentes sistemas de representación (ver Figura 1)

FIGURA 1
Los niveles representacionales en química



La macroquímica corresponde a los fenómenos directamente observables, ese mundo de los sentidos que puede ser tocado, manipulado, visto y oído, en el cual pueden operarse transformaciones. Pero para poder darle sentido a los hechos observables en el nivel macroquímico se necesitó la creación de una química representacional, basada en las teorías desarrolladas en el nivel de la submicroquímica. Las herramientas de este nivel son los cálculos, las ecuaciones y los símbolos. El aprendizaje de la química requiere por tanto entender las relaciones entre ese mundo sensorial, macroquímico, las explicaciones en el nivel submicroquímico y los sistemas de representación que intentan dar cuenta en términos químicos de esos fenómenos.

Así, algunos estudios han mostrado que una misma persona, ya sea más experta o novata en química, tiene múltiples representaciones de los fenómenos estudiados por la química, tanto de naturaleza microscópica como macroscópica, pero que mientras las personas con más conocimiento químico tienden a diferenciar entre la representación microscópica y macroscópica de la materia, las más novatas no diferencian entre ellas. En general, los alumnos tienen dificultades para relacionar esos dos niveles de representación (Mortimer, 1998; Pozo, Gómez Crespo y Sanz, 1999; Stavy, 1995) e incluso cuando lo hacen, tienden a explicar el funcionamiento microscópico en función de la apariencia macroscópica de la materia (Pozo y Gómez Crespo, 2005) y en lugar de explicar las propie-

dades macroscópicas en un nivel submicroscópico, tal como hace la Química (Treagust, Chittleborough y Mamiala, 2003).

Frente a la abundancia de estudios sobre las relaciones entre los niveles macroscópico y submicroscópico, el vértice correspondiente a la química simbólica ha sido mucho menos estudiado. Hay algunos estudios sobre su relación con el nivel macroscópico (Treagust, Chittleborough y Mamiala, 2003) y el nivel submicroscópico (Wu, Krajcik y Soloway, 2001), pero no se han explorado las relaciones que existen entre los diferentes sistemas de notación dentro del mismo nivel simbólico. En esta investigación, nos centraremos en los problemas que se derivan de la utilización de diferentes sistemas notacionales propios de los sistemas simbólicos de la química.

De hecho, para lograr el aprendizaje de la química se requiere no sólo dominar cada nivel representacional, sino también interconectarlos y moverse entre ellos estratégicamente. Sin embargo, aprender a dominar cada uno de estos niveles representacionales, usando a su vez los diferentes sistemas propios de ese nivel, lo que implica traducir o convertir las representaciones de un sistema a otro, plantea dificultades específicas y sobre todo crecientes a medida que los sistemas de representación en que se basan se vuelven más complejos y abstractos. Esto es especialmente necesario en el nivel de representación simbólico en la química orgánica, que es en el que centraremos nuestro estudio (ver también Pozo y Lorenzo, 2009).

Las representaciones de la estructura tridimensional de las moléculas: las estereofórmulas en química orgánica

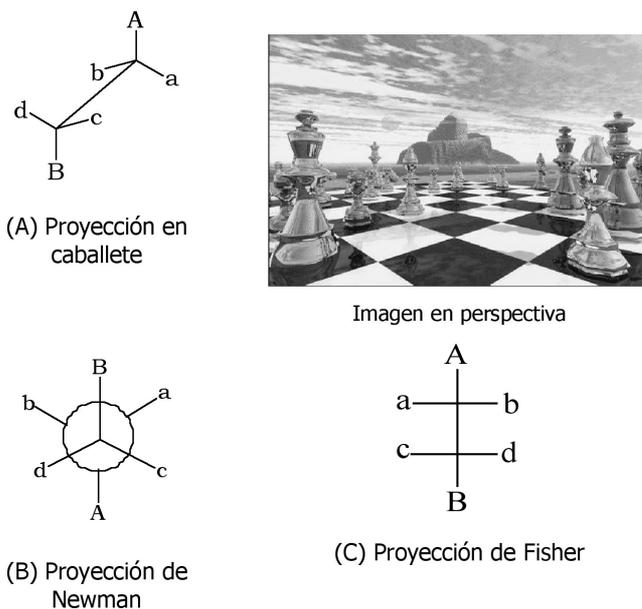
A finales del siglo XX, el lenguaje químico se convirtió en un tema central de discusión debido a que una gran parte del trabajo de los químicos consiste en estudiar las reacciones sobre un papel. De hecho, aunque este nivel simbólico se haya desarrollado de manera importante en las últimas décadas en la propia evolución de los lenguajes químicos, y aún más con el impulso reciente de los medios audiovisuales e informáticos, no se ha avanzado de la misma manera en la comprensión de los procesos necesarios para su aprendizaje. Una parte importante del lenguaje químico son las *fórmulas químicas*. Muchas de ellas son grafemas que derivan de la combinación de letras, números y líneas respetando ciertas reglas, por ejemplo H₂O para representar al agua. Como tales, reúnen todas las propiedades de los sistemas externos de representación (ver Martí, 2003; Martí y Pozo, 2000; también el artículo introductorio de este número de Pérez-Echeverría, Martí y Pozo, 2010). Así, pueden ser manipuladas como objetos *perceptibles*, y a la vez, actuar como objetos *representativos*, ya que dirigen nuestra atención hacia una realidad distinta. Del reconocimiento de ambas propiedades y de la capacidad de intercambiar intencionalmente el foco de la atención dependerá la habilidad de los sujetos para operar con las fórmulas químicas. Además, toda fórmula –siguiendo la terminología de Postigo y Pozo (2000, 2004)– contiene información explícita, a la cual se puede acceder por simple observación, y una información implícita, que se deriva de la interpretación de los rasgos presentes en la notación gráfica a través de la activación de los conocimientos adquiridos sobre la *gramática* de ese sistema notacional.

Pero no todas las fórmulas químicas son iguales. Según el interés del químico por mostrar diferentes aspectos de la estructura de una sustancia, dispone de diferentes sistemas simbólicos de notación para representarla. Uno de los casos más característicos de esta pluralidad de sistemas es el uso de las *estereofórmulas* en química orgánica. Este tipo de representaciones intentan mostrar, mediante una representación bidimensional, la estructura tridimensional de las moléculas

orgánicas, de la que se derivan ciertas propiedades específicas de las sustancias a nivel biológico o farmacológico. Por ello, la capacidad de imaginar o *imaginariiedad* (imaginary) desempeña un rol fundamental en química y especialmente en química orgánica por la diversidad de las representaciones posibles.

