



Implementación de una secuencia didáctica basada en la autenticación del Códice Maya de México en el programa de Ciencia Forense de la UNAM

Implementation of a Didactic Sequence Based on the Authentication of the Maya Codex of Mexico in the Forensic Science Program at UNAM

Ana María Sosa Reyes¹, Luis Jiro Suzuri-Hernández¹, Miguel Ángel Martínez Carrillo², Zoraida García-Castillo¹, Alexa Villavicencio Queijeiro¹ y Corina Solis Rosales³

Resumen

El caso de autenticación del Códice Maya de México se utilizó como eje integrador de una secuencia didáctica interdisciplinaria en el primer año de la Licenciatura en Ciencia Forense. La propuesta articuló actividades en Química General, Introducción a la Ciencia Forense y Nociones de Derecho, con el propósito de desarrollar habilidades de análisis, argumentación y aplicación de conceptos científicos y legales. A partir del estudio del caso real del código, se abordaron temas como conceptos químicos fundamentales, propiedades ácido-base, cromatografía en capa fina, análisis isotópico y marco jurídico del patrimonio arqueológico en México. Como herramienta central se empleó el diagrama heurístico de Gowin (V de Gowin), que permitió al estudiantado vincular conceptos, métodos y preguntas de investigación. La estrategia promovió la integración entre teoría y práctica en un contexto significativo, fortaleciendo la comprensión interdisciplinaria y el uso del lenguaje científico y legal en situaciones simuladas con relevancia profesional.

Palabras clave: Códice Maya de México, enseñanza interdisciplinaria, ciencia forense, química educativa, patrimonio arqueológico.

Abstract

The authentication case of the Maya Codex of Mexico was used as the integrative core of an interdisciplinary didactic sequence in the first year of the Bachelor's program in Forensic Science. The proposal coordinated activities in General Chemistry, Introduction to Forensic Science, and Legal Foundations, aiming to develop students' skills in analysis, argumentation, and application of scientific and legal concepts. Based on the study of the actual codex case, topics included fundamental chemical concepts, acid-base properties, thin-layer chromatography, isotopic analysis, and the legal framework for archaeological heritage in Mexico. The central tool was Gowin's heuristic diagram (Gowin's V), which allowed students to link concepts, methods, and research questions. The strategy promoted the integration of theory and practice in a meaningful context, enhancing interdisciplinary understanding and the use of scientific and legal language in professionally relevant simulated situations.

Keywords : Maya Codex of Mexico, interdisciplinary teaching, forensic science, chemistry education, archaeological heritage.

CÓMO CITAR:

Sosa Reyes, A. M., Suzuri-Hernández, L. J., Martínez Carrillo, M. Á., García-Castillo, Z., Villavicencio Queijeiro, A., y Solis Rosales, C. (2025, noviembre). Implementación de una secuencia didáctica basada en la autenticación del Códice Maya de México en el programa de Ciencia Forense de la UNAM. *Educación Química*, 36(Número especial). <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2025.4.91826e>

¹ Escuela Nacional de Ciencias Forenses, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

² Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

³ Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Introducción

El Códice Maya de México (CMM) es un documento prehispánico único cuya autenticidad fue cuestionada durante décadas. La confirmación, en 2018, de que se trata de un documento genuino, conseguida mediante una investigación interdisciplinaria que integró el análisis químico de pigmentos, estudios sobre su manufactura y dataciones por radiocarbono y espectrometría de masas con aceleradores, entre otros estudios, lo fechó como el manuscrito más antiguo del continente americano (Martínez del Campo Lanz, 2018). Esta investigación no sólo aportó conocimiento histórico, sino que también constituyó un ejemplo sobresaliente de trabajo científico aplicado a un objeto con un valor cultural muy elevado.

Desde la didáctica de la química, casos como el del CMM representan un contexto auténtico a partir del cual enseñar principios analíticos, técnicas instrumentales y fundamentos de datación por radioisótopos. Diversas experiencias pedagógicas, como las reunidas en *Contextualizing Chemistry in Art and Archaeology* (Braun y Labby, 2021), han sugerido el potencial educativo de estos enfoques, en los que la química adquiere sentido al resolver problemas reales relacionados con el arte y la arqueología.

