



Plataforma interactiva para enseñanza de estequiometría y estructura de compuestos químicos, mediante el uso de impresión 3D

Interactive Platform for the understanding of chemical structures with 3D printing

Rodrigo Ramirez-Tagle¹, Edith Pinto² y Carla Angulo²

Recepción: 20/07/21. Aceptación: 19/04/22

Resumen

Las nuevas generaciones de la Era Digital tienen un lenguaje y manera de comunicarse interactivo y ágil. Es importante innovar en los métodos de enseñanza, y aprovechar las capacidades y habilidades que ellos poseen. El objetivo de este trabajo fue desarrollar una plataforma interactiva, implementada como sitio web, que pueda ser utilizada por estudiantes universitarios del área de la ingeniería y ciencias, para aprender la estequiometría de las reacciones, y comprender las estructuras de las moléculas químicas, mediante impresión 3D. La metodología consistió en dos trabajos principales: 1) el desarrollo de un software interactivo para formular reacciones químicas equilibradas, en formato para sitio web, y 2) el diseño en 3D de moléculas. Las moléculas fueron diseñadas de manera de ser autoexplicativas, utilizando como base moléculas diseñadas en el sitio web de libre uso MolView, y otras utilizando la Teoría de Repulsión de Pares de Electrones de Valencia (TREPEV). Se logró desarrollar una plataforma interactiva llamada "Química 3D", en la cual se podrán formular todas las reacciones posibles, el estudiante ingresará los reactantes y productos de la reacción, y mediante un algoritmo se generarán tres alternativas de coeficientes estequiométricos, con una alternativa correcta. El estudiante debe escoger la alternativa correcta, para tener acceso para visualizar las moléculas en imagen con diseño 3D, y además descargar el archivo para impresora 3D Makerbot, y de esta manera comprender su geometría espacial y estructura.

Palabras clave

Impresión 3D, estructura molecular, estequiometría, reacciones químicas.

Abstract

The new generations of the Digital Era have an interactive and agile language and way to communicate. On this regard, it is important to innovate in the teaching methods, and take advantage of the capacities that they possess. The aim of the present work was to develop an interactive platform, implemented as a website, which can be used by university students in engineering and science, to learn the stoichiometry of reactions, and understand the structures of chemical molecules, through 3D printing. The methodology consisted of two main objectives: 1) the development of interactive software to formulate balanced hypotheses, in the format for the website, and 2) the 3D design of molecules. The molecules were designed automatically, using as a base the molecules designed on the website of free use MolView, and others using the Valence shell electron pair repulsion (VSEPR) theory. An interactive platform called "3D Chemistry" has been developed, in which all possible reactions can be found, the student enters the reactants and the products of the reaction, and by means of an algorithm three stoichiometric coefficients can be obtained, with one correct alternative. The student must choose the correct alternative, to have access to visualize the molecules in an image with 3D design, and download the file for the MakerBot 3D printer, and in this way understand its spatial geometry and structure.

Keywords

3D printing, molecular structure, stoichiometry, chemical reactions

¹Universidad de Aconcagua, Chile.

²Universidad Bernardo O'Higgins, Santiago, Chile.

Introducción

Los desafíos de enseñar Química en la Era Digital

Los estudiantes de la llamada "Generación Digital", tienen destacadas habilidades tecnológicas que deben ser aprovechadas por los docentes universitarios, en todas sus especialidades (Margaryan, 2011; Schneider, 2011; Lotherington, 2011). En este sentido, existen varias universidades en el mundo, que tienen incorporado en el Currículo, actividades utilizando tecnología de impresión en tres dimensiones (3D) para diferentes asignaturas. Ejemplo de ello, es el desafío de crear modelos de compuestos químicos en impresoras 3D. Estas actividades interactivas y motivacionales permiten al alumno aprender la teoría de la química como también desarrollar habilidades muy apreciadas en el actual mercado laboral, como son la creatividad, trabajo en equipo, innovación y uso de tecnologías (Violante, 2014; Rossi, 2015; Higgins, 2011).

Por varias décadas se ha utilizado la representación en 3D de estructuras químicas para investigación y docencia (Harle, 2011). Existen herramientas comerciales que ofrecen un juego con esferas y enlaces de materiales poliméricos para poder conformar las estructuras químicas, ejemplo es la marca MolyMod. Sin embargo, estas herramientas comerciales tienen varias limitaciones, debido a que no es posible representar una gran variedad de moléculas y moléculas complejas, además de ser difícil su armado y su estructura inestable (Scalfani, 2014).

El desarrollo de la impresión 3D ha permitido sobrepasar estas limitaciones, debido a que esta tecnología se basa en la fabricación física de objetos 3D, diseñados en forma digital en software especializados, pudiendo conseguir diseñar modelos muy complejos (Da Veiga, 2017).

La tecnología de impresión 3D en el aula

La impresión 3D consiste en la adición secuencial de capas de material permitiendo una mayor exactitud en la fabricación del modelo y logrando fabricarla de forma continua (Da Veiga, 2017). El desarrollo de esta tecnología que ha ocurrido en los últimos años ha logrado bajar el costo tanto de las impresoras 3D como de los insumos, permitiendo el acceso a adquirir este tipo de tecnología tanto en colegios y universidades para ser utilizadas en docencia (Violantes, 2014; Da Veiga, 2017; Kostakis, 2014).

La impresión 3D fue desarrollada en la Universidad de Colorado en Estados Unidos por el investigador Charles Hull en los años 80's. Esta tecnología también es conocida como tecnología AM (additive manufacturing), tecnología RP (rapid prototyping) o tecnología SFF (solid-freeform technology). En sus inicios el proceso de impresión era muy largo, duraba entre 1 a 2 meses, lo que fue perfeccionado en las décadas subsiguientes para lograr la velocidad que tienen actualmente de minutos a horas dependiendo de la dificultad y tamaño del modelo (Gross, 2014). También, el desarrollo del tipo de material que puede utilizar este tipo de impresoras ha permitido aumentar la accesibilidad al uso de esta tecnología. En el Instituto Tecnológico de Massachusetts, se patentó en el año 1993, la primera impresora 3D que utilizaba como insumo, plásticos, metales y cerámicos. Existen varias compañías comerciales que han desarrollado impresoras 3D para diversos materiales, incluyendo biomateriales hasta tejidos vivos (Gross, 2014).