Dado que existen diferentes fórmulas para representar una misma sustancia, los químicos (y los alumnos cuando estudian química) necesitan conocer los procesos para traducir o convertir una notación en otra. Teniendo esto en mente, seleccionamos para este trabajo tres estereofórmulas de uso habitual en los libros de texto universitarios de química orgánica². Estas son las proyecciones en *caballete* (A), la de *Newman* (B) y la de *Fisher* o *en cruz* (C). Como intentamos mostrar en la figura 2, la proyección en caballete es la única de los tres tipos de notación que conserva indicios espaciales al mantener una perspectiva caballera o lateral, mientras que en B y en C predominan los rasgos convencionales (simbólicos) de la representación. En cuanto al uso que suele darse a cada una de ellas, las proyecciones A y B, se emplean para mostrar las relaciones entre los *átomos de una misma molécula*, mientras que la proyección C, si bien no descarta lo anterior, posibilita la comparación entre *distintas moléculas*.

FIGURA 2
Algunas estereofórmulas



Si asumimos que una comprensión y dominio de estos sistemas implica la capacidad de traducir de unos códigos a otros (ver artículo introductorio de Pérez-Echeverría *et al.*, 2010) en este caso los alumnos deberían ser capaces de decidir si dos estereofórmulas dibujadas de manera diferente representan o no la misma sustancia química y, en su caso, cuál es la diferencia entre ellas. Para poder realizar estas conversiones o traducciones los alumnos deben ser capaces de “mover” la representación, operar sobre ella para, o bien manteniendo el sistema notacional, escribirla de otra manera; o, traducirla a otro sistema para poder hacer la comparación. Como veremos más adelante en el estudio empírico, que se basa en este tipo de tareas, las operaciones mentales que deben realizar sobre las representaciones pueden ser:

- *Rotación externa*: La comparación requería mover la estructura completa (adelante-atrás o arriba-abajo).
- *Rotación interna*: En este caso implica el movimiento de los átomos de una misma estructura respetando ciertas convenciones.
- *Reflexión*: Esto implica considerar si corresponden a imágenes reflejadas iguales o distintas sobre un espejo.

Dificultades de aprendizaje de los lenguajes químicos como sistemas externos de representación: de la representación macroscópica en tres dimensiones a la representación simbólica bidimensional

Otra forma ampliamente utilizada por los químicos para la representación tridimensional de la estructura de las moléculas son los modelos moleculares como por ejemplo los de bolas y palillos, donde cada bola representa un átomo y los palillos, las uniones entre ellos. Estos modelos tridimensionales sirven de inspiración para que “una vez aplastados” imaginariamente sobre un papel, se conviertan en estereofórmulas. Es habitual que una vez en el mundo bidimensional, a muchos estudiantes les cueste hacer comparaciones entre dos estructuras, iguales o distintas, bajo un mismo sistema de representación, y más aún, cuando se utilizan sistemas representacionales distintos (Gilbert, 2005; Pozo y Lorenzo, 2009; Tuckey, Selvaratnam y Bradley, 1991). Este procedimiento de comparación requiere o bien ser capaz de visualizar mentalmente la estructura o dominar los algoritmos para traducir de un sistema a otro y recién entonces, elaborar una conclusión apropiada. La dificultad para el reconocimiento de las relaciones espaciales entre dos estructuras dependería por un lado, de las características complejas de los procesos necesarios para rotarlas o reflejarlas y que requieren, tanto a nivel mental como sobre el papel, el dominio de las reglas (arbitrarias) que rigen los movimientos permitidos. Por otro lado, estarán siempre presentes las restricciones impuestas por el dominio de los contenidos que aportan el sustento semántico a la manipulación de las representaciones químicas.

Dado el tipo de manipulaciones que hay que realizar con estas estereofórmulas, muchos trabajos destacan la incidencia de las habilidades espaciales de los individuos en tareas de aprendizaje en química (Bowen, 1990, Pribyl y Bodner, 1987, Wu *et al.*, 2001). Para alcanzar la comprensión de las fórmulas químicas se requiere la posibilidad de manipularlas y de operar con y sobre ellas, y esto se relaciona con la habilidad de crear una imagen mental, con el procesamiento de un código de imágenes. Esta habilidad espacial jugaría un rol fundamental para el reconocimiento estereofórmulas, lo que indicaría una correlación entre la percepción espacial y el éxito logrado en química (Barke, 1993; Carter, La Russa y Bodner, 1987; Coleman y Gotch, 1998).

Además de la comprensión de cada tipo particular de estereofórmulas se requiere utilizarlas en variados contextos, donde muchas veces resulta necesario cambiar o traducir de un sistema de representación a un modo distinto. El cambio entre estas diferentes formas de representación es una tarea de procesamiento de información que requiere de la comprensión del concepto subyacente para poder interpretar la información contenida en la representación inicial e inferir los detalles requeridos para construir la representación a la que se quiere llegar (Keig y Rubba, 1993). La decisión sobre cuál es el sistema de representación adecuado en cada caso implica un conocimiento estratégico o metacognitivo que regule el proceso de traducción de un sistema a otro, fundamentalmente en la etapa de planificación (Martí, 1999; Mateos, 1999).