Con estos antecedentes, se diseñó una secuencia didáctica para estudiantes de los primeros semestres de la Licenciatura en Ciencia Forense (LCF) de la Escuela Nacional de Ciencias Forenses (ENaCiF) de la UNAM, con el CMM como eje articulador. La propuesta buscó integrar la enseñanza de conceptos químicos con nociones de patrimonio cultural, fomentar el análisis interdisciplinario de un fenómeno y desarrollar habilidades propias de la profesión forense. En un entorno como el de la ENaCiF, donde tanto el profesorado como el estudiantado provienen de disciplinas diversas (el primero, por estar conformado por una amplia gama de especialistas en distintas áreas de las ciencias naturales y sociales, las humanidades y el derecho; el segundo, por ingresar indirectamente a la LCF desde las Facultades de Química, Psicología, Ciencias, Filosofía y Letras, Medicina y Derecho), esta experiencia didáctica ofreció la oportunidad de vincular saberes científicos con problemáticas legales y culturales relevantes, consiguiendo, además, llevar a la práctica metas planteadas en el Plan de Estudios de la LCF, en particular, la formación de personal con una sólida formación en metodología de la investigación aplicable a casos de relevancia jurídica.

Los resultados obtenidos sugieren que el uso de contextos culturalmente significativos es una alternativa viable para apoyar al estudiantado en la comprensión de conceptos químicos, así como para procurar su formación interdisciplinaria.

Antecedentes

El CMM, antes conocido como Grolier, es el único códice de origen maya descubierto en el siglo XX. Está conformado por diez páginas elaboradas en amate, recubiertas con una capa de yeso por ambas caras, con representaciones calendáricas vinculadas con los ciclos sinódicos de Venus en sus anversos. Se exhibió al público por primera vez en 1971 en el Club Grolier de Nueva York y, desde entonces, suscitó controversias debido a la falta de un contexto arqueológico en el que ubicarlo y al uso de pigmentos que, en ese momento, parecían modernos, lo que dio pie a un prolongado debate académico sobre su autenticidad.

En 2016, un equipo multidisciplinario coordinado por el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) llevó a cabo una investigación exhaustiva que combinó el análisis iconográfico con métodos científicos como la datación por radiocarbono y la caracterización química de los pigmentos y de las capas de yeso. Esta aproximación integral al estudio del códice, documentada en la obra *El Códice Maya de México, antes Grolier* (Martínez del Campo Lanz, 2018), permitió confirmar la autenticidad del documento y situar cronológicamente su creación en el periodo comprendido entre los años 1021 y 1154 d.C. La investigación reconstruyó tanto los orígenes como la materialidad de este objeto histórico, aportando evidencia de carácter forense que demostró que no se trataba de una falsificación, y que lo ubicó bajo la protección de la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas, que norma la investigación, conservación, restauración y recuperación de monumentos arqueológicos, artísticos e históricos del país.

El enfoque adoptado en la secuencia didáctica inspirada en el CMM se centró en el análisis de materiales comprometidos —es decir, de los cuales existe muy poca cantidad o se encuentran contaminados y/o degradados—, tal como suele ocurrir con las muestras forenses en un delito, permitiendo aplicar métodos empleados en condiciones similares a las que enfrenta la ciencia forense en contextos reales.

En el ámbito educativo, particularmente en la enseñanza de la química, existe un creciente interés por emplear contextos culturales y artísticos como recursos didácticos. Tal enfoque ha demostrado ser eficaz para promover la comprensión conceptual e involucrar activamente al estudiantado en la enseñanza-aprendizaje. Obras como *Contextualizing Chemistry in Art and Archaeology* (Braun y Labby, 2021) ofrecen ejemplos concretos de cómo la enseñanza de la química puede propiciarse a través del análisis de objetos artísticos e históricos, mientras que, por su parte, autores pioneros como Lambert (1983) han consolidado la arqueometría como un campo fértil para la enseñanza interdisciplinaria.

En México, el programa de Licenciatura en Ciencia Forense de la ENaCiF (LCF, 2013) representa un caso singular de formación científica con orientación social y jurídica. Su creación en 2013 respondió a la necesidad nacional de contar con profesionales capaces de analizar e interpretar con rigor científico evidencia relacionada con un delito (García Castillo y Bravo-Gómez, 2017), especialmente tras la implementación del nuevo sistema de justicia penal de corte adversarial en 2016 (Romero Guerra, 2016). Sin embargo, implementar este tipo de formación universitaria enfrenta el reto de integrar saberes diversos en contextos significativos: la escasez de materiales diseñados específicamente para este perfil profesional ha motivado la búsqueda de estrategias innovadoras que permitan abordar la enseñanza de la química desde una perspectiva culturalmente pertinente y de manera interdisciplinaria (Romo et al., 2017a; Romo et al., 2017b; Sosa, 2017; Sosa et al., 2022a; Sosa et al., 2022b).

