

## CAPÍTULO 1

### **Química en la Universidad Veracruzana: experiencias de enseñanza en un ambiente de investigación multidisciplinar**

Dr. Ricardo Tovar Miranda  
Dr. Omar Cortezano Arellano  
Dr. Tomás Guerrero

## **Química en la Universidad Veracruzana: experiencias de enseñanza en un ambiente de investigación multidisciplinar**

Dr. Ricardo Tovar Miranda  
Dr. Omar Cortezano Arellano  
Dr. Tomás Guerrero

### **Resumen**

La química estudia la materia y sus transformaciones, y permea en cada sector del quehacer humano, desde la extracción y procesamiento del petróleo y la obtención de sus derivados, hasta la preparación de compuestos valiosos como medicamentos y los nuevos materiales inteligentes que vemos diariamente. Participa en nuestra economía, cadena productiva y marcos regulatorios. La presencia de las ciencias químicas es tan constante, que con frecuencia la relegamos a aspectos ambientales y a la producción de bienes y servicios, dejando de lado su aspecto epistemológico, el cual adquiere un profundo significado en la formación de recursos humanos de alta calidad. El Instituto de Ciencias Básicas cultiva líneas de investigación en química básica y participa en la formación de prácticamente todo programa de licenciatura y posgrado donde, el conocimiento de las moléculas, su diseño, reactividad y otras propiedades son fundamentales. Un aspecto poco abordado, es el valor, no solo de los proyectos multidisciplinarios que se desarrollan, sino de los conocimientos y habilidades que el alumno adquiere en la ejecución de sus respectivos trabajos. La participación en la generación de ciencia básica es una experiencia que permite a los egresados de nuestros laboratorios ser recursos humanos con capacidad para incorporarse y adaptarse a prácticamente cualquier espacio donde se realicen labores experimentales, ya sea con el fin de producción, o de investigación y desarrollo. En este capítulo describimos la experiencia que hemos adquirido, resaltando los elementos que consideramos más significativos en la formación

de recursos humanos para el ejercicio profesional dentro de un ambiente multidisciplinario.

**Palabras clave:** *química, educación superior, formación profesional, investigación multidisciplinaria.*

## Abstract

Chemistry is the study of matter and its transformations and permeates every sector of human activity, from the extraction and processing of oil and the obtaining of its derivatives to the preparation of valuable compounds such as medicines and new smart materials that we see every day. Chemistry participates in our economy, production chain, and regulatory frameworks. The presence of the chemical sciences is so constant that we often relegate them to environmental aspects and the production of goods and services, leaving aside its epistemology, which acquires a profound meaning in the training of high-quality human resources. Our research group explores basic chemistry research projects in the boundaries of biology, chemistry and physics and participates in the teaching of practically all undergraduate and graduate programs where the knowledge, design, reactivity and other properties of molecular systems are fundamental. An issue that is rarely addressed is the value, not only of the interdisciplinary projects that are currently developed, but also of the knowledge and skills that the student acquires in the execution of their work. Through research in basic science, graduate students from our laboratories became capable of joining and adapting to practically any environment where experimental work is carried out, whether for production or research and development purposes. In this chapter we describe the experience we have acquired, highlighting the elements that we consider most significant in the training of human resources for professional practice within a multidisciplinary environment.

**Keywords:** *chemistry, education, interdisciplinary research in chemistry*

## 1. Definiciones, historia y contexto

*“Una relación muy cercana con la sociedad es el destino de la ciencia”*

R. Noyori (premio Nobel de química 2001).

La ciencia es objetiva, sin embargo, es la inteligencia, el trabajo duro, la resiliencia, todas estas, virtudes humanas las que han dado forma a nuestro quehacer científico, estas cualidades han conducido al descubrimiento y diseño de nuevas y fascinantes sustancias, hasta el año 2009, se estimaba que se conocen con exactitud alrededor de 50 millones de moléculas (Fink et al., 2005; Ruddigkeit et al., 2012). La química es la ciencia que estudia la materia y sus cambios, también es uno de los campos del conocimiento más antiguos creado por el ser humano, sus orígenes se pueden rastrear al surgimiento de la humanidad y su desarrollo está vinculado al desarrollo de civilizaciones como la egipcia, romana, griega, china, entre otras.

Desde el punto de vista epistemológico, este campo del conocimiento se funda en la búsqueda del conocimiento y comprensión de cada uno de los objetos que nos rodean, así como la forma en que podemos transformarlos para mejorar nuestra calidad de vida. La directriz del quehacer científico en el campo de la química se centra en preguntas tan fundamentales como: *¿de qué está hecha la materia a nivel atómico?, ¿qué aspecto tiene una molécula?, ¿qué reactividad exhibe y bajo qué condiciones?, ¿cómo interactúa una molécula con otras especies químicas en seres vivos?* (DeGlopper et al., 2023; Ruthenberg & Mets, 2020; Vincent-Ruz, 2020).

Las raíces de este campo del conocimiento se pueden rastrear hasta la edad de piedra, la mera observación de la presencia de materiales distintos y su diferenciación puede asumirse como uno de los principios epistemológicos en que se funda la química: la

elaboración de pinturas rupestres en la antigüedad durante el periodo paleolítico (12,000-8,000 A. C.), implicó necesariamente el descubrimiento de pigmentos, lo que permitió a los primeros hombres plasmar su concepción del mundo en las cuevas. Continuando con la evolución de esta ciencia, el descubrimiento del fuego permitió, sin duda, un cambio sustancial en el estilo de vida y la alimentación de la sociedad primitiva. Otro aspecto que facilitó el fuego fue la manipulación de las sustancias conocidas, así, fue posible, por ejemplo, el surgimiento de la alfarería seguido de la extracción y aislamiento de metales, siendo el cobre el primer metal aislado de su mena, estos avances fueron dando cuerpo al desarrollo tecnológico de las sociedades primitivas.