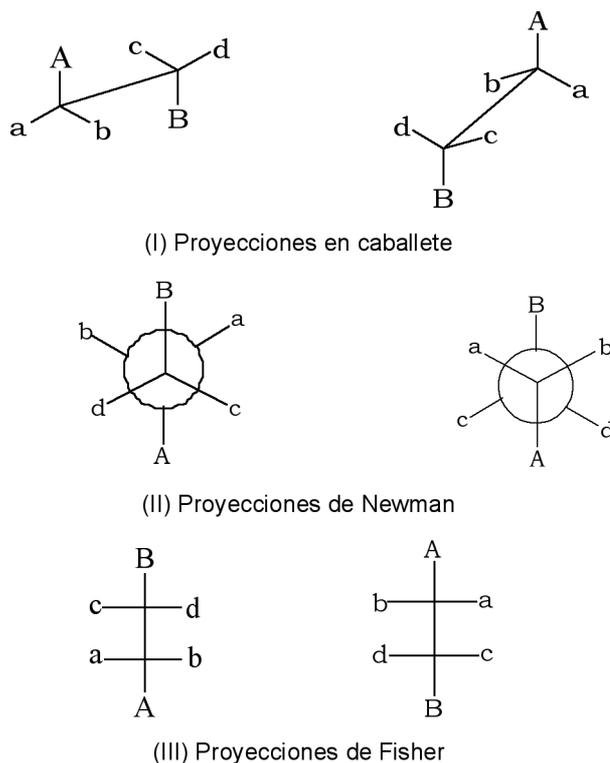
Por tanto, la comparación entre dos estereofórmulas supone al menos un conjunto de operaciones (Kozma y Russell, 2005) que podrían asimilarse a diferentes niveles de procesamiento cognitivo:

a) Reconocimiento de la notación (estereofórmula) como representación de la estructura 3D de la molécula (simbólico-submicro) a través de un modelo mental.

b) Estrategias para operar con la notación dada (simbólico). Es decir, descifrar los códigos de modo que permita la modificación de la notación (dibujarlo de otra manera dentro del mismo sistema de códigos, *intracódigo*) o traducirlo o convertirlo a otro sistema (*intercódigo*), siempre cuidando o respetando la estructura molecular tridimensional a la que hace referencia, reconociendo que ciertos cambios en la notación conllevan cambios en la estructura.

La figura 3 muestra (en sentido horizontal) pares de estructuras idénticas en cada una de las estereofórmulas utilizadas en esta investigación. Una tarea intercódigo consistiría en comparar en sentido vertical las estructuras presentadas, una proyección en caballete con una Newman, por ejemplo.

FIGURA 3
Distintos tipos de estereofórmulas que representan estructuras idénticas (tomadas de a pares)



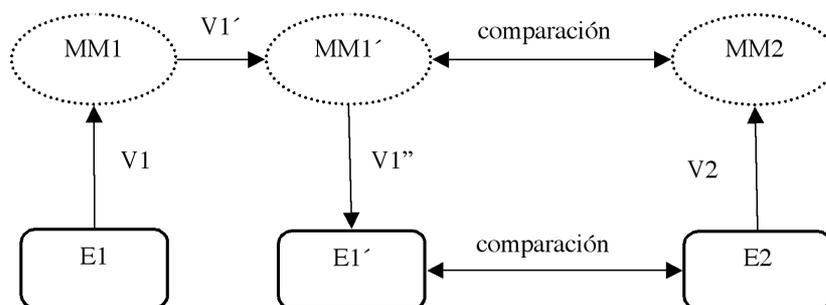
En la figura 4 intentamos representar el proceso de visualización (V) requerido para realizar la comparación entre dos estructuras químicas diferentes (E_1 y E_2). En un primer paso, a través de procesos de visualización (V_1) se construiría un primer modelo mental (MM_1) y un MM_2 a partir de E_2 (V_2). Luego, un segundo proceso de visualización (V_1') diferente del anterior, permitiría la transforma-

ción del primer MM_1 , en un segundo modelo mental en el que se modifican alguno o algunos de los aspectos originales de acuerdo con los objetivos buscados. Este modelo visualizado mentalmente (MM_1') puede externalizarse y representarse gráficamente (E_1'). Finalmente, puede realizarse la comparación simultáneamente en ambos planos, interno y externo, para decidir cuál es la relación que guardan entre sí E_1 y E_2 .

c) Conocimiento conceptual que permita realizar la comparación entre las estructuras resultantes y otorgarle un *significado* químico reconociendo la relación espacial que correspondiere.

d) Un conocimiento del sistema representacional que otorgue *sentido* al establecimiento de la relación y valide el resultado alcanzado, es decir que explique desde los fundamentos metodológicos de la química, que la conclusión a la que se llegó sea válida desde el punto de vista disciplinar, lo que en términos de un sistema notacional requeriría dominar las reglas de transformación, la sintaxis, los pasos que hay que dar para operar con él.

FIGURA 4
Proceso de comparación entre dos estructuras



Parece lógico suponer que la comparación entre dos notaciones presentadas en diferente código debería ser un proceso más complejo ya que requiere un mayor número de pasos. A los mencionados en la figura 4 habría que agregar los procesos de traducción de la información. En este sentido ¿pueden reconocerse diferencias en cuanto al procesamiento de distintos tipos de estereofórmulas? ¿Cuál es el efecto del tipo de procedimiento requerido para realizar la comparación? Por último, ¿resulta suficiente el conocimiento algorítmico para operar con las representaciones (estereofórmulas) o se requiere del conocimiento conceptual y representacional para alcanzar el éxito en la tarea de comparación? La respuesta a estas preguntas será el objetivo de los experimentos que se describen a continuación.

Experimento I: La comparación de representaciones para el reconocimiento de las relaciones espaciales

El objetivo de este primer experimento fue evaluar cómo los estudiantes de química enfrentaban el problema de la multiplicidad de notaciones en tareas que requerían la comparación de diferentes representaciones para el establecimiento de relaciones espaciales entre dos estructuras químicas.

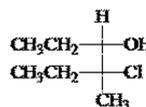
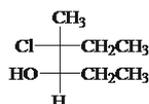
Participantes. La muestra quedó conformada por 124 estudiantes argentinos del primer curso de química orgánica divididos en 6 subgrupos según el tipo de cuestionario aplicado como se muestra en la tabla I.

TABLA I
Conformación de los grupos del experimento I

Tipo de tarea	Subgrupo	Fórmula	N	Total
Intracódigo	1	Caballete-Caballete	22	67
	2	Newman-Newman	23	
	3	Fisher-Fisher	22	
Intercódigo	4	Caballete-Newman	18	57
	5	Fisher-Newman	19	
	6	Caballete-Fisher	20	

Tareas. Diseñamos un cuestionario escrito de selección de respuesta en el que debían compararse 18 pares de estereofórmulas distintas para determinar la relación espacial entre ellas (Figura 5). Cada par de estructuras podía presentarse bajo el mismo formato notacional (cuestionario *intracódigo*) o distinto (cuestionario *intercódigo*). A su vez, se presentaba en tres combinaciones diferentes, uno por cada tipo de estereofórmulas utilizadas, estableciendo por lo tanto seis subgrupos (Tabla I).