Objetivo

Este trabajo presenta el diseño e implementación de una secuencia didáctica basada, en parte, en el proceso de autenticación del CMM, cuyo propósito principal es promover una comprensión más profunda del razonamiento científico y de las habilidades procedimentales empleadas en investigaciones forenses interdisciplinarias, especialmente aquellas basadas en el análisis de evidencias con implicaciones legales.

En términos de competencias, la propuesta buscó desarrollar:

- **Competencias conceptuales:** dominio de conceptos químicos clave (mezcla, sustancia, elemento y compuesto), comprensión de nociones jurídicas aplicables al patrimonio cultural y fundamentos de análisis forense.
- **Competencias procedimentales:** aplicación de técnicas analíticas (cromatografía en capa fina, análisis de tintes naturales, elaboración y análisis de la V de Gowin), formulación de hipótesis y fundamentación de conclusiones.
- **Competencias argumentativas y comunicativas:** elaboración de informes y dictámenes técnicos, presentaciones orales estructuradas y exposición de resultados a públicos no especializados.
- **Competencias colaborativas:** trabajo en equipos interdisciplinarios, intercambio de perspectivas, negociación de interpretaciones y consenso en la construcción de conclusiones.

Asimismo, la secuencia buscó fomentar el trabajo colaborativo entre disciplinas, destacar la importancia de que las afirmaciones científicas se sustenten en evidencia, establecer conexiones entre hallazgos, métodos y teorías provenientes de distintas áreas del conocimiento —en particular, de la química— en el marco de una indagación forense no convencional y, por último, identificar y evaluar las competencias del estudiantado para aplicar y explicar conceptos y procedimientos químicos.

Metodología

La secuencia didáctica fue implementada durante el primer semestre de la LCF con un grupo de 36 estudiantes de la Generación 2022. Las actividades que la integran se realizaron en distintos momentos a lo largo de tres asignaturas: *Introducción a la Ciencia Forense*, *Química General* y *Nociones de Derecho*. El diseño de la secuencia buscó fomentar la integración de conceptos, procedimientos y marcos teóricos de las tres disciplinas, desafiando al estudiantado a abordar un problema genuino con implicaciones legales, promoviendo la formulación de argumentos fundamentados y el trabajo colaborativo, como sería el caso en un equipo de profesionales forenses responsables de una investigación real.

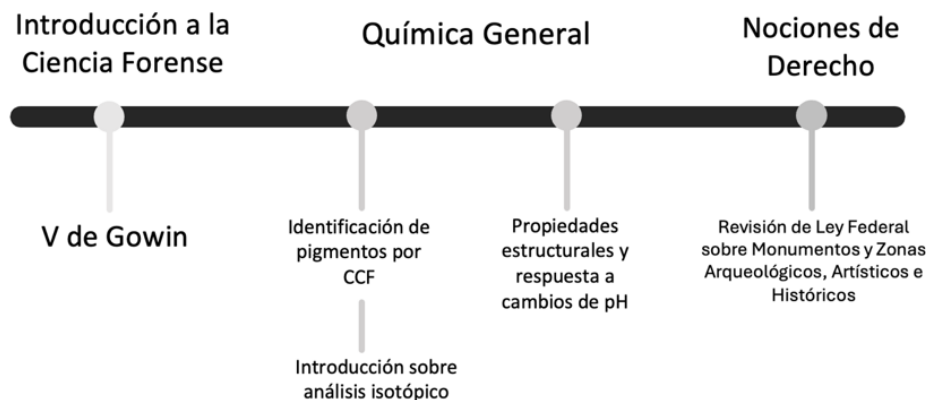


FIGURA 1. Diagrama de la secuencia didáctica, señalando las actividades realizadas con estudiantes de primer semestre de LCF, empleando el CMM como contexto.

Introducción a la Ciencia Forense

Planteamiento

La secuencia inició en la asignatura de *Introducción a la Ciencia Forense*, donde, para introducir a los y las estudiantes al tema de estudio y captar su atención, se les proporcionó un texto narrativo titulado “La controversia sobre el Códice Maya de México”, que narra el caso del CMM como una historia de intriga y controversia académica, un poco a la manera de un relato detectivesco, planteando preguntas sobre el origen del código, su autenticidad y las disputas entre grupos de expertos, a fin de despertar su curiosidad y motivarlos a participar activamente en el resto de la secuencia didáctica.