Tras el descubrimiento del aislamiento de pigmentos y extractos de plantas con fines terapéuticos, del fuego, de la alfarería y la metalurgia, la evolución de la química llevó a la curiosidad sobre el interior de la materia y la magia envuelta en los cambios que el hombre observaba, en este contexto nace la alquimia, siendo el trabajo de metales en horno de piedra y el baño María de los remanentes más famosos que fueron descritos, por citar un ejemplo el baño María fue descrito por Zozimus de Panópolis cerca del año 300 de nuestra era y ambos procedimientos se siguen utilizando en la actualidad. La sociedad tiene a la alquimia por fantasiosa, las llamadas transmutaciones de metales en oro son parte del conocimiento colectivo sobre las intenciones del alquimista, sin embargo, en ese afán de descubrir esos misterios y con los precarios procedimientos experimentales a base de prueba y error, muchos artefactos como el horno, la cristalería y vasijas fueron dando cuerpo al tipo de materiales con que contamos en un laboratorio de química moderno. Debido a que el eje fundamental de la alquimia era la transmutación de metales para la obtención de oro y que durante muchos años no dio el resultado esperado, la alquimia quedó en el pasado como una pseudociencia, sin embargo, muchos instrumentos rudimentarios y técnicas experimentales adquiridos durante ese tiempo fundaron lo que hoy conocemos como química, siendo ésta una ciencia

formal basada en la experimentación explicada a la luz de la teoría para generar conocimiento sobre procesos y la naturaleza de lo conocido (Brock, 2016). Hoy en día sabemos que, si bien es cierto que, la alquimia quedó en el pasado, su valor en cuanto a técnicas y utensilios sentaron las bases de los laboratorios actuales de química, sin embargo, es durante este tiempo que se identifica esta fase de curiosidad casi infantil, la que provoca al hombre a calentar una mezcla de esto y lo otro, fomentando el aprendizaje basado en la experiencia, un elemento básico en las ciencias químicas, que sigue siendo la manera como surgieron y surgen los científicos modernos.

A mediados del siglo XVII, posterior a la clara división entre alquimia y química, el problema de los gases y fenómenos relacionados con la presión y el volumen acapararon la atención de varios químicos de la época, principalmente porque se desconocía el papel del oxígeno en la respiración y la composición exacta del aire que respiramos. En ese sentido, Robert Boyle y Robert Hooke propusieron que el aire transportaba algún tipo de partícula que tras entrar a los seres vivos removía ciertas impurezas al exterior haciendo posible la respiración. En este momento, el flogisto, sustancia hipotética que se creía que existía en todos los materiales combustibles y que se liberaba en la combustión, se convierte en la explicación comúnmente aceptada para muchos fenómenos naturales. Años más tarde, en el siglo XVIII Lavoisier refuta la idea del flogisto, al llevar a cabo una de las revoluciones intelectuales más importantes de su tiempo, tras varios experimentos donde se realizaba la combustión de varios materiales conocidos concluyó que la combustión era en realidad una *reacción química* que involucraba la combinación de una sustancia con oxígeno, no a la liberación de flogisto. Esta explicación de la combustión jugó un papel muy importante en el desarrollo de la química moderna (Brock, 2016).

A partir de esta revolución, la química siguió creciendo de forma paralela en los aspectos experimentales y teóricos, la concepción

del átomo fue ampliamente descrita por Dalton y, reforzado por el trabajo de Berzelius cuyos experimentos sobre presión y volúmenes parciales, apoyados por el naciente campo de la electroquímica terminaron por consolidar esta revolución del pensamiento.

A mediados del siglo XIX, Antoine Fucroy fue el primer químico que estableció que los compuestos aislados de plantas y animales se conformaban a partir de ciertos átomos: carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno y, en algunas ocasiones azufre y fósforo, indicando con esto que debía haber una división entre la *química inorgánica* y *orgánica*, siendo Kekulé quién definió a la *química orgánica* como la rama de la química que estudia compuestos de carbono (Brock, 2016).

Posteriormente, el experimento de Wöhler demostró que se podía preparar urea, un compuesto considerado orgánico a partir de un sólido inorgánico, este experimento junto con el naciente modelo de valencia y el sexteto aromático, estructuraron la columna vertebral de la *síntesis orgánica*, rama de la química que provee a la sociedad de una enorme cantidad de beneficios que impactan en el aumento de la calidad y expectativa de vida, en áreas que van desde la síntesis de fármacos, como de la fabricación de nuevos materiales y mejoras en los sistemas catalíticos de la extracción de petróleo (Brock, 2016).

A principios del siglo XX, lo que podría interpretarse como la segunda revolución en el desarrollo de la química fue el surgimiento de la *mecánica cuántica*, la cual ha marcado un hito en la forma en que visualizamos la química al replantear nuestra noción sobre la naturaleza del *enlace químico* y muchos otros aspectos que se fueron derivando de esa nueva forma de concebirlo (Brock, 2016).

La introducción del modelo cuántico condujo al hombre a replantearse la naturaleza de la materia y en este devenir, evolucionaron las técnicas que eventualmente permitieron conocer, de manera más íntima, la composición de una enorme cantidad de

sustancias, el desarrollo de estas técnicas fue una consecuencia de la cuantización de la materia. Las técnicas de análisis elemental y las pruebas cualitativas desarrolladas a fines del siglo XIX y principios del XX habían permitido conocer en buena medida la estructura aproximada de muchos compuestos conocidos, especialmente, compuestos de origen natural como la morfina (1). La morfina es un derivado opiáceo con propiedades anestésicas y analgésicas, cuya fórmula química fue propuesta por Auguste Lauren en el año 1847 (Brook et al., 2017), sin embargo, la estructura exacta de la morfina no fue dilucidada sino hasta cien años más tarde, gracias al surgimiento de los métodos espectroscópicos originados por la mecánica cuántica (Maier, 2008).

Hay que reconocer la complejidad y la belleza escondidas en una representación en 2D de un objeto cuya estructura y funcionalidad han llevado a la molécula (**Fig. 1**) a ser una molécula ampliamente estudiada, esta misma complejidad estructural ha alimentado el desarrollo de otros muchos campos de las ciencias químicas, como la síntesis total, la inducción asimétrica y los métodos instrumentales de análisis como la resonancia magnética nuclear y la cromatografía acoplada a espectrometría de masas.

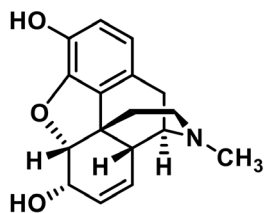


Figura 1

Después de más de cien años de química, la cuestión sigue siendo la curiosidad por aprender y brindar nuevo conocimiento, respondiendo preguntas como, por ejemplo: *¿cómo está estructurada la materia?, ¿cómo puedo usar este conocimiento para diseñar soluciones para los problemas la sociedad actual?*

La química como campo de investigación se aborda de manera fundamental desde dos aristas: *la química básica y la química aplicada*. La *química básica* se centra en generar conocimiento sobre la naturaleza de la materia, su estructura y su reactividad

fundamental, mientras que, la *química aplicada* busca dar solución a problemas específicos dentro de la industria química o en el desarrollo tecnológico en salud, alimentación, materiales, generación de nuevos dispositivos, etc.

En general, la necesidad de la química aplicada se justifica de manera relativamente simple, los problemas en que se centra son fáciles de identificar, por ejemplo: nuevas cepas bacterianas y multirresistentes, la necesidad de fuentes alternativas de energía, nuevos dispositivos optoelectrónicos y procesos más verdes son algunos de estos problemas y es fácil entender que un conocimiento profundo de la materia dirige el esfuerzo hacia la solución de estos planteamientos.