La Facultad de Ingeniería, Ciencia y Tecnología (FICT) de la Universidad Bernardo O'Higgins de la ciudad de Santiago de Chile, cuenta con un Laboratorio de Prototipado, que tiene impresoras 3D para su uso en docencia e investigación. La FICT tiene como propósito la formación transversal a todos sus estudiantes el aprendizaje de la tecnología de impresión 3D. De esta manera es posible desarrollar nuevas habilidades y capacidades que le darán una distinción en el momento de enfrentarse en el mercado laboral.

Base de datos libre de moléculas diseñadas para impresión 3D

Existen gran cantidad de figuras diseñadas para impresión 3D de acceso libre en la web, el ejemplo más conocido es [Thingiverse](#), sin embargo, no es fácil encontrar diseños de elementos científicos correctamente diseñados, para uso en investigación, publicaciones y enseñanza (Coakley, 2014).

En el caso de compuestos químicos, hay pocas bases de datos de acceso libre, que estén bien diseñadas y sean explicativas por sí sola. En menor medida se encuentran bases de datos correctas para biomoléculas y biomedicina, es por ello por lo que se creó un sitio para compartir elementos diseñados entre los usuarios, llamado [NIH 3D Print Exchange](#) (Coakley, 2014). Para el caso de compuestos químicos, existe el programa [MolView](#), con acceso libre en su sitio web (Smith, 2004; Smith, 1995); también [PyMol](#). El programa Molview recibe archivos con extensión PDB (Protein Databases) y archivos MolView. A pesar de ser una excelente herramienta para elaborar moléculas y visualizarlas en 3D, la base de datos de moléculas para impresión 3D que tiene actualmente, no satisface los requerimientos para facilitar la comprensión de las estructuras de las moléculas, tanto por falta de detalles como por falta de la optimización del tiempo y material de la impresión 3D, debido a que no se distingue la diferencia entre átomos, una vez que se encuentran impresas, y en muchos casos deben imprimirse con un porcentaje de relleno alto para no perder su estabilidad.

Existen varios trabajos relacionados con el modelamiento de compuestos químicos para impresión 3D, partiendo muchos de ellos de la estructura cristalográfica, de teoría, o modelamiento computacional (Stone-Sundberg, 2015; Rodenbough, 2015; Casas, 2015; Kitson, 2016).

También, existen empresas especializadas en diseño de imágenes de moléculas para uso científico, tanto para publicaciones, presentaciones como en la docencia, un ejemplo de ellas es la empresa [Indigo Molecular Images Ltd.](#), quienes entregan el servicio de diseño de moléculas según requerimientos del cliente.

A continuación, se describe el proyecto de implementar impresión 3D didáctica en la asignatura de Química, a través de una plataforma interactiva para aprender la estequiometría de las reacciones, y comprender las estructuras de las moléculas químicas

Métodos

Metodología

La herramienta desarrollada en este trabajo fue denominada "Química 3D", esta considera el aprendizaje de la estequiometría de reacciones químicas, por un lado, y, por otro lado, el

aprendizaje de las estructuras geométricas de las moléculas, según la Teoría de Repulsión de Pares de Electrones de Valencia TRPEV o Teoría Gillespie- Nyholm

Esta herramienta contiene una base de datos limitada, la cual se irá alimentando y creciendo según vayan registrándose nuevas moléculas nuevas indicadas en el software durante la práctica por los estudiantes.

La metodología contempla dos principales actividades:

1. Desarrollo del software y sitio web de libre acceso “Química 3D”, para comprender la estequiometría de las reacciones químicas y la estructura geométrica de moléculas mediante impresión 3D
2. Diseño de moléculas en 3D autoexplicativas según base de datos inicial de reacciones, y generación Base de Datos de moléculas con extensión según software de impresoras 3D

1-Desarrollo del software y sitio web de libre acceso “Química 3D”, para comprender la estequiometría de las reacciones químicas y la estructura geométrica de moléculas mediante impresión 3D

La implementación del sitio utiliza lenguaje PHP con un ambiente de desarrollo de Bootstrap, que es un framework de uso libre para el diseño de sitio web, diseñado por Twitter, cuya principal característica es la posibilidad que se adapte a todas las plataformas de dispositivos fijos o móviles, con base de datos MySQL.

Se analizó la forma de cómo se logra las ecuaciones de equilibrio de los reactantes y generación de productos, y se implementó un algoritmo para que sirva a cualquier reacción que se desee equilibrar.

Además, el sitio web “Química 3D” fue diseñado para incluir información del equipo de trabajo, datos de contacto, consultas, y material de apoyo.

2- Diseño de moléculas en 3D autoexplicativas según base de datos inicial de reacciones, y generación Base de Datos de moléculas con extensión según software de impresoras 3D

Se desarrolló una base de datos limitada de moléculas diseñadas en impresión 3D, la que irá creciendo en el transcurso del tiempo, mientras sea utilizada en la práctica por estudiantes durante el estudio de las asignaturas químicas. Se diseñaron 55 moléculas, mediante software AutoCAD 2010 o similar. Se utilizaron tres impresoras Makerbot Replicator, y su respectivo software en el desarrollo de esta investigación.