FIGURA 5
Esquema general del cuestionario intracódigo (Fisher-Fisher)



A	B
A y B son:	
Estructuras idénticas	
Distintos compuestos	
Estereoisómeros	
Isómeros configuracionales	
Isómeros conformacionales	
Enantiómeros	
Diastereómeros	
Isómeros geométricos	
Otros. Especifica: _____	

Procedimiento. El test fue administrado hacia finales del curso, así todos los participantes habían pasado las clases correspondientes a estos tópicos. Se aplicó a dos grupos de clase completos, en presencia del docente de cada grupo, en sesiones independientes, sin límite de tiempo, con una duración de alrededor de 45 minutos. El orden de administración y de la asignación en los tres subgrupos de cada cuestionario fue aleatorio en todos los casos. Los cuestionarios fueron corregidos como correcto/incorrecto siguiendo los criterios propios de la asignatura.

Diseño y análisis de datos. Se realizó un diseño experimental intrasujeto para la variable independiente *relación espacial* con tres niveles (estructuras idénticas, isómeros conformacionales, enantiómeros). Simultáneamente se consideró la varia-



ble independiente intersujeto, *tipo de código* con dos niveles (intracódigo e intercódigo), que subsumía a la VI tipo de *estereofórmula* con seis niveles según los pares de fórmulas utilizados tal como se indicó en la tabla 1. Inicialmente se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para la media transformada (arcoseno) de respuestas correctas basado en un diseño factorial 2x3, entre grupos para la variable tipo de código e intrasujeto, para la variable relación espacial. Posteriormente, se aplicó una prueba T para muestras relacionadas. Para evaluar la influencia de la VI tipo de estereofórmula se aplicó un ANOVA 6x3, y una prueba post hoc de Tuckey. Finalmente para las respuestas incorrectas se estudiaron las opciones alternativas seleccionadas por los estudiantes para cada relación a través de un análisis de frecuencias.

Resultados y discusión

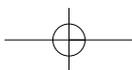
De las tres relaciones espaciales consideradas, la isomería conformacional fue la que mostró el menor porcentaje de respuestas correctas (14.25%) mientras que para las estructuras idénticas y los enantiómeros fueron de 71.24% y 80.24% respectivamente.

En la figura 6 se muestra el procedimiento utilizado por un estudiante para decidir la relación. La estrategia consistió en traducir entre un tipo de estereofórmula a otra, hasta llegar a aquella que le permitiera decidir la relación espacial. Las marcas realizadas sobre la lista de opciones del ítem 1, dan idea de la complejidad del camino en la toma de decisión.

Para las relaciones de igualdad y enantiomería se obtuvo un porcentaje ligeramente mayor de respuestas correctas en la tarea intracódigo (8.21% y 7.26%), mientras que para los isómeros conformacionales la relación se invierte con un aumento del 9.35% de respuestas correctas para la tarea intercódigo. Los resultados del ANOVA indicaron que la VI intrasujeto *relación espacial* resultó estadísticamente significativa [$F_{(2, 244)} = 148.598, p < 0.0001$], y que además interactúa significativamente con el tipo de código empleado en la tarea [$F_{(2, 244)} = 3.052, p < 0.05$].

Para analizar las diferencias entre los distintos tipos de relación se aplicó una prueba T para muestras relacionadas. Estos indicaron que la media de respuestas correctas para cada tipo de relación son significativamente distintas unas de otras (Iguales- Isómeros Conformacionales $t_{(123)} = 12.791, p < 0.0001$; Iguales- Enantiómeros $t_{(123)} = -3.055, p < 0.003$; Isómeros Conformacionales-Enantiómeros $t_{(123)} = -16.282, p < 0.0001$), en el siguiente orden: ENANTIÓMEROS > IGUALES >> ISÓMEROS CONFORMACIONALES. Esta mayor dificultad para los isómeros conformacionales no puede ser atribuida a una falta de dominio de las representaciones, ya que en otras relaciones respondieron correctamente, por lo que estarían influyendo limitaciones conceptuales que dificultarían la realización de la tarea, es decir, que los estudiantes confunden el plano simbólico de representación con el nivel submicroscópico de la realidad química, por lo que lo que identifican cada tipo particular de estereofórmula utilizada con una sustancia concreta.

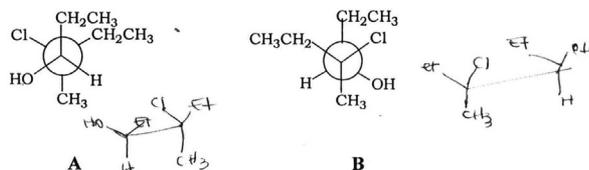
Con respecto a la interacción entre relación y tipo de estereofórmula, los enantiómeros se reconocieron significativamente mejor en el par FF (93.18%; $\chi^2 = 43.180, p < 0.05, gl = 30$), lo que no debería sorprendernos dado que este tipo de estereofórmulas fue pensado precisamente para poder visualizar estructuras que corresponden a imágenes reflejadas en un espejo (enantiómeros). Sin embargo, si bien hubiéramos esperado que los caballetes fueran las estereofórmulas con menores dificultades, esto no fue así. Nuevamente el problema aparece con los isómeros conformacionales donde los estudiantes cometieron el mayor número de errores (6.82%) en el par CC. Tal vez, dada la mayor facilidad para "mover"



este tipo de representaciones, precisamente por su perspectiva caballera, haya llevado a los alumnos a concluir relaciones incorrectas entre las dos figuras que se le presentaban ante sí. Esto además, volvió a observarse en el sentido contrario. Es decir, en las tareas intercódigo, cuando en cambio, la estrategia para la comparación fue en todos los casos la homogenización del código como primer paso en la resolución de la tarea. Este cambio en el tipo de representación utilizado parece facilitar la detección de los rasgos conformacionales de las estructuras, lo que les permitió a los alumnos en algunos casos descartar la opción "igualdad".