Por otro lado, la necesidad de la química básica es algo más difícil de justificar, más aún en estos tiempos donde los problemas mundiales y las economías en recesión dificultan la inversión en generación de conocimiento en campos fundamentales como lo es la estructura y propiedades de compuestos orgánicos, inorgánicos e híbridos. La utilidad de este conocimiento no se percibe de manera instantánea, probablemente pasará mucho tiempo para poder valorar el impacto del conocimiento generado. Sin embargo, no existe una división clara entre la química básica de la química aplicada debido a que, muchas veces se puede descubrir nueva reactividad o generar nuevas estructuras químicas buscando una aplicación definida, en ese sentido ambos enfoques se complementan, y en ese sentido: *¿cuál es el beneficio de una formación sólida en campos fundamentales de la química?*

Es notorio que programas de formación profesional como los que se imparten dentro de la Universidad Veracruzana, tanto del área académica de ciencias de la salud (medicina, química clínica) como del área técnica (ingeniería química, química farmacéutica biológica) tienen en común una formación básica en química.

La ventaja de una formación básica en química trasciende a la

aplicación de conocimientos fundamentales de química en la profesión; la formación en química básica provee de un marco de pensamiento científico, que conlleva la capacidad de identificar un problema, definir las variables que lo afectan y estructurar un plan que conduzca a una solución viable. La estructura de pensamiento que se adquiere en este proceso se encuentra descrita en la literatura como un valioso recurso en la formación profesional (Hyytinen et al., 2019; Janoušková et al., 2023; Zimmerman, 2007). Hoy en día, se habla mucho de la formación a través de la solución de problemas o la vinculación investigación-docencia (Ippoliti et al., 2022; Reyes, 2023); durante las últimas décadas este tipo de enfoques ha ganado definitivamente su lugar como un enfoque pedagógico indispensable para la formación profesional, principalmente en programas de formación con enfoque técnico y, de manera sugerida para el resto de las ciencias.

## **2. Desarrollo de las ciencias químicas en el contexto de la Universidad Veracruzana**

La Universidad Veracruzana es reconocida como la mejor y más grande institución de educación superior del sureste de México, su matrícula es numerosa y aumenta cada año, colocándola como una de las opciones de educación superior en nuestro país. En cuanto al desarrollo de las ciencias químicas, la rica biodiversidad del estado y de la región han orientado durante mucho tiempo la naturaleza de los proyectos que se han desarrollado en nuestra institución, de esta manera la Universidad tiene una tradición sólida en el estudio de productos naturales como metabolitos aislados de una enorme cantidad de plantas, esto se ha desarrollado a la par con el área de alimentos y ciencias agropecuarias.

Dentro de la química, la síntesis total, el diseño y síntesis de moléculas con posible actividad biológica, la catálisis homogénea y la química de coordinación son áreas que no han tenido el mismo desarrollo. Según el último informe de transparencia de la hoy

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Investigación (Secihti) y sin contar a los investigadores postdoctorales, un total de 954 investigadores pertenecientes a la UV se encuentran con alguna distinción dentro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), de los cuales, 19 se encuentran declarados como tal en el área II, Biología y Química, específicamente en la disciplina de Química, esto representa el 2% del total de investigadoras e investigadores; de éstos 19, solo 5 (cerca del 0,5% del total) cuentan con la distinción del nivel 2 del SNII, no hay investigadores con el nivel 3 ni el emeritazgo (Secretaría de Ciencia, 2025). Estos datos indican que el área de química todavía tiene mucho por desarrollar en la UV. En nuestra Universidad, por ejemplo, solo dos grupos de investigación cultivan el área de química de coordinación, uno en la Facultad de Ciencias Químicas, región Córdoba-Orizaba y el otro en el Instituto de Ciencias Básicas región Xalapa, ambos orientan de momento, su investigación al desarrollo de posibles metalofármacos. Por el contrario, hasta donde sabemos, solo un grupo de investigación cultiva el área de la síntesis total y uno el desarrollo de métodos fotocatalíticos, éstos últimos adscritos al Instituto de Ciencias Básicas de la región Xalapa. De esta manera, podemos afirmar que el campo de la química tiene alto potencial de desarrollo en esta Universidad.

## **2.1 Síntesis total de compuestos orgánicos**

Tradicionalmente, la síntesis en química ha sido de los campos más prolíficos durante la segunda mitad del siglo XX y lo que llevamos del XXI. La síntesis total es un ejercicio intelectual que requiere de una formación sólida en química orgánica y que ha conseguido un buen número de premios Nobel a partir de la década de los 60's. La síntesis total es el campo científico dentro de la química que se encarga de sintetizar -construir- moléculas complejas a nivel laboratorio. A medida que las ciencias químicas avanzan, el arsenal disponible de reacciones y metodologías químicas aumenta proporcionalmente, profundizando en el conocimiento de la nueva

reactividad y la comprensión y desarrollo de conceptos químicos conocidos y nuevos, con lo que aumenta nuestra capacidad para establecer cada vez retos sintéticos más grandes. La capacidad para realizar síntesis ha cambiado mucho desde que Wöhler sintetizó la urea en el siglo XIX hasta nuestros días donde, a finales del siglo XX ya se había descrito una síntesis para la penicilina V (antibiótico  $\beta$ -lactámico) (Beatriz et al., 2022), la estricnina (un alcaloide con actividad pesticida) (Seeman & House, 2022) y el taxol (un terpeno con propiedades anticancerígenas) (Min et al., 2023) (**Fig. 2**).

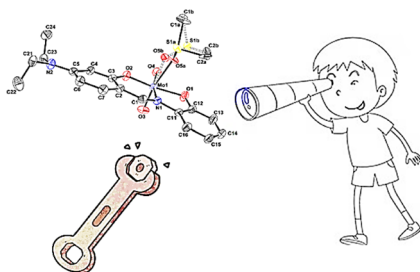


**Figura 2.** Moléculas complejas de uso humano sintetizadas en la actualidad.

Las estructuras de la figura 2 pueden parecer ininteligibles para los estudiantes que apenas inician su formación profesional, sin embargo, este tipo de estructuras son elementos valiosos a través de los cuales se les introduce en el mundo de esta ciencia, con una sola de estas estructuras, se podría brindar un curso completo de química orgánica. En un primer acercamiento, examinando estos ejemplos se pueden revisar los grupos funcionales presentes en la molécula, estos son aquellos fragmentos responsables de su reactividad y, por tanto, de lo que observamos todos los días. A partir de estas estructuras se pueden revisar conceptos sobre hibridación y distribución de densidad electrónica, lo que nos conduce a la geometría y a la predicción de la forma en 3D que tendrá cualquiera de estas moléculas. La capacidad para predecir la geometría y forma de una molécula es de las habilidades más importantes que se adquiere durante este tipo de formación, el simple hecho de traducir información del papel –2D– a un objeto con volumen es una evolución de pensamiento que se busca

inducir en los alumnos que cursan alguna etapa de su formación profesional dentro de los grupos de investigación del área de química.