Determinación de la geometría de las moléculas

Para determinar la estructura geométrica de las moléculas a diseñar, se utilizó como herramienta principal la Teoría de Repulsión de Pares de Electrones de Valencia (TRPEV), para verificar la correcta geometría definida, se utilizó la búsqueda en información bibliográfica, como también corroborar con las moléculas existentes en la base de datos del

programa MolView. De esta manera se definía su geometría como lineal, angular, trigonal plana, tetraédrica, cuadrada plana, bipiramidal trigonal, pirámide cuadrangular, octaédrica, pirámide pentagonal, bipiramidal pentagonal (Petrucci, 1986).

Diseño de las moléculas en tres dimensiones (3D)

Las bases de datos de moléculas diseñadas para impresión 3D de libre acceso contienen moléculas sin el símbolo de sus elementos, detalle de información requerida para facilitar el aprendizaje de la estructura molecular.

Para el diseño de las moléculas se realizaron los siguientes requerimientos:

1. Todos los elementos deben tener su símbolo
2. Todos los elementos deben tener su carga (según corresponda)
3. Los elementos deben tener una relación según su radio atómico, para mostrar la diferencia entre los elementos
4. Las moléculas impresas deben contener una estructura estable, pero optimizando el uso de material
5. El tiempo máximo de impresión es de 1,5 horas

Una vez diseñada la molécula, se guardó la imagen de la molécula 3D en extensión .JPEG, para generar la Base de Datos de Imágenes de Moléculas 3D.

Configuración y validación de la impresión 3D de las moléculas diseñadas

Luego de diseñar la molécula, se realizó su configuración de su impresión en 3D. Se determinaron los siguientes parámetros:

1. Necesidad de imprimir base
2. Necesidad de imprimir soportes
3. Temperatura del extrusor
4. Relleno de la figura
5. Tamaño óptimo para lograr un tiempo menor a 1,5 horas

La iteración del proceso de configuración de cada molécula se hizo utilizando la función Pre-view del Software Makerbot Print v2.7, para conseguir el tamaño y tiempo acorde a los requerimientos.

Finalmente, para validar el diseño de cada molécula, se realizó su impresión 3D para confirmar su estabilidad estructural y terminaciones de la superficie.

Una vez determinada la configuración óptima, se guardó el archivo en extensión. Makerbot, donde queda predefinida la configuración de la impresión 3D para imprimir directamente en la impresora 3d Makerbot Replicator o similar. De esta manera, se creó la Base de Datos de Moléculas Impresión 3D.

Resultados

Plataforma Interactiva Química 3D

Se desarrolló un software como plataforma interactiva, que estará disponible en el sitio web “Química 3D”. Esta plataforma contiene material de estudio, imágenes en 3D de moléculas, y una sección para realizar actividades prácticas referidas a la estequiometría de las reacciones químicas, además de conocer la estructura geométrica de moléculas de interés.

La implementación del software de Química 3D provee al estudiante la posibilidad de ejercitar ecuaciones estequiométricas. Se basa en 3 pasos que debe realizar el estudiante. El principal objetivo es buscar que el usuario de la aplicación dé solución al desafío de dejar perfectamente equilibrada dicha reacción.

Para ello, el estudiante deberá realizar los siguientes pasos:

1. Indicar a la izquierda de la ecuación, cuáles serán los reactantes, formándolos elemento por elemento con sus respectivas cantidades (subíndice), y cuáles serán los productos, formándolos de la misma manera, que corresponde a las moléculas que se colocan a la derecha de la ecuación.
2. La interacción del usuario continúa con la plataforma, ya que le pedirá seleccionar cuál es la ecuación equilibrada correcta, para lo cual deberá fijarse en las alternativas que se le proponen, con los coeficientes estequiométricos de dicha reacción; una vez seleccionada la alternativa, se verifica si es correcta la opción elegida.
3. Habiendo seleccionado la opción correcta, se deberá elegir cuál reactante o producto se desea imprimir; si su opción seleccionada no es la correcta, deberá intentarlo nuevamente.

Como se mencionó anteriormente, el estudiante puede formular todos los tipos de reacciones posibles, ingresando sólo los reactantes y productos, como se muestra en la Figura 1. Al escoger la alternativa correcta, el estudiante tiene la posibilidad de escoger una de las moléculas para poder visualizar su imagen en diseño 3D, y descargar el archivo para posterior impresión 3D.

Por otro lado, cabe señalar que la construcción de la aplicación se ha generado para cualquier mezcla de reactantes dado que se ha implementado el algoritmo que lo permite; no obstante, en la actualidad la base de datos que se generó tiene un alcance de alrededor de 55 posibles impresiones de elementos y/o productos, pero que en el transcurso del tiempo se irán incorporando otras imágenes para concretar el 3D impreso de cada uno de los elementos que exista, en la medida que se vayan apareciendo nuevas reacciones en la práctica que el mismo estudiante haga y bajo una solicitud a la plataforma.

Finalmente, la impresión se restringe sólo para ser ejecutada en el laboratorio de Química 3D de nuestra Universidad, debido a que no se puede permitir un uso extralimitado de solicitudes de impresión 3D a distancia, ya que, podrían colapsar las impresoras con las que se cuenta en el laboratorio; no obstante, podría grabar la imagen de la molécula en un medio de respaldo, para su impresión posterior.

Sin embargo, el ejercicio es posible llevarlo a cabo interactuando desde cualquier punto en donde el estudiante se encuentre, ya que es un sitio Web.

Como ya se mencionó el software inicialmente contiene una base de datos de 55 moléculas para impresión 3D, la cuál va a ir ampliándose en el tiempo. Por lo tanto, para aquellas reacciones que tengan moléculas que no se encuentren en la Base de Datos inicial, tendrá la alternativa de solicitar su diseño en la plataforma interactiva, y de esta manera quedará guardada su solicitud para el posterior diseño por el equipo de trabajo de la Plataforma Interactiva Química 3D.