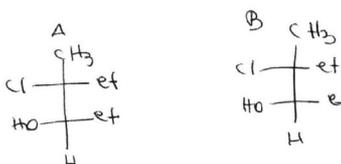
FIGURA 6
Ejemplo de resolución de cuestionario intracódigo

1)

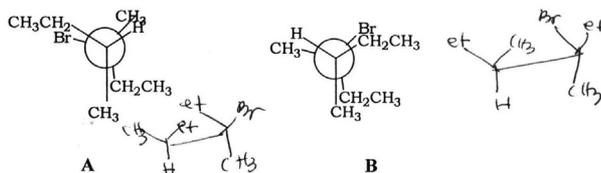


A y B son:

- a) Estructuras idénticas ~~X~~
 b) Distintos compuestos
 c) Estereoisómeros
 d) Isómeros configuracionales ~~X~~
 e) Isómeros conformacionales ~~X~~
 f) Enantiómeros
 g) Diasterómeros
 h) Isómeros geométricos
 i) Otros. Especifica: _____

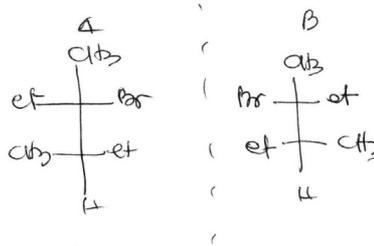


2)



A y B son:

- a) Estructuras idénticas
 b) Distintos compuestos
 c) Estereoisómeros
 d) Isómeros configuracionales
 e) Isómeros conformacionales
 f) Enantiómeros ~~X~~
 g) Diasterómeros
 h) Isómeros geométricos
 i) Otros. Especifica: _____



Para los errores se aplicó un *análisis de frecuencias* para indagar las relaciones alternativas elegidas, y el grado de consistencia de los participantes. Se consideró como "sujeto consistente" aquel que fuera capaz de responder correctamente al menos 4/6 ítem de la relación. Para ello, se contabilizaron los estudiantes que cometieron algún tipo de error en tres o más respuestas por relación, siendo la gran mayoría altamente consistentes en sus alternativas de respuesta para la relación isomería conformacional.

La representación gráfica de la estructura espacial de las moléculas / M.-G. Lorenzo y J.-I. Pozo

TABLA II
Recuento para el análisis de frecuencias para sujetos no consistentes

Relación	Cantidad de participantes	Porcentaje
Rotación externa	32	25.8%
Rotación interna	110	88.7%
Reflexión	21	16.9%

- *Rotación externa (Relación de igualdad)*: Las opciones erróneas elegidas mayoritariamente para la relación de igualdad fueron enantiómeros (28.15%) y diastereómeros (25.12%). Esto podría explicarse por un problema en la manipulación de estructuras gráficas donde al no lograr establecer la 'superponibilidad' de las estructuras involucradas, se descartó la relación de igualdad.
- *Rotación interna (Relación de isomería conformacional)*: El 70.21% de los estudiantes marcaron la opción 'igualdad', confundiendo la identidad de la sustancia con las estructuras representadas sobre el papel. El mayor número de errores se obtuvo en la tarea intracódigo, donde se evidenciaron problemas conceptuales de los alumnos al desatender que un cambio en la distribución de los átomos sobre el papel implica necesariamente una determinada conformación, que fueron en parte analizados en la tarea intercódigo.
- *Reflexión (Relación de enantiomería)*: Las alternativas mayoritarias recayeron en diastereómeros (37.04%), iguales (18.52%) y estereoisómeros (18.52%). Los dos primeros casos corresponden a respuestas erróneas, mientras que el tercero indica un nivel menor de precisión en la respuesta.

Los resultados mostraron que la comparación de estructuras presenta diferentes niveles de complejidad según el tipo de relación considerada siendo especialmente difícil para el caso de la rotación interna (85% de respuestas incorrectas). En general, la mayor dificultad se asocia con aquellos casos donde la aplicación de algoritmos y reglas resultan insuficientes para establecer la relación. Además surgieron algunos indicios importantes respecto a la influencia de los diferentes tipos de notación utilizados. Los estudiantes se comportaron de manera estratégica al comparar dos estructuras traduciéndolas a un mismo formato para luego realizar las comparaciones. La notación preferida (F) es la que mayor grado de abstracción presenta y por tanto, las operaciones que pueden efectuarse sobre ellas responden a un tipo de conocimiento "mecánico" por lo que resulta ineficaz para elaborar conclusiones que requieran contenidos de significado

Sin embargo, llama la atención que en una gran mayoría de los casos, los estudiantes prefieren F sobre C o N. Queda aún por establecer cuáles son las razones de dicha preferencia. Una posibilidad sería que la enseñanza le atribuyera esa importancia, pero no parece ser así, ya que los tres tipos de estereofórmulas se utilizan de manera semejante durante las clases así como en los libros de texto (véase nota 2) y que en todos los casos se destaca la conveniencia de C y de N para los análisis de tipo conformacionales y la F para el caso del análisis configuracional, así como los cuidados para cambiar de un tipo de estereofórmula a otra. Por tanto, habría que pensar más bien en que, a pesar del tratamiento didáctico que recibe, similar al de los otros sistemas de notación, el sistema F proporciona algunas ventajas cognitivas a los estudiantes, que aun no han sido investigadas. Aunque el tema está abierto a nuevas investigaciones, entre las hipótesis que podrían manejarse estaría la potencia representacional del sistema F, dado su alto grado de abstracción y convencionalismo, que llevaría a los estudiantes a considerarla como generalizable o aplicable a un mayor número de situaciones, aun-

que resulte químicamente inadecuado en muchos de los casos. Pero alternativamente podría pensarse que el uso de ese sistema posee una mayor transparencia o simplicidad representacional, reduciendo el coste cognitivo de su procesamiento. En todo caso, aunque se necesiten nuevos estudios para profundizar en esta preferencia representacional, parece claro que los estudiantes tienden a utilizar el sistema F como una especie de “lengua materna” o al menos “lengua franca” a la que traducen los diferentes sistemas que se les presentan, algo en lo que paradójicamente no son instruidos cuando se les enseña a dominar esos sistemas.

Para indagar si el mencionado marco teórico conceptual, al que denominaremos de aquí en adelante, conocimiento químico, incide en el procesamiento de las estereofórmulas como información gráfica, y si lo hace, de qué manera, diseñamos un experimento para comparar estudiantes con diferente conocimiento químico que presentamos a continuación.