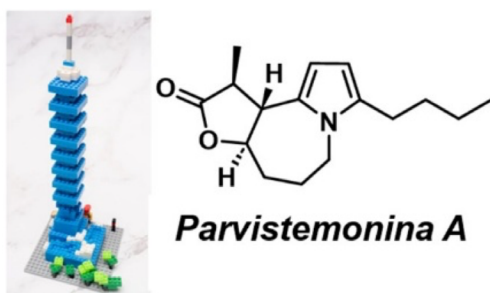
Aprender a identificar grupos funcionales y adquirir el poder de predecir su geometría como una estructura tridimensional no es muy diferente a la habilidad cognitiva con la que diferenciamos distintos objetos durante el curso de nuestra vida, así como aprendemos la forma de objetos y herramientas en nuestra cotidianidad, la habilidad de reconocer grupos funcionales, relacionarlos con una estructura geoméricamente correcta o real y predecir el uso que un sistema molecular pueda tener, será adquirida y desarrollada de la misma manera por las personas que trabajan en los laboratorios de química (Figura 3). La premisa de la formación de un esquema de pensamiento a partir de la observación e identificación de conceptos relativamente sencillos es algo que ya se ha descrito con anterioridad y se ve que tiene un profundo impacto en el aprendizaje de las ciencias exactas y su relación con los procesos cognitivos (Tümay, 2023; Vachliotis et al., 2021).



**Figura 3.** Los estudiantes adquieren una visión donde reconoce la estructura molecular y aprende a predecir sus posibles propiedades o una potencial aplicación

Otro aspecto que se desarrolla durante la ejecución de proyectos de síntesis orgánica es la adquisición de un repertorio de herramientas que sirven para proponer la construcción de moléculas complejas a través de precursores relativamente simples, en ese sentido se

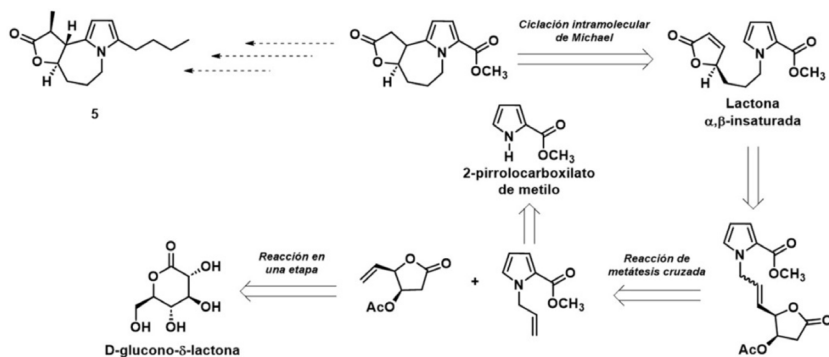
parece mucho a los juegos de Lego® (Figura 2), en este caso, las piezas están representadas por precursores simples los cuales son, en la mayoría de los casos, productos comerciales, por otro lado la forma en que se conectan depende de reglas básicas, esto es, que se puedan conectar y siguiendo una secuencia lógica que nos conduzca a la estructura -forma- final de la molécula; como ejemplo, tenemos la construcción de la parvistemonina A (**Fig. 4**) cuya síntesis fue reportada recientemente por nuestro grupo de trabajo (Marín-Cruz et al., 2024), en este contexto, una alumna de un programa de maestría de la UV fue la primera autora y como tal, su formación le permitió acceder a un arsenal de piezas y reglas para construir la molécula objetivo, de manera muy similar a como se construye una figura de Lego®.



**Figura 4.** (Izq) Estructura de un juego lego.  
(Der) Estructura de la Parvistemonina A.

Una vez con las reglas y las piezas disponibles, la persona que cultiva la síntesis orgánica dispondrá de estas piezas a su entera conveniencia, y bastará con proponer una serie de pasos que conduzcan a la estructura deseada. De manera intuitiva, podemos suponer que hay varias rutas posibles que conducen al objetivo deseado, cada uno de estos caminos ofrecerá sus ventajas y desventajas; en química se trata de lograr los mejores resultados con el menor número de pasos, esto es, la ruta más corta, dicha ruta no necesariamente es la más sencilla, plantear las rutas posibles requiere, no solo del conocimiento de la química sino también de

la habilidad para plantear todos los posibles escenarios de una ruta, incluyendo aquellos problemas que nos pueden desviar del objetivo. En el esquema 1, se muestra la ruta de síntesis que fue planteada para la parvistemonina A (**5**) (Marín-Cruz et al., 2024).



Esquema 1. Análisis retrosintético de la Parvistemonina A.

Nuevamente, el análisis retrosintético planteado en el esquema 1 puede resultar abrumador para una persona que desconoce o se inicia en el arte de la síntesis orgánica, la idea al incluir en este punto esta información trasciende al aspecto químico, lo que deseamos resaltar es la habilidad de desconectar la molécula en partes cada vez más pequeñas, de la misma forma que un juego Lego® o un rompecabezas, el químico dispone de las piezas y el arte reside en la habilidad para decidir cómo planea armarlas, de manera que se llegue al objetivo final. Este proceso cognitivo dista de ser simple y su desarrollo toma tiempo, independientemente de si se conocen las reglas -la química propiamente dicha- de este juego. La experiencia se desarrolla y se manifiesta cuando el químico es capaz de discernir los precursores más simples de los que puede partir y, sobre todo, los posibles escenarios durante la ruta planteada, dando lugar al desarrollo de la habilidad predictiva que permite considerar los posibles inconvenientes durante el ejercicio sintético. Eventualmente, un químico consolidado podrá “ver” a más de tres o cuatro pasos de distancia, esa habilidad ha

dado fama a químicos prolíficos en este arte, como lo fue Gilbert Stork, quien si bien se dice que no era particularmente bueno en el laboratorio, sus ideas y su habilidad para plantear rutas de síntesis eran sorprendentes como lo han escrito antiguos alumnos y colegas (Seeman, 2012).

Es interesante que, en este contexto, los proyectos de síntesis orgánica desarrollan aspectos cognitivos muy importantes para el ser humano, por supuesto, se espera que alguien que profundice tanto, como para alcanzar un desarrollo notable en este tipo de áreas, termine realizando una carrera académica con este enfoque, sin embargo la experiencia dice que ha habido especialistas con grado de doctor que migran a la industria, en ese escenario las habilidades que adquirieron en el campo de la síntesis total serán una excelente inversión, toda vez que la capacidad para ver problemas, descomponerlos en fragmentos pequeños y más manejables, así como encontrar soluciones razonables es valioso para cualquier profesional.