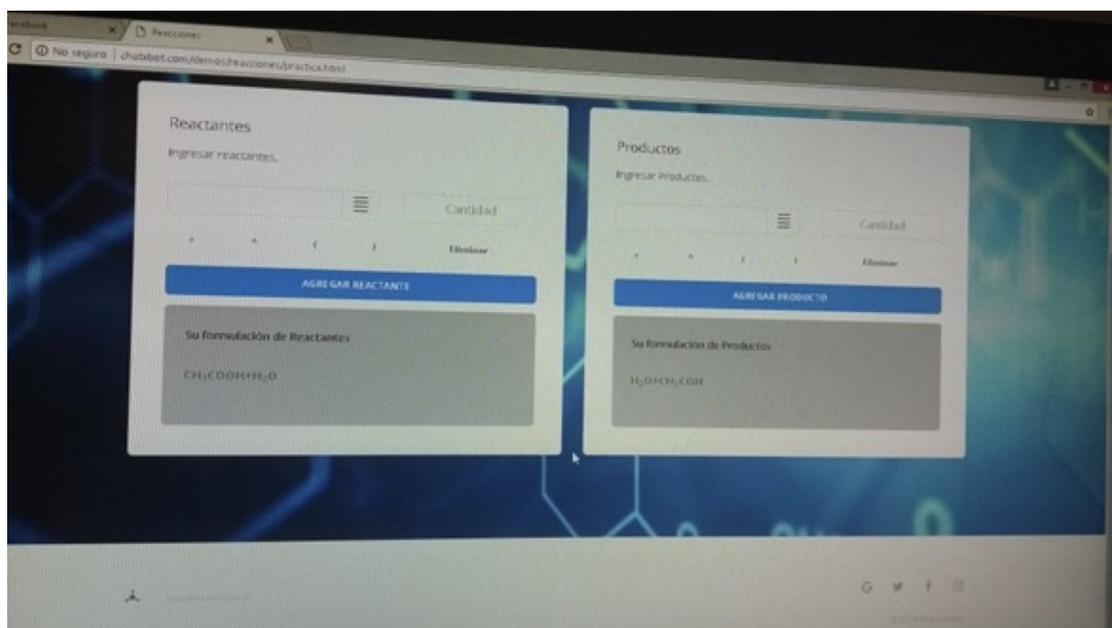


FIGURA 1. Plataforma Interactiva “Química 3D” (Foto de pantalla).

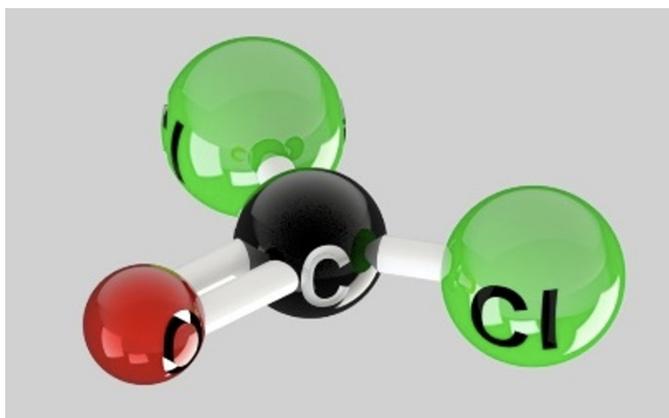
Moléculas Diseñadas para impresión 3D

Se diseñaron 55 moléculas, las que se entregan en una lista en Apéndices, se presentan además cada una de las imágenes del diseño en 3D. Se puede ver en el ejemplo de la Figura 2 el compuesto Cl_2CO , donde se puede apreciar el cumplimiento de los requerimientos definidos para que la figura sea autoexplicativa, esto es el símbolo de cada elemento, que se muestre una diferencia entre los radios de las esferas, y presentar la presencia de doble enlace cuando corresponde.

La configuración de las moléculas para su impresión 3D, arrojó los siguientes resultados:

1. Tamaño: rango de 5x5 cm a 10x10 cm como volumen.
2. Base y Soportes: se definió la necesidad de incluir la impresión de base y soportes de apoyo para obtener una correcta estructura.
3. Relleno: se definió un relleno de un 2% para todas las moléculas, de esta manera se pudo optimizar el material y reducir el tiempo dentro del rango requerido, consiguiendo una elemento estable y rígida.
4. Temperatura: se definió una temperatura de extrusión de 215°C para conseguir una superficie lisa.

FIGURA 2. Imagen de
 molécula diseñada en
 tres dimensiones 3D.



En la Figura 3 se presenta
 una fotografía del proceso de
 impresión de las moléculas, se
 puede ver la presencia de la base
 y soportes de apoyo definidos en
 la configuración. En la Figura 4 se
 pueden apreciar los tamaños de
 las moléculas impresas en 3D, las
 que se pueden comparar con el
 ratón al fondo de la imagen, con
 un rango entre 5 cm y 10 cm de
 alto aproximadamente.

FIGURA 3. Fotografía
 durante el proceso de
 impresión 3D de las
 moléculas.