Experimento II. Obstáculos epistemológicos y conceptuales en el aprendizaje de la química orgánica

Este experimento intentó indagar qué parte de las respuestas de los estudiantes correspondía a su habilidad para operar con la representación gráfica y cuál a su conocimiento químico. Para ello, planteamos un estudio comparativo entre dos poblaciones de estudiantes universitarios, que diferían fundamentalmente en el grado de instrucción química recibido: estudiantes de las carreras de Farmacia y Bioquímica, con conocimiento especializado y estudiantes de Psicología que actuaron como grupo control.

Participantes. Participaron 52 estudiantes argentinos, de la Facultad de Farmacia y Bioquímica (FB); y 27 estudiantes españoles, de la asignatura Estrategias de aprendizaje, de la Facultad de Psicología (Ps). Los participantes fueron agrupados según el tipo de instrucción recibida (FB y Ps) y según el contenido de la tarea (con y sin contenido químico), como se indica en la tabla III.

TABLA III
Conformación de los grupos del experimento II

GRUPO	TAREA	N
Farmacia y Bioquímica 1 (FB1)	Con contenido químico	22
Psicología (Ps)	Sin contenido químico	27
Farmacia y Bioquímica 2 (FB2)	Sin contenido químico	28

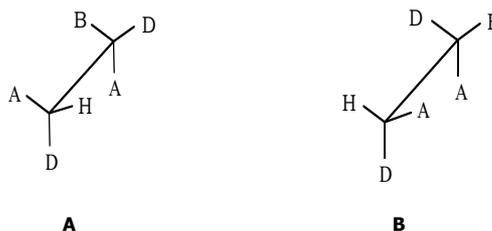
Tarea. Se adaptó el cuestionario intracódigo (CC) del experimento 1 eliminando toda referencia que pudiera ser interpretada como una tarea de química utilizando letras del abecedario y se redujeron a 5 las opciones de respuestas (Figura 7). Se seleccionó este sistema notacional porque es el que incluye ciertas claves pictóricas de profundidad por lo que no se requerían convenciones especiales para su interpretación.

Procedimiento. Se procedió de manera idéntica al primer experimento. Los estudiantes FB demoraron alrededor de 45 minutos, mientras que los Ps respondieron el cuestionario en alrededor de veinte minutos.

Diseño y análisis de datos. Se realizó un diseño experimental intrasujeto para la variable independiente *relación espacial*, con tres niveles (igualdad, isómeros conformacionales y enantiomería) y la variable *grupo*, con tres niveles (FB1, FB2 y Ps). Específicamente se consideraron: VI intersujeto, *tipo de cuestionario*, con dos niveles (*con y sin contenido químico*), aplicada entre los grupos FB1 y FB2. Y VI intersujeto, *tipo de instrucción*, con dos niveles (*FB y Ps*). Primeramente, se aplicó



FIGURA 7
Ejemplo de la tarea modificada



- a) La figura A es la misma que la figura B vista desde otra perspectiva.
 b) La figura A y la figura B son distintas.
 c) La figura A puede convertirse en la figura B mediante una rotación en torno al eje z (delante-atrás).
 d) La figura A es la imagen especular (reflejada en un espejo) de la figura B
 e) Otros. Especifica: _____

un ANOVA para la media de respuestas correctas basado en un diseño factorial 3x3 entre grupos para la variable *relación espacial* e intersujetos para la VI *grupos*. Posteriormente, se aplicó una prueba *T* de muestras relacionadas para analizar las diferencias entre los distintos tipos de relación, mientras que para evaluar la diferencia entre grupos se aplicó una prueba post hoc DHS de Tuckey.

Resultados y discusión

El ANOVA para la media de respuestas correctas con un diseño factorial 3x3, resultó significativo para ambas variables independientes y su interacción [*relación*, $F_{(2, 148)} = 43.581$, $p < 0.0001$; *grupo*, $F_{(2, 74)} = 7.645$, $p < 0.001$]. Los resultados se muestran en el gráfico de la figura 8. En primer lugar cabría preguntarse por qué los estudiantes de psicología demoraron menos de la mitad del tiempo que sus pares de FB en responder al cuestionario. Una causa probable sería que para ellos la tarea consistía simplemente en comparar “dibujos” (o representaciones espaciales) sin ningún significado particular. En cambio, para los estudiantes FB, independientemente de la forma de presentarlos, esos “dibujos” no eran representaciones aisladas, sino que formaban parte de un sistema representacional: correspondían a estereofórmulas y por tanto, requerían otro tipo de procesamiento, que implicaba convertirlos o traducirlos, mediante ciertas reglas sintácticas de transformación, a otro sistema notacional antes de decidirse por la relación. Al realizar la traducción, convirtieron los caballetes en proyecciones de Fischer, especialmente creada para el reconocimiento de los enantiómeros, lo que les facilitó el reconocimiento de esta relación sobre las otras. Nuevamente, como en el estudio 1, los estudiantes FB optaron por homogeneizar el código utilizando F, opción que obviamente no podía ser considerada por los estudiantes de psicología. Dadas las características propias de F, su utilización favoreció el reconocimiento de cierta relación (enantiomería, reflexión) sobre las otras.

La proporción de respuestas correctas de los estudiantes Ps varió entre 0.33 y 0.42. De aquí podemos extraer que la manipulación de este tipo de representaciones gráficas no es una tarea sencilla aún para personas con instrucción universitaria. Es más, en cuanto a las relaciones o movimientos necesarios para hacer la comparación observamos que en este caso reconocer dos notaciones como imágenes especulares fue lo que peor resultados arrojó. Sin embargo, el grupo FB (1 y