## **2.2 Síntesis de compuestos con posible actividad anticancerígena y desarrollo de nuevos materiales**

Uno de los aspectos más valiosos que tiene la investigación en química es que hoy en día es altamente multidisciplinar. Por citar algunas cifras del Instituto de Ciencias Básicas (ICB) de la UV, durante el último lustro, los laboratorios de investigación tanto en síntesis como en química orgánica y de coordinación atendieron a un total de 80 estudiantes, desde estancias de investigación y servicio social hasta estancias postdoctorales en labores de investigación. Otro aspecto destacable es la multidisciplinariedad; la población estudiantil que realizó sus labores en el Instituto de Ciencias Básicas provenía de todos los programas de licenciatura y posgrado, donde la formación en química ocupa un lugar primordial durante los primeros años de formación, de esta manera, se recibieron alumnos de las carreras de Química Clínica,

Química Farmacéutica Biológica (regiones Xalapa y Orizaba-Córdoba), Ingeniería Química, todos ellos de la UV y del programa de Ingeniería Bioquímica del Instituto Tecnológico Superior de Xalapa, mientras que a nivel posgrado se recibieron alumnos de los programas de Maestría en Ciencias de la Salud, Química Bioorgánica y el Doctorado en Ciencias Biomédicas de nuestra casa de estudios, por otra parte, los asociados postdoctorales son comisionados por la Secihti.

Estas cifras son importantes porque reflejan la multidisciplinariedad de los proyectos que se desarrollan en el ICB, en la práctica encontramos que, para desarrollar un proyecto en el laboratorio de química orgánica y de coordinación, el investigador en formación no solo debe ser solvente en sus conocimientos básicos en química, sino que, además, a medida que se ejecuta su proyecto adquirirá conocimientos de instrumentación, química teórica, bioquímica, entre otras áreas.

De los proyectos más importantes que se desarrollan en el ICB es la síntesis de moléculas con posible actividad biológica, en este tenor, el poder encontrar moléculas adecuadas como agentes terapéuticos cuya citotoxicidad se oriente de manera específica a células cancerígenas ha sido un área de suma importancia en química medicinal, en ese sentido uno de los proyectos en el ICB actualmente se trabaja en el diseño y evaluación de compuestos con posible actividad como anticancerígenos.

Dentro de las moléculas orgánicas más utilizadas para la investigación de nuevas propiedades anticancerígenas se encuentran las cumarinas. Las cumarinas o benzo- $\alpha$ -pironas son estructuras de origen natural que pertenecen a la familia de las cromonas; químicamente son compuestos versátiles y que se pueden transformar fácilmente en otros derivados, enriqueciendo con esto la variedad de estructuras por estudiar. Las cumarinas se encuentran ampliamente distribuidas en plantas, bacterias, hongos (Anand et al., 2012; Razavi, 2011; Thakur et al., 2015). Se ha descrito

que las cumarinas, tanto naturales como sintéticas, exhiben una amplia gama de propiedades biológicas como compuestos antiinflamatorios, antimicrobianos, antivirales, antioxidantes, antialérgicas, antiasmáticas, antinociceptivas, antidiabéticas, antidepresivas y especialmente antitumorales (Lin et al., 2006; Pari & Rajarajeswari, 2009). Nuestro grupo de investigación ha estudiado y descrito los índices de reactividad global y local de derivados hidroxilados de cumarinas con objeto de ampliar la comprensión y el poder predictivo de su actividad proapoptótica (Guerrero et al., 2019). La aplicación de derivados de cumarinas como anticancerígenos se vuelve especialmente importante cuando además de su actividad biológica se caracterizan por una baja o nula nefrotoxicidad, hepatotoxicidad, cardiotoxicidad y otros efectos secundarios. En este contexto, nuestro grupo de investigación se dedica a diseñar nuevos candidatos a anticancerígenos y los evalúa frente a líneas celulares de relevancia para el Instituto Nacional de Cáncer (NCI) (Figura 5) (Sosa-Ortiz et al., 2025). Cuando es posible los compuestos que se diseñan en nuestra entidad académica se evalúan en otras posibles aplicaciones de relevancia para la sociedad, como, en el caso de los compuestos de la Figura 5, como posibles antimicrobianos, en especial en sepsis de bacterias multirresistentes a los antibióticos actuales.

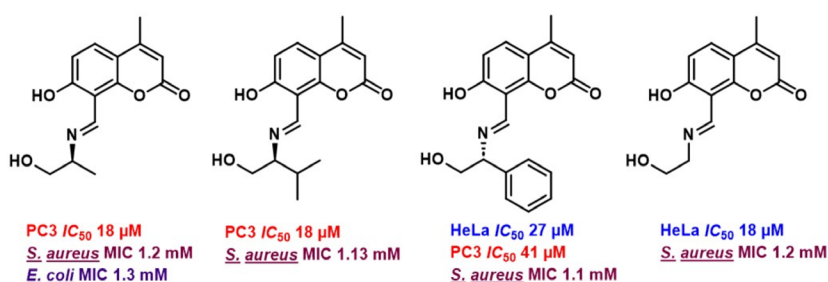


Figura 5. Algunos de los compuestos desarrollados por nuestro grupo de investigación en el 2025.

Las cumarinas, además de exhibir propiedades biológicas, presentan un fenómeno muy interesante derivado de la distribución de su densidad electrónica: son fluorescentes. La propiedad de la fluorescencia ha permitido el desarrollo de muchísimos dispositivos de que la sociedad goza diariamente: teléfonos plegables, televisores de OLED, terapia fotodinámica, etc., y es en el diseño de este tipo de aplicaciones que se genera una sinergia muy importante con la física (Figura 6). En la figura 6 se aprecian las reacciones base que usamos en el grupo de investigación para sintetizar compuestos fluorescentes, partiendo de un precursor relativamente simple, como el que está en el recuadro, se exploran y estandarizan reacciones que nos conducen a productos más complejos que exhiben ese comportamiento fluorescente que tanto buscamos, ese comportamiento se cuantifica, tanto por medio de instrumentos como mediante métodos de química teórica y así buscamos comprender y modular la respuesta.

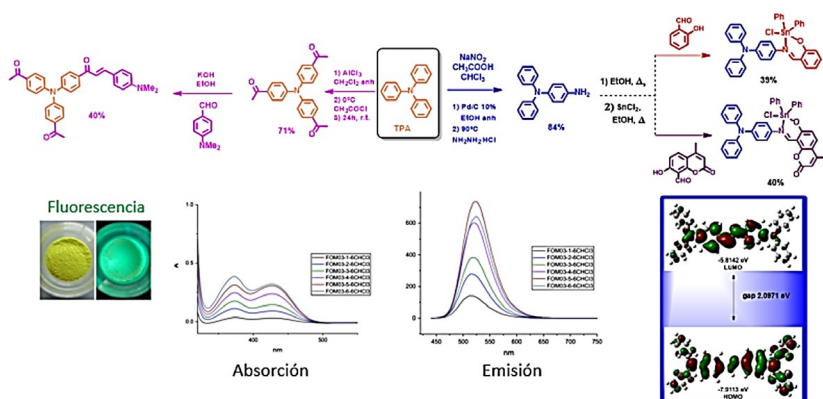


Figura 6. Moléculas con propiedades fluorescentes que se estudian en el ICB.