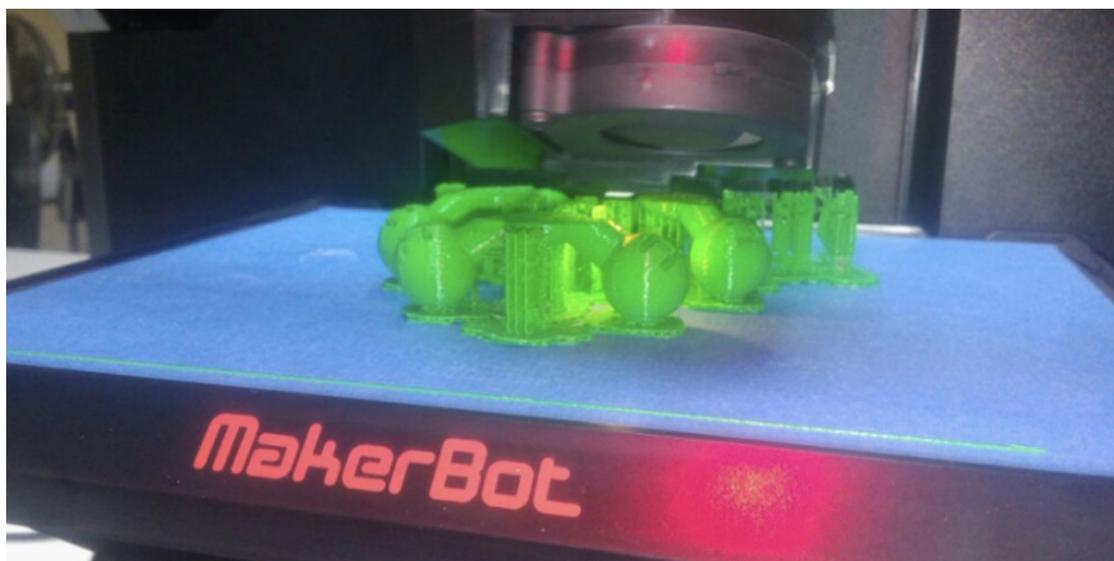


FIGURA 4. Fotografía de
 moléculas impresas en
 3D.



Discusión y conclusiones

La implementación en aula de las diferentes tecnologías en la era de la informática, se hace necesaria al analizar las competencias de los alumnos de esta nueva generación. Así se ha demostrado, que el aprender mediante el poner en práctica proyectos tangibles de investigación que produzcan resultados evidentes, facilita la comprensión, no sólo de la materia a tratar, sino de los procesos a seguir durante el desarrollo de una investigación, promoviendo un desarrollo integral del conocimiento.

Los resultados de esta investigación aportan en primera instancia la implementación de una plataforma interactiva que contribuye directamente al aprendizaje de la química orgánica e inorgánica, a través de nuevas tecnologías cercanas a los estudiantes, produciendo una motivación por el aprendizaje global, tanto del contenido como de la tecnología utilizada.

Las limitaciones en el diseño de las moléculas encontradas en base de datos libres, no permite facilitar el aprendizaje que se quiere lograr mediante la integración de la teoría de las estructuras moleculares con la visualización en tres dimensiones de estas mismas. Las bases de datos libres contienen gran cantidad de moléculas diseñadas en 3D, pero la mayoría de ellas no indican el símbolo de cada uno de los elementos que la componen, como tampoco los dobles y triple enlaces ni se distinguen las diferencias de tamaños entre distintos elementos. En el presente trabajo, se propuso crear una base de datos propia para complementar la forma estructural de la molécula impresa en 3D con detalles, como símbolo de los elementos, tipos de enlaces y diferenciación de tamaños de radios de las esferas, para así reforzar el aprendizaje. De esta forma se aportó de una manera sustancial al diseño en 3D de las moléculas disponibles.

Es importante señalar, que el funcionamiento de la aplicación busca que el estudiante resuelva el equilibrio de reacciones como medio de reforzamiento atractivo, ya que se usa una aplicación que da forma digital a cómo se trabajó en el aula; es una instancia en que el estudiante refuerza en forma interactiva, fortaleciendo este contenido de química y utilizando tecnología novedosa que, para los jóvenes de hoy (la generación de la era digital), es fundamental.

Este trabajo logró desarrollar una plataforma interactiva llamada “Química 3D” para ser utilizada como herramienta de enseñanza en el aula de las asignaturas de química general, química inorgánica y química orgánica principalmente.

La plataforma interactiva “Química 3D” provee de material de apoyo para reforzar el estudio, y además una sección práctica para ejercitar el conocimiento en la determinación de la estequiometría de las reacciones así la estructura geométrica de las moléculas que participan en dichas reacciones.

Con respecto a los resultados, el equipo académico a cargo del proyecto se reúne en sesiones de trabajo en las cuales logran concluir algunos aspectos de mejora para el proceso de enseñanza y aprendizaje, los que se exponen a continuación:

Preliminarmente podemos señalar que esta estrategia metodológica para el fortalecimiento de las competencias a través de la enseñanza- aprendizaje y evaluación de los conceptos de la estequiometría apoyados en materiales concretos y mediados por el uso de herramientas virtuales de aprendizaje permitió una mejora de la experiencia de aprendizaje desde la perspectiva de los alumnos a partir del cambio de percepción del

trabajado en el aula. Toda vez que al estudiante le permite disfrutar de espacios y momentos de aprendizaje innovadores, creativos y significativos.

Además, dentro de los aspectos positivos cabe destacar que la práctica docente en este trabajo se vio favorecida por el uso de herramientas virtuales, ya que permite llevar los conceptos de la estequiometría al aula de clase de manera innovadora, creativa y clara; ya que estos pueden ser simulados, presentados y visualizados directamente por el estudiante. Convierte materiales abstractos como algunas reacciones químicas en situaciones concretas y visualmente agradables, favorecen la ejemplificación, construcción y repaso de conceptos y el realizar relaciones directas entre lo conceptual y el contexto. Dentro de aspectos concretos del aprendizaje estas herramientas favorecieron la posibilidad de comparar cálculos complejos y realizar autoevaluaciones en el desarrollo de las actividades, generando experiencias de aprendizaje.

El éxito preliminar de los resultados de la intervención se debe a un cambio de la práctica docente y a un mejoramiento de los procesos de enseñanza – aprendizaje, debido a la implementación de unas estrategias metodológicas de enseñanza que nace como producto de la reflexión de abordar el problema de enseñanza de la química para mejorar su aprendizaje. Esto impacta el proceso de aprendizaje al tener en cuenta sus necesidades, intereses, y la manera como cada individuo llega a la comprensión del conocimiento. Además, orienta al docente hacia dónde debe dirigir su práctica para orientar y motivar dicho proceso.