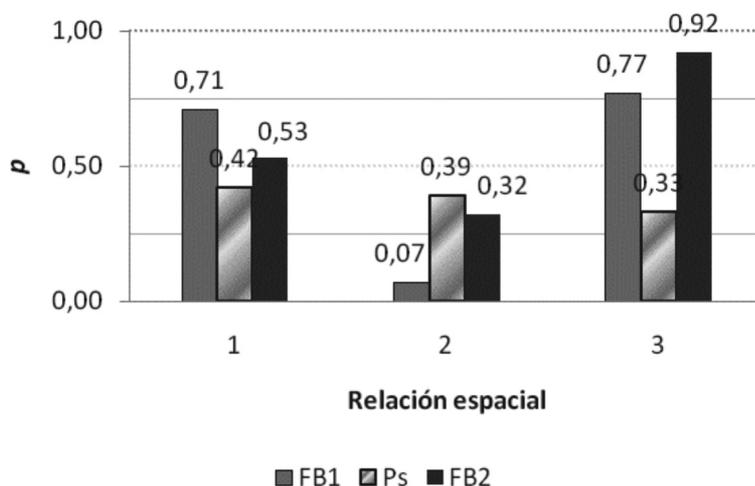


2) pudo responder con mucho mejor rendimiento a las relaciones de igualdad (rotación externa) y enantiomería (reflexión) ($p < 0.05$). Es decir que la instrucción recibida en clases de química favoreció la resolución de la tarea, al menos en estos dos casos. En el caso de la relación conformacional, al igual que en el Experimento I, volvió a aparecer el problema de la confusión entre los niveles submicroscópico y simbólico, no logrando diferenciar la representación (estereofórmula) de la estructura molecular en sí.

En este caso, el bajo nivel de respuestas correctas para el caso de los isómeros conformacionales resultó significativamente distinto ($t_{(76)}, p < 0.0001$) que para el reconocimiento de las otras dos relaciones estudiadas. Dado el resultado obtenido por los Ps, no puede pensarse que los datos de los grupos FB se deban a problemas con la manipulación de las representaciones para el caso de la rotación interna. Más bien, en este caso, se explicaría por dificultades conceptuales del conocimiento químico, como se observa en el grupo FB1 con notaciones con contenido químico significativamente distinto que los Ps ($p < 0.05$). La presentación de la representación en formato general (sin contenido químico) mejora las respuestas de FB2 corroborando estas ideas.

En otro lado hemos visto que para los estudiantes de FB cada detalle de la notación representa un elemento a ser computado en su memoria de trabajo (Lorenzo, 2001). Así, la simplificación estructural reemplazando grupos de letras y números (que representan ciertas agrupaciones químicas como por ejemplo el resto etilo $-\text{CH}_2\text{CH}_3$ que puede encontrarse en los ejemplos de la Figura 6) por una única letra (digamos A) disminuye el número de unidades de información lo que facilitaría la resolución de la tarea.

FIGURA 8
Proporción de respuestas correctas en el experimento # 2 (1: Igualdad, 2: Isómeros conformacionales, 3: Enantiómeros)



Conclusiones

Tal como hemos visto, a partir de los dos estudios anteriores, los estudiantes de química no sólo adquieren conocimiento sobre los lenguajes y sistemas usados para representar la materia, sino que también aprenden a manipular y transformar esas diferentes representaciones, si bien, como hemos visto con algunas dificultades características. En general, podemos afirmar que adquieren los sistemas notacionales de la química, en el sentido preciso de que su uso les lleva a realizar inferencias, incluso cuando se les plantea una tarea isomorfa (estudio 2), a la

que los estudiantes de química, a diferencia de los de psicología, realizan de modo *sistemático* transformaciones similares a las que hacen con los lenguajes químicos. Los alumnos de química procesan esas tareas como parte de un sistema de representación química, tengan contenido químico o no. Eso en algunas tareas les favorece y en otras no, dependiendo de su grado de conocimiento químico. Por su parte, los alumnos de psicología reflejan la complejidad puramente espacial sin la influencia del sistema de representación simbólica por medio.

Esta investigación proporciona también algunas sugerencias relevantes para la enseñanza de la química sobre el aprendizaje y uso de esos sistemas simbólicos. En primer lugar, los estudiantes de química se han familiarizado con el uso de representaciones tridimensionales y saben traducir de un sistema notacional a otro, a diferencia de lo que menciona la bibliografía con respecto a las dificultades de manipulación de las representaciones químicas (Bucat, 2004; Keig y Rubba, 1993). La instrucción logra entrenar a los estudiantes en las habilidades para operar con las representaciones. Sin embargo, aunque son eficaces en los procesos de traducción, no lo son en cuanto a su uso estratégico dependiente del marco teórico-conceptual. Sus dificultades se relacionan más con las condiciones en las que deben utilizar unos sistemas u otros que con el propio procedimiento de conversión, que desde un punto de vista “técnico” parecen dominar. Particularmente en el caso que analizamos –la comparación entre al menos dos estructuras tridimensionales como las estereofórmulas– la tarea resulta compleja ya que requiere de ciertas competencias específicas por parte de los estudiantes. Los alumnos con instrucción específica en química pueden operar con éxito en los primeros niveles de información gráfica que implican dominar el lenguaje y sus reglas de transformación. Sin embargo, se detectan fallas en los niveles más profundos de procesamiento, lo que podríamos llamar uso estratégico y el dominio conceptual de los sistemas de representación, que da cuenta de la validez de las representaciones y de los contextos de su utilización. Los resultados muestran que las respuestas incorrectas se relacionan con una falta de comprensión del conocimiento químico más que con un problema en la manipulación de las estructuras representacionales. En términos de la distinción establecida por Postigo y Pozo (2000, 2004) las deficiencias estarían en el procesamiento conceptual de la información química, más que en los niveles de conocimiento semántico (explícito) y o sintáctico (implícito). El conocimiento disciplinar establece condiciones sobre lo que es correcto y lo que no, aún en representaciones “sin química”, por lo que los estudiantes operan sobre ellas como si lo fueran.

Por último, otro dato relevante es la tendencia de los estudiantes a recurrir a cierta representación particular sobre las otras, en concreto el sistema Fisher. Este proceso de homogenización de las representaciones es un proceso estratégico que no siempre lleva a los resultados esperados. Por ello, el entrenamiento de los estudiantes en su conocimiento estratégico debería realizarse en forma paralela y simultánea con el aprendizaje de las representaciones y su utilización. Se necesitan nuevas investigaciones para comprobar en primer lugar el grado de generalización de esa preferencia y, en segundo lugar, las causas de la misma, que probablemente estén relacionadas con la mayor eficacia cognitiva de ese sistema. En todo caso, se trata de una preferencia que debería ser considerada en los propios procesos de instrucción química, en los que ahora pasa desatendida.