## 2.3 Desarrollo de metodologías de síntesis mediante catálisis enzimática

La generación de fuentes de energía alternativas mediante metodologías congruentes con los principios de la química verde es ya una necesidad tecnológica para el ser humano. Uno de los enfoques más recientes para realizar transformaciones sintéticas de utilidad se basa en el uso de la maquinaria enzimática de hongos y plantas, lo cual, constituye uno de los principios fundamentales de la biocatálisis, aproximación que, poco a poco ha ido ganando terreno en ciencia básica y aplicada con el fin de generar soluciones significativas y económicamente asequibles para el ser humano. En este contexto, las lipasas son enzimas que catalizan la hidrólisis de triacilglicerolos a ácidos grasos y glicerol y se encuentran en una gran variedad de plantas y animales (Brahmachari, 2017; Gamayurova et al., 2021). Una peculiaridad de estas enzimas radica en su estabilidad en disolventes orgánicos por lo que pueden catalizar reacciones de esterificación en medios no acuosos. De esta manera, si en lugar de una reacción de hidrólisis, las lipasas se utilizan para esterificar o transesterificar ácidos grasos se puede generar biodiesel a partir de grasas animales y, especialmente, a partir de aceite de cocina usado y otros desechos identificados como residuos altamente contaminantes para el agua y que son generados por toneladas a nivel mundial (Gamayurova et al., 2021). Las lipasas son hidrolasas que, además de su función natural, tienen la peculiaridad de ser estables en disolventes no acuosos, lo que se sabe, las hace capaces de catalizar reacciones de esterificación en medio no acuoso. En este contexto, se sabe que, una planta que contiene lipasas en altas concentraciones es la *Ricinus communis*, o como se le conoce ricino o higuera, planta arbustiva de la familia *Euphorbiaceae*, planta que crece en un amplio intervalo de temperatura, por tanto, se le puede encontrar en una gran cantidad de regiones a lo largo del mundo y que facilita la hidrólisis de lípidos durante la germinación de la planta. Pese a ser ampliamente conocida, su aplicación en las

reacciones de esterificación todavía no se encuentra plenamente descrita, de esta manera, la exploración de su potencial para la generación de biodiesel representa una oportunidad para generar conocimiento en el área básica y una potencial aplicación que, en algún momento puede ser trasladada a nivel industrial siendo este un avance importante desde el punto de vista económico, ambiental, etc.

Un problema particularmente importante en nuestros días es la generación de energía en un contexto donde la explotación y uso de combustibles fósiles ya no es una opción viable, ya sea por el agotamiento de este recurso o por la contaminación y el deterioro ambiental producto de su explotación desmedida, lo que provoca una gran emisión de gases de efecto invernadero, responsables, entre otras cosas, del calentamiento global. De esta manera y como alternativa a los combustibles fósiles, la generación de biodiesel se ha convertido en una aproximación valiosa para el aprovechamiento de los propios residuos que genera el ser humano en la búsqueda de combustibles alternativos.

El *biodiesel* es una opción viable como un nuevo combustible, económico y menos contaminante con respecto a los combustibles fósiles, el biodiesel está hecho de ésteres de ácidos grasos lo que se puede obtener a partir de grasas animales y otros desechos de la industria alimenticia, este tipo de combustibles son relativamente renovables, no tóxicos, biodegradables y económicos dado que se pueden obtener precisamente de residuos como el aceite de cocina usado. De esto se desprende la importancia de encontrar metodologías simples para la producción de estos combustibles a partir de materias primas asequibles o producto del quehacer humano. El aceite de cocina y, en general las grasas animales de desecho son una fuente muy importante de contaminación ambiental, prácticamente no existe ningún asentamiento humano donde no se produzcan grasas de desecho, de esa manera, en muchas cocinas y restaurantes se produce una gran cantidad de residuos de grasas y aceites quemados, los cuales, por ignorancia

o negligencia son vertidos sin más cuidado al drenaje, la tierra o algún cuerpo de agua, ésta situación es una fuente muy importante de contaminación ya que se sabe que una pequeña cantidad de aceite puede contaminar de manera irremediable un cuerpo de agua. Siendo este un problema ambiental, es posible que, dichos residuos se utilicen económica y eficientemente.

### **3. El proceso formativo a través de la investigación**

En los últimos años, la relación entre pensamiento científico y sociedad ha sido un tema recurrente, tanto en la literatura especializada como en la agenda pública. En otras contribuciones se ha puntualizado la importancia del aprendizaje de ciencias duras, extendiendo esta formación más allá de la práctica profesional, se trata de promover el desarrollo de una estructura de pensamiento que se adquiere durante la construcción de una formación en campos relacionados con la ciencia, desarrollando la capacidad de observación, análisis y de respuesta, ya sea proponiendo una solución a un problema claramente definido o desarrollando la capacidad de un aprendizaje significativo, con estas capacidades la ciencia básica cristaliza y cimienta una parte esencial en la formación de la estructura de pensamiento del ser humano. En este contexto, la docencia como auxiliar del aprendizaje es algo muy común, especialmente en la estructura escalonada propia de la educación superior y, sin embargo, es un fenómeno que no se trata de forma explícita en el contexto científico.

La difusión de las actividades de investigación, la divulgación de la ciencia y la enseñanza de disciplinas científicas a estudiantes de educación básica forma parte de la agenda gubernamental en términos de una formación incluyente a través de la apropiación social del conocimiento y en este contexto, la literacidad científica ha surgido como una necesidad mundial, donde la premisa básica es que una formación científica básica es un elemento necesario para que la comunidad comprenda de los adelantos científicos de

relevancia para la sociedad moderna, así como sus implicaciones sociales, ecológicas, etc (Kelp et al., 2023).

En nuestra actualidad, la literacidad científica es una necesidad que se justifica en la necesidad social de contar con las herramientas mínimas para tomar en consideración y, si es posible, discriminar entre la enorme cantidad de información que surge de medios de comunicación: basta con examinar plataformas como TikTok®, youtube®, etc., donde confluyen en el mismo medio, divulgadores sin ninguna formación científica y otros altamente especializados. Se infiere que, con la adquisición de esta habilidad, el individuo será competente para, en un futuro, tomar decisiones en temas críticos para la agenda social como lo son el cambio climático, la biotecnología y otros temas que dependen de un profundo trasfondo científico. Hay que recordar que, en nuestra sociedad, la toma de decisiones normalmente se lleva a cabo por personal sin formación científica (Kelp et al., 2023).