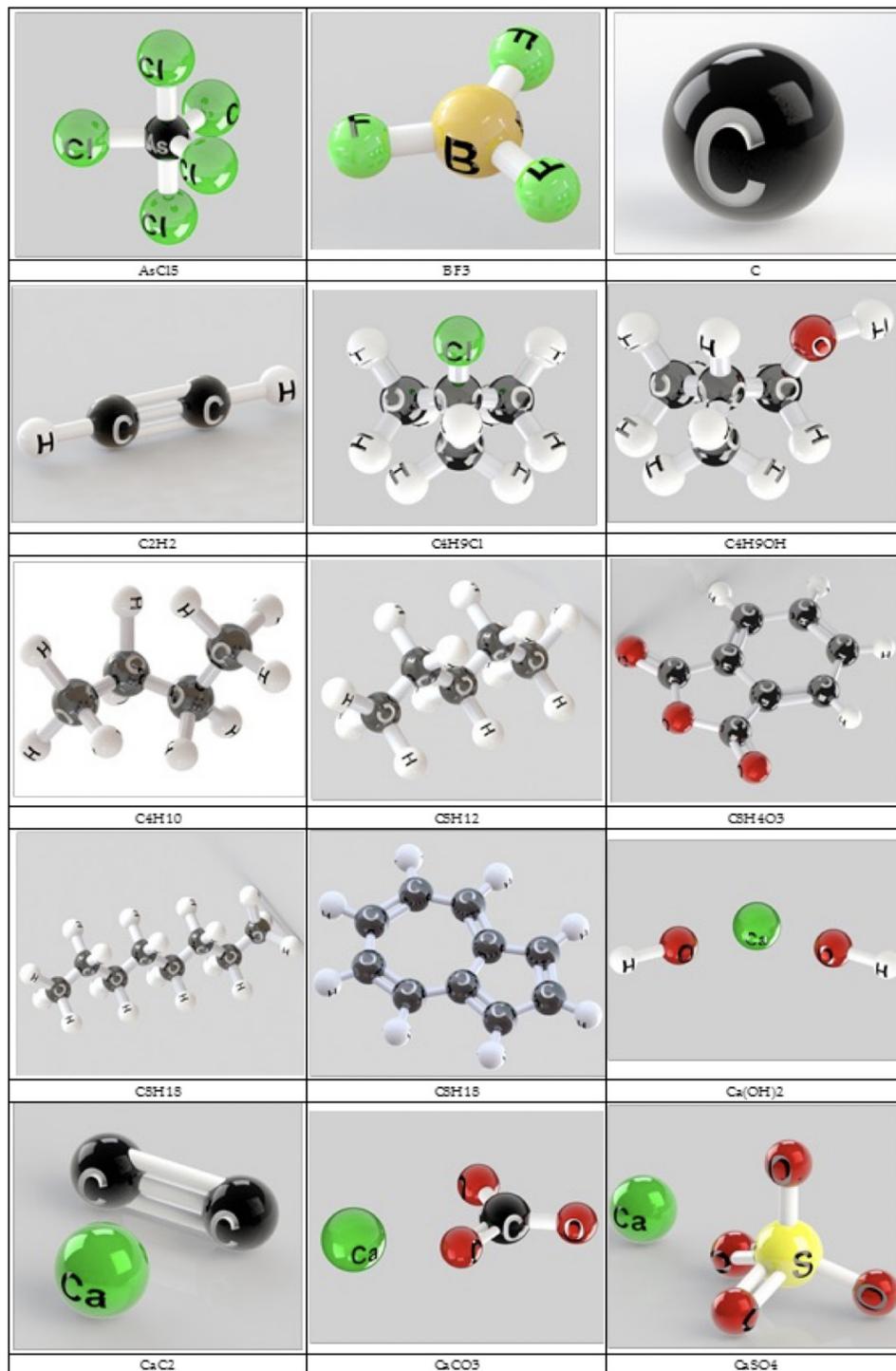
En un posterior estudio, se medirá cuantitativamente el impacto en el logro del aprendizaje utilizando esta plataforma interactiva "Química 3D", considerando la aplicación de rubricas para las carreras que se dictan en la Facultad de Ingeniería, Ciencia y Tecnología de la Universidad Bernardo O'Higgins.