Notas

¹ Para un estudio más completo sobre la historia de la química consultar: Asimov, I. (1975). *Breve historia de la Química*. Madrid: Alianza. Ed. 1995; García Belmar, A. & Bertomeu Sánchez, J. (1998). Lenguaje, ciencia e historia: una introducción histórica a la terminología química. *Alambique. Didáctica de las ciencias experimentales*, 17, 20-36; entre otros.

² Bruice, P. (2008). *Química Orgánica*, 5ta edición, México: Perason; Carey, F. A. (2006). *Organic chemistry* (6ª ed.). Nueva York: Mc Graw Hill; Mc Murry, J. (2008). *Química Orgánica* (7ª ed.). México: Thomson Learning.

Referencias

- BARKE H. D. (1993). Chemical education and spatial ability. *Journal of Chemical Education*, 70, 968-971.
- BOWEN, C. W. (1990). Representational systems used by graduate students while problem solving in organic synthesis. *Journal of Research in Science Teaching*, 27, 351-370.
- BUCAT, R. (2004). Pedagogical Content Knowledge as a way forward: Apply research in Chemistry Education. *Chemistry Education: Research and Practice*, 5 (3), 215-228.
- CARTER, C. S., LA RUSSA, M. A. & BODNER, G. M. (1987). A study of two measures of spatial ability as predictors of success in different levels of general chemistry. *Journal of Research in Science Teaching*, 24, 645-657.
- COLEMAN, S. L. & GOTCH, A. J. (1998). Spatial perception skills of chemistry students. *Journal of Chemical Education*, 75, 206-209.
- GILBERT, J. (2005). Visualization: A metacognitive skill in science and science education. En J. Gilbert (Ed.), *Visualization in Science Education* (pp 9-27). Dordrecht: Springer.
- JOHNSTONE, A. (1982). Macro- and micro-chemistry. *School Science Review*, 64, 377-379.
- JOHNSTONE, A. (1993). The development of chemistry teaching. *Journal of Chemical Education*, 70, 701-705.
- JOHNSTONE, A. H. (2000). Teaching of chemistry- logical or psychological? *Chemistry education: Research and practice in Europe*, 1 (1), 9-15.
- KEIG, P. F. & RUBBA, P. A. (1993). 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*, 30 (8), 883-903.
- KOZMA, R. & RUSSELL, J. (2005). Students becoming chemists: Developing representational competence. En J. Gilbert (Ed.), *Visualization in Science Education* (pp. 121-146). Dordrecht: Springer.
- LORENZO, M. G. (2001). *Química orgánica: Su enseñanza y aprendizaje en la universidad*. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires.
- LORENZO, M. G. (2008). Destilación fraccionada de ideas condensadas. Una invitación al debate sobre la naturaleza de la química. *Educación en la Química*, 14 (1), 17-24.
- MARTÍ, E. (1999). "Esto no es un dibujo". Las primeras distinciones sobre sistemas notacionales. En J. I. Pozo & C. Monereo (Eds.), *El aprendizaje estratégico* (pp. 111-121). Madrid: Santillana.
- MARTÍ, E. (2003). *Representar el mundo externamente. La adquisición infantil de los sistemas externos de representación*. Madrid: Antonio Machado.
- MARTÍ, E. & POZO, J. I. (2000). Más allá de las representaciones mentales: la adquisición de los sistemas externos de representación. *Infancia y Aprendizaje*, 90, 11-30.
- MAYER, R. E. (1993). Comprehension of graphics in texts: an overview. *Learning and Instruction*, 3, 239-245.
- MATEOS, M. (1999). Metacognición en expertos y novatos. En J. I. Pozo & C. Monereo (Eds.), *El aprendizaje estratégico* (pp. 123-129). Madrid: Santillana.
- MORTIMER, E. (1998). Multivoicedness and univocality in classroom discourse: an example from theory of matter. *International Journal of Science Education*, 20 (1), 67-82.
- PÉREZ-ECHEVERRÍA, M. P., MARTÍ, E. & POZO, J.-I. (2010). Los sistemas externos de representación como herramientas de la mente. *Cultura y Educación*, 22 (2), 133-147.
- POSTIGO Y. & POZO, J. I. (2000). Cuando una gráfica vale más que 1000 datos: interpretación de gráficas por alumnos adolescentes. *Infancia y Aprendizaje*, 90, 89-110.
- POSTIGO, Y. & POZO, J. I. (2004). In the road to graphicacy: The learning of graphical representation systems. *Educational Psychology*, 24, 623-644.
- POZO, J. I. & GÓMEZ CRESPO, M. A. (2005). The embodied nature of implicit theories: The consistency of ideas about the nature of matter. *Cognition and Instruction*, 23, 351-387.
- POZO, J. I., GÓMEZ CRESPO, M. A. & SANZ, A. (1999). When conceptual change does not mean replacement: different representations for different contexts. En W. Schnotz, S. Vosniadou & M. Carretero (Eds.), *New perspectives on conceptual change* (pp. 161-174). Londres: Elsevier.
- POZO, J. I. & LORENZO, M. G. (2009). Representing organic molecules: the use of chemical languages by university students. En Ch. Andersen, N. Scheuer, P. Pérez Echeverría & E. Teubal (Eds.), *Representational systems and practices as learning tools in different fields of knowledge* (pp. 243-266). Rotherdam: Sense Publishers.
- PRIBYL, J. R. & BODNER, G. M. (1987). Spatial ability and its role in organic chemistry: A study of four organic courses. *Journal of Research in Science Teaching*, 24 (3), 229-240.
- STAVY, R. (1995). Conceptual development of basic ideas in Chemistry. En S. M. Glynn & R. Duit (Eds.), *Learning science in schools* (pp. 131-154). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- TREAGUST, D. F., CHITTLEBOROUGH, G. & MAMIALA, T. L. (2003). The role of submicroscopic and symbolic representations in chemical explanations. *International Journal of Science Education*, 25, 1353-1368.
- TUCKEY, H., SELVARATNAM, M. & BRADLEY, J. (1991). Identification and rectification of student difficulties concerning three-dimensional structures, rotation and reflection. *Journal of Chemical Education*, 68, 460-464.
- WU, H. K., KRAJCIK, J. S. & SOLOWAY, E. (2001). Promoting understanding of chemical representations: students' use of a visualization tool in the classroom. *Journal of Research in Science Teaching*, 38, 821-842.