Con esto en mente, uno de los retos es la falta de interés en temas científicos, especialmente en la población de educación básica, en la cual las ciencias duras son vistas como disciplinas difíciles y aburridas, lo que se acentúa en países en vías de desarrollo con poblaciones de bajos recursos, esto incrementa los índices de deserción y, consecuentemente, en la disminución de la matrícula en programas de licenciatura de naturaleza científica (Reyes, 2023).

Es por ello que se han establecido varias estrategias para involucrar a la comunidad en temas científicos y favorecer el desarrollo de este tipo de competencias, por ejemplo, el diseño de campamentos científicos (Reyes, 2023), el desarrollo de técnicas novedosas basadas en foros de discusión de temas científicos y la enseñanza entre pares académicos como un recurso para la adquisición de conocimiento y el desarrollo de competencias para la formación científica y la fusión de ciencias duras con artes como la literatura y las artes plásticas, contribuyendo a lograr la literacidad científica de un número cada vez mayor de personas.

Todo parece indicar que la formación científica en educación básica es muy importante para la adquisición de una literacidad en este tipo de temas, aunado a lo anterior, este elemento forma parte de la agenda nacional y mundial en temas de educación y desarrollo social. Para lograr este fin, últimamente se ha involucrado a estudiantes de licenciatura y posgrado como facilitadores de este conocimiento, la premisa básica es que los estudiantes de ciencias duras suelen estar involucrados en la ejecución de proyectos de investigación y su participación en el proceso formativo de su comunidad sirve de complemento a una formación sólida que se traduce en conocimientos complementarios a los adquiridos durante los estudios de licenciatura y que suelen consolidar habilidades fundamentales para el ejercicio profesional, especialmente con un enfoque a una carrera relacionada con la investigación y el desarrollo tecnológico. Así, durante la última década se ha vinculado la investigación con la docencia en ciencias exactas (Bond-Robinson & Rodriques, 2006) generando así un espacio donde especialistas, estudiantes de posgrado y licenciatura pueden abonar directamente al desarrollo social. En cuanto a los estudiantes de posgrado que participan, éstos normalmente tienen cierta orientación a una carrera académica, de manera que esta actividad puede favorecer el desarrollo de habilidades relacionadas con la comunicación, el liderazgo y la adquisición de un sentido de responsabilidad social. Respecto a estudiantes de pregrado, la necesidad de acercar su labor a un público sin formación científica es un reto que les brinda la oportunidad de complementar el conocimiento adquirido durante sus estudios de licenciatura y su estancia en sus respectivos grupos de investigación asimilando términos, conceptos y habilidades.

Un enfoque muy atractivo en la actualidad es la promoción de actividades que buscan alimentar la curiosidad de las personas por conocer la ciencia, entre estas, los días de puertas abiertas son una excelente alternativa para estos fines. Las jornadas de puertas abiertas permiten a un público no especializado acudir a centros e institutos e interactuar con estudiantes de todos los niveles

-licenciatura, maestría y doctorado- así como el personal académico -investigadores postdoctorales y de tiempo completo- conociendo y manipulando los objetos de estudio y la infraestructura científica de la entidad académica receptora, la convivencia entre asistentes, alumnos y académicos tiene la intención de sembrar entre los participantes la semilla de la curiosidad científica así como, en los expositores, fortalecer la apropiación del conocimiento científico y mejorar su habilidad como divulgadores de la ciencia (Figura 7).



**Figura 7.** Día de puertas abiertas de los Laboratorios de Química – ICB (2024).

Tras varios eventos organizados, sabemos que, para los asistentes, siempre es una experiencia enriquecedora. Para los expositores, el modelo es simple: los alumnos que participan en este rol deben explicar los fenómenos que muestran, siendo esta experiencia, un elemento invaluable para la consolidación de sus habilidades científicas y la verdadera adquisición de sus conocimientos. Para los investigadores es una oportunidad excelente para aprender a transmitir sus conocimientos a un público no especialista, habilidad difícil de desarrollar. Es así como la literacidad científica no es un elemento unilateral, es un fenómeno en el que todos los actores participan, al final una formación científico-humanista de nuestra sociedad es la mejor inversión.

## 4. Conclusiones

La química es una ciencia fundamental para el ser humano, es, como lo han mencionado muchos autores la ciencia central y es un campo científico que será responsable de dar solución a los enormes problemas que enfrentamos en materia de salud, energía y suficiencia alimentaria en los años venideros. Para dar respuesta a estas necesidades, la química debe reinventarse como un campo multidisciplinario, donde la interacción con integrantes de los equipos de salud, del sector agropecuario, ingenieros y muchos otros expertos, incluyendo especialistas en políticas públicas, colaboren para darle al químico la visión y contexto necesarios para proponer soluciones efectivas y viables en su contexto.

La formación científica brinda, además de los conocimientos técnicos, el desarrollo de un esquema de pensamiento que debe permear a toda la sociedad. Se trata de formar ciudadanos críticos y reflexivos, ambos atributos que son igualmente valiosos en la vida y en el desempeño profesional, de esta manera es deseable que el individuo desarrolle la capacidad de cuestionar la información que recibe para mejorar su toma de decisiones en todos los ámbitos de su vida.

## 5. Referencias

Anand, P., Singh, B., & Singh, N. (2012). A review on coumarins as acetylcholinesterase inhibitors for Alzheimer's disease. *Bioorganic and Medicinal Chemistry*, 20(3), 1175–1180. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2011.12.042>

Beatriz, A., Mondino, M. G., & de Lima, D. P. (2022). Lactams, Azetidines, Penicillins, and Cephalosporins: An Overview on the Synthesis and Their Antibacterial Activity. In *N-Heterocycles: Synthesis and Biological Evaluation* (pp. 97–142). [https://doi.org/10.1007/978-981-19-0832-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-19-0832-3_3)

Bond-Robinson, J., & Rodriques, R. A. B. (2006). Catalyzing graduate teaching assistants' laboratory teaching through design research. *Journal of Chemical Education*, 83(2), 313–324. <https://doi.org/10.1021/ed083p313>

Brahmachari, G. (2017). Lipase-Catalyzed Organic Transformations: A Recent Update. In *Biotechnology of Microbial Enzymes: Production, Biocatalysis and Industrial Applications* (pp. 297–321). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803725-6.00013-3>

Brock, W. H. (2016). The History of Chemistry: A Very Short Introduction. In *The History of Chemistry: A Very Short Introduction*. <https://doi.org/10.1093/acrade/9780198716488.001.0001>

Brook, K., Bennett, J., & Desai, S. P. (2017). The Chemical History of Morphine: An 8000-year Journey, from Resin to de-novo Synthesis. *Journal of Anesthesia History*, 3(2), 50–55. <https://doi.org/10.1016/j.janh.2017.02.001>