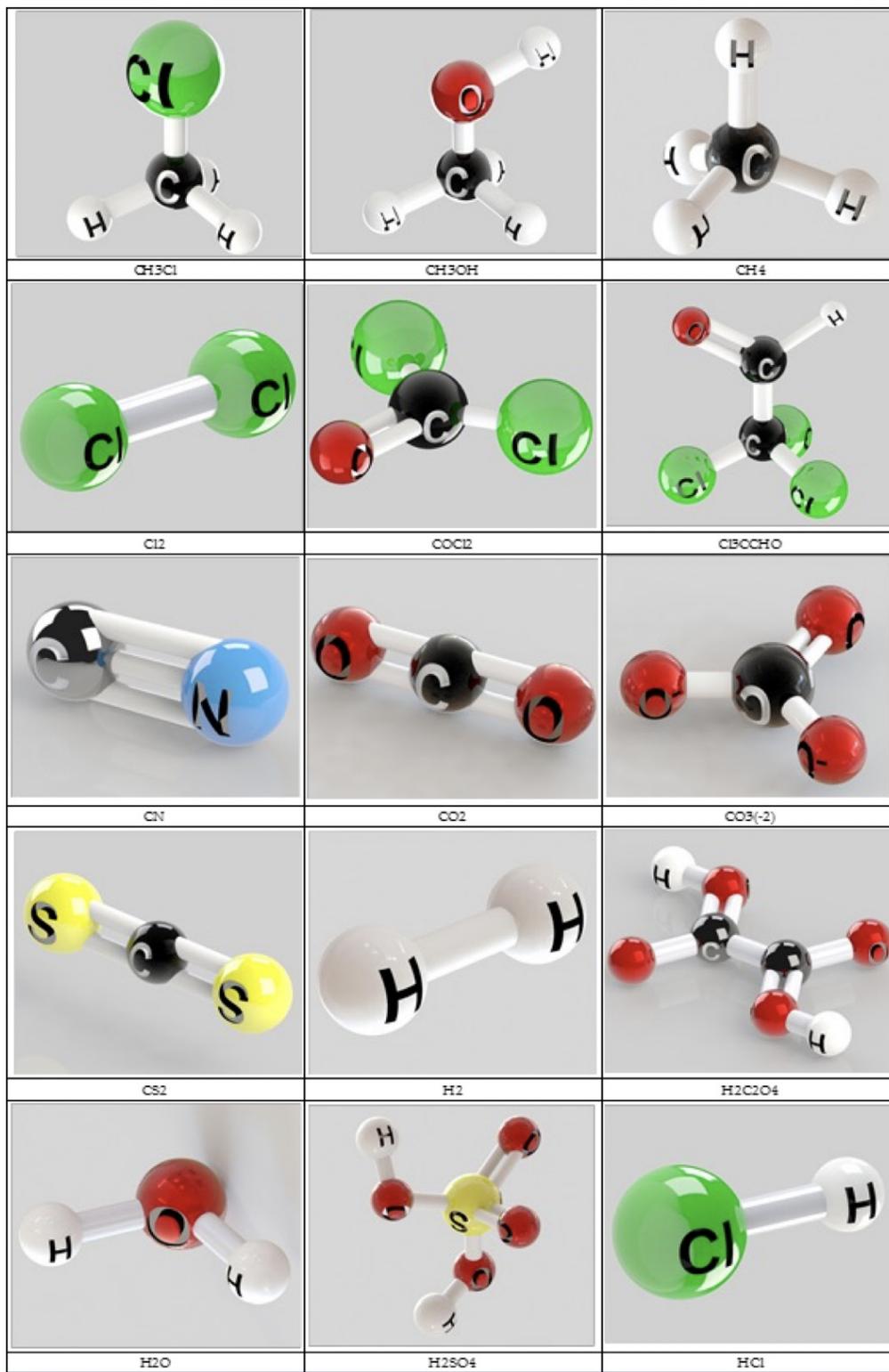
Referencias

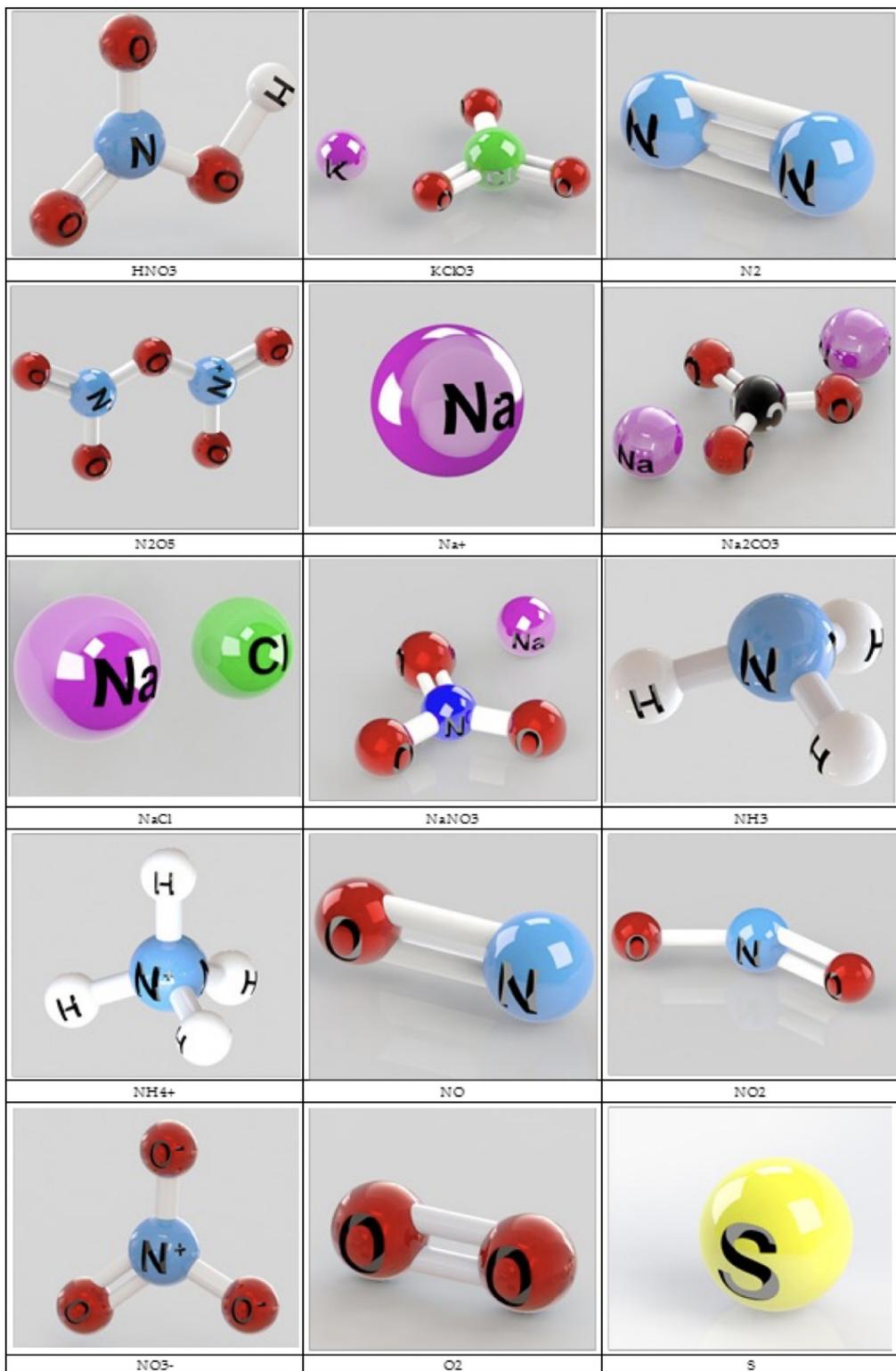
- Casas, L., Estop, E. (2015). Virtual and Printed 3D Models for Teaching Crystal Symmetry and Point Groups. *Journal of Chemical Education*, (92), 1338–1343. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00147>
- Coakley, M. F., Hurt, D. E., Weber, N., Mtingwa, M., Fincher, E. C., Alekseyev, V., Huyen, Y. (2014). The NIH 3D Print Exchange: A Public Resource for Bioscientific and Biomedical 3D Prints. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 1(3), 137–140. <https://doi.org/10.1089/3dp.2014.1503>
- Da Veiga E., Tyrwhitt-Drake, J., Roy I., Shalaby R., Suckale J., Pomeranz D. (2017). 3D Printing of Biomolecular Models for Research and Pedagogy. *Journal of Visualized Experiments* (121), e55427, 1-8.
- Gross B., Erkal J., Lockwood S., Chen Ch., y Spence D. (2014). Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences. *Analytical Chemistry*. Vol. 86, pág. 3240–3253.
- Harle M. y Towns M. (2011). A Review of Spatial Ability Literature, Its Connection to Chemistry, and Implications for Instruction. *Journal of Chemical Education*. Vol. 88, No. 3.
- Higgins S, Mercier E., Burd E., Hatch A. (2011). Multi-touch tables and the relationship with collaborative classroom pedagogies: A synthetic review. *Computer-Supported Collaborative Learning*, 6, 515–538.