DeGlopper, K. S., Russ, R. S., Sutar, P. K., & Stowe, R. L. (2023). Beliefs versus resources: a tale of two models of epistemology. *Chemistry Education Research and Practice*, 24(2), 768–784. <https://doi.org/10.1039/d2rp00290f>

Fink, T., Bruggesser, H., & Reymond, J. L. (2005). Virtual exploration of the small-molecule chemical universe below 160 daltons. *Angewandte Chemie - International Edition*, 44(10), 1504–1508. <https://doi.org/10.1002/anie.200462457>

Gamayurova, V. S., Zinov'eva, M. E., Shnaider, K. L., & Davletshina, G. A. (2021). Lipases in Esterification Reactions: A Review. *Catalysis in Industry*, 13(1), 58–72. <https://doi.org/10.1134/S2070050421010025>

Guerrero, T., Torices-Saucedo, A., Castro, M. E., Juárez-Cerrillo, S. F., Meléndez, F. J., Matus, M. H., & Durand-Niconoff, J. S. (2019). Global reactivity indexes and nonparametric statistics in the study of the proapoptotic activity of coumarins. *International Journal of Quantum Chemistry*, 119(11), e25902. <https://doi.org/10.1002/qua.25902>

Hyttinen, H., Toom, A., & Shavelson, R. J. (2019). Enhancing scientific thinking through the development of critical thinking in higher education. In *Redefining Scientific Thinking for Higher Education: Higher-Order Thinking, Evidence-Based Reasoning and Research Skills* (pp. 59–78). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-24215-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-24215-2_3)

Ippoliti, F. M., Chari, J. V., & Garg, N. K. (2022). Advancing global chemical education through interactive teaching tools. In *Chemical Science* (Vol. 13, Issue 20, pp. 5790–5796). <https://doi.org/10.1039/d2sc01881k>

Janoušková, S., Pyskatá Rathouská, L., Žák, V., & Urválková, E. S. (2023). The scientific thinking and reasoning framework and its applicability to manufacturing and services firms in natural sciences. *Research in Science and Technological Education*, 41(2), 653–674. <https://doi.org/10.1080/02635143.2021.1928048>

Kelp, N. C., McCartney, M., Sarvary, M. A., Shaffer, J. F., & Wolyniak, M. J. (2023). Developing Science Literacy in Students and Society: Theory, Research, and Practice. *Journal of Microbiology & Biology Education*, 24(2), 1–4. <https://doi.org/10.1128/jmbe.00058-23>

Lin, C. M., Huang, S. T., Lee, F. W., Kuo, H. S., & Lin, M. H. (2006). 6-Acyl-4-aryl/alkyl-5,7-dihydroxycoumarins as anti-inflammatory agents. *Bioorganic and Medicinal Chemistry*, 14(13), 4402–4409. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2006.02.042>

Maier, M. (2008). Syntheses of Morphine. In *Organic Synthesis Set*. <https://doi.org/10.1002/9783527620784.ch38a>

Marín-Cruz, E., Tovar-Miranda, R., Romero-Ibáñez, J., Pérez-Bautista, J. A., Cordero-Vargas, A., Mendoza-Espinosa, D., Meza-León, R. L., & Cortezano-Arellano, O. (2024). Chiron approach toward the synthesis of the fused tricyclic core of epi-parvistemonine A. *Carbohydrate Research*, 545, 109290. <https://doi.org/10.1016/J.CARRES.2024.109290>

Min, L., Han, J. C., Zhang, W., Gu, C. C., Zou, Y. P., & Li, C. C. (2023). Strategies and Lessons Learned from Total Synthesis of Taxol. In *Chemical Reviews* (Vol. 123, Issue 8, pp. 4934–4971). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00763>

Pari, L., & Rajarajeswari, N. (2009). Efficacy of coumarin on hepatic key enzymes of glucose metabolism in chemical induced type 2 diabetic rats. *Chemico-Biological Interactions*, 181(3), 292–296. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2009.07.018>

Razavi, S. M. (2011). Plant coumarins as allelopathic agents. *International Journal of Biological Chemistry*, 5(1), 86–90. <https://doi.org/10.3923/ijbc.2011.86.90>

Reyes, R. L. (2023). Exploring Science Literature: Integrating Chemistry Research with Chemical Education. *Journal of Chemical Education*, 100(6), 2303–2311. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c00101>

Ruddigkeit, L., Van Deursen, R., Blum, L. C., & Reymond, J. L. (2012). Enumeration of 166 billion organic small molecules in the chemical universe database GDB-17. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 52(11), 2864–2875. <https://doi.org/10.1021/ci300415d>

Ruthenberg, K., & Mets, A. (2020). Chemistry is pluralistic. *Foundations of Chemistry*, 22(3), 403–419. <https://doi.org/10.1007/s10698-020-09378-0>

Secretaría de Ciencia, H. T. e I. M. (2025). Padrón de beneficiarios - SECIHTI. <https://Secihti.Mx/Sistema-Nacional-de-Investigadores/Padron-de-Beneficiarios/>.

Seeman, J. I. (2012). Gilbert stork: In his own words and in the musings of his friends. *Angewandte Chemie - International Edition*, 51(12), 3012–3023. <https://doi.org/10.1002/anie.201200033>

Seeman, J. I., & House, M. C. (2022). “for Its Size, the Most Complex Natural Product Known.” Who Deserves Credit for Determining the Structure of Strychnine? *ACS Central Science*, 8(6), 672–681. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.1c01348>

Sosa-Ortiz, G. A., Ortiz-Blanco, E., Mendoza-De la Cruz, M., Tovar-Miranda, R., Juárez, E., & Guerrero, T. (2025). Synthesis, DFT study and MTT evaluation of new chiral Schiff bases derived from 7-hydroxi-4-methylcoumarin.

Thakur, A., Singla, R., & Jaitak, V. (2015). Coumarins as anticancer agents: A review on synthetic strategies, mechanism of action and SAR studies. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 101, 476–495. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2015.07.010>

Tümay, H. (2023). Systems Thinking in Chemistry and Chemical Education: A Framework for Meaningful Conceptual Learning and Competence in Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 100(10), 3925–3933. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c00474>

Vachliotis, T., Salta, K., & Tzougraki, C. (2021). Developing Basic Systems Thinking Skills for Deeper Understanding of Chemistry Concepts in High School Students. *Thinking Skills and Creativity*, 41, 100881. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2021.100881>

Vincent-Ruz, P. (2020). What Does It Mean to Think like a Chemist? In *ACS Symposium Series* (Vol. 1365, pp. 55–79). <https://doi.org/10.1021/bk-2020-1365.ch005>

Zimmerman, C. (2007). The development of scientific thinking skills in elementary and middle school. *Developmental Review*, 27(2), 172–223. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2006.12.001>