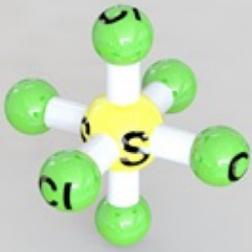
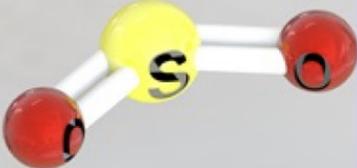
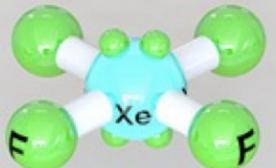
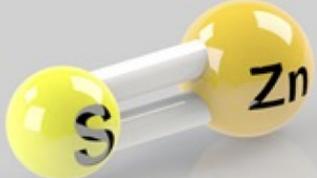
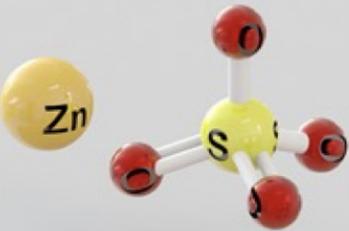
- Kitson, P., Glatzel, S., Chen, W., Lin, Ch., Song, Y., Cronin, L. (2016). 3D printing of versatile reactionware for chemical synthesis. *Nature Protocols* 11, 920–936. <https://doi.org/10.1038/nprot.2016.041>
- Kostakis V., Niaros V., Giotitsas C. (2014). Open source 3D printing as a means of learning: An educational experiment in two high schools in Greece. *Telematics and Informatics*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tele.2014.05.001>
- Margaryan A., Littlejohn A., Vojt G. (2011). Are digital natives a myth or reality? University students' use of digital technologies. *Computers & Education*, 56, 429–44.
- Petrucci, R. (1986). *Química General. Versión en Español*. Addison-Wesley Iberoamericana S.A. Wilmington, Delaware, Estados Unidos.
- Rodenbough, P., Vanti, W., Chan, S. (2015). 3D-Printing Crystallographic Unit Cells for Learning Materials Science and Engineering. *Journal of Chemical Education*, 92, 1960–1962. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00597>
- Rossi S., Benaglia M., Brenna D., Porta R. y Orlandi M. (2015). Three Dimensional (3D) Printing: A Straightforward, User-Friendly Protocol to Convert Virtual Chemical Models to Real-Life Objects. *Journal of Chemical Education*, 92, 1398–1401.
- Scalfani V., Vaid P. (2014). 3D Printed Molecules and Extended Solid Models for Teaching Symmetry and Point Groups. *Journal of Chemical Education*. Vol. 91, Pág. 1174–1180.
- Schneider R. y Plasman K. (2011). Science Teacher Learning Progressions: A Review of Science Teachers' Pedagogical Content Knowledge Development. *Review of Educational Research*, Vol. 81, No. 4, pág. 530–565.
- Smith, T. (1995). MOLView: A program for analyzing and displaying atomic structures on the Macintosh personal computer. *Journal of Molecular Graphics*, 13, 122-125. [https://doi.org/10.1016/0263-7855\(94\)00019-0](https://doi.org/10.1016/0263-7855(94)00019-0)
- Smith, T. (2004). MolViewX: a molecular visualization program for the Macintosh OS X system. *Journal of Applied Crystallography*. 37, 654-657. <https://doi.org/10.1107/S0021889804009859>
- Stone-Sundberg, J., Kaminsky, W., Snyder, T. and Moeck, P. (2015), 3D printed models of small and large molecules, structures, and morphologies of crystals, as well as their anisotropic physical properties. *Crystal Research and Technology*, 50: 432–441. <https://doi.org/10.1002/crat.201400469>
- Violante L., Nunez D., Ryan S., Grubbs W. (2014). 3D Printing in the Chemistry Curriculum: Inspiring Millennial Students to Be Creative Innovators. *Addressing the Millennial Student in Undergraduate Chemistry*. Capítulo 9, pág. 125-146. ACS Symposium Series E-Books.
- Lotherington H., Jenson J. (2011). Teaching Multimodal and Digital Literacy in L2 Settings: New Literacies, New Basics, New Pedagogies. *Annual Review of Applied Linguistics*, 31, pág. 226–246.

Apéndice







		
SO ₆	Sn	SO ₂
		
SO ₃	XeF ₂	XeF ₄
		
Zn	ZnO	ZnS
		
ZnSO ₄		