El texto, adaptado a partir de la información publicada por Martínez del Campo Lanz (2018) y Cummings (2017), narra cómo el CMM fue exhibido por primera vez en 1971 en el Club Grolier de Nueva York, generando desde entonces un intenso debate en torno a su autenticidad. A través de anécdotas sobre los personajes involucrados, tales como Michael Coe, Josué Sáenz y otros especialistas, se describe el contexto en el que el código fue descubierto, los cuestionamientos que surgieron sobre su legitimidad y las motivaciones políticas y personales que influyeron en la discusión. Asimismo, se explica que, para resolver la controversia, el INAH organizó un estudio interdisciplinario, cuyos peritajes constituyeron el material de base de la secuencia didáctica implementada en el aula. Esta estrategia narrativa permitió introducir al estudiantado en el análisis forense real desde una perspectiva más accesible y estimulante que la tradicional de comenzar con el contenido de la asignatura.

Actividad

A cada equipo de aproximadamente seis estudiantes se le asignó la lectura de uno de los capítulos del libro de Martínez del Campo Lanz (2018), que, a su manera, constituyen el dictamen de una especialidad diferente sobre el CMM, solicitándoles que construyeran un diagrama heurístico de Gowin, o V de Gowin, una herramienta que facilita la integración entre la comprensión teórica de la investigación y la práctica del trabajo en el laboratorio. Tal como la describe Izquierdo Aymerich (1994), a partir del libro original de Novak y Gowin (1984), la V de Gowin es una representación visual de la estructura del conocimiento sobre los objetos y los acontecimientos del mundo. Este conocimiento se construye a partir de preguntas formuladas dentro de un marco conceptual, constituido por principios y teorías, desde los cuales se planifican las acciones necesarias para dar respuesta a dichas preguntas.

Recapitulando, los elementos clave de una V de Gowin son: 1) la pregunta de investigación; 2) los objetos o eventos que se estudian; 3) los aspectos metodológicos, que comprenden cómo se lleva a cabo la investigación, es decir, cuáles son los registros obtenidos, las transformaciones de los datos y las interpretaciones de los resultados; y 4) los aspectos conceptuales, entre los que se incluyen teorías, conceptos y principios que brindan el sustento teórico a una investigación. Durante el análisis, es fundamental destacar la correspondencia tanto de los aspectos conceptuales como de los metodológicos con respecto a la pregunta de investigación y al fenómeno bajo estudio. En la Figura 2 se presenta un ejemplo de las V de Gowin construidas por el estudiantado.

FIGURA 2. V de Gowin de uno de los equipos de estudiantes en la clase de *Introducción a la Ciencia Forense*, elaborada a partir del análisis químico practicado a una muestra de los pigmentos del CMM. En general, los y las estudiantes fueron capaces de identificar correctamente los diferentes apartados de la V de Gowin después de recibir instrucción sobre cómo elaborarla.



En este contexto, el uso de la V de Gowin se puede clasificar, de acuerdo con la revisión sistemática que hacen Vo et al. (2025) sobre los andamiajes utilizados para apoyar la resolución de problemas en cursos de química general, como un andamiaje erigido para sostener la comprensión sobre la forma en que los y las científicas resuelven un problema, o lo que Bodner y McMillen (1986) llamaron “reestructuración del problema”. En la Tabla 1 se presentan ejemplos de las preguntas planteadas junto con los conceptos y las acciones identificados por tres equipos en la elaboración de su V de Gowin.

Preguntas planteadas (Lo que queremos averiguar)	Conceptos identificados (Lo que sabemos)	Acciones (Lo que hacemos)
¿Los pigmentos encontrados en el CMM ayudan a verificar su autenticidad?	La identificación del azul maya es útil para determinar la temporalidad y la autenticidad de piezas arqueológicas.	Obtención de bandas electromagnéticas y comparación con la muestra control del azul maya.
¿Cómo puede emplearse la entomología en la autenticación del CMM?	El papel de los artrópodos en el origen de los daños a un documento es evidente, tras encontrarse en el sitio u objeto afectado distintos restos de la actividad biológica.	En el estudio experimental se construyeron cuadernillos con base en amate y recubiertos de yeso, siendo humedecidos en las orillas con la finalidad de procurar las condiciones necesarias mínimas para que les fuera posible sobrevivir a los organismos y así observar la actividad biológica y cuáles eran sus efectos en un material parecido al códice.
¿Cuál es la identidad biológica de la fibra con la que se elaboró el CMM?	El papel es una pasta de fibras vegetales elaborada con base en procesos especiales.	Análisis de las muestras con microscopio biológico y estereoscópico.

TABLA 1. Preguntas planteadas, conceptos identificados y acciones realizadas por los y las investigadores en sus respectivos estudios del CMM, recogidos en el libro de Martínez del Campo Lanz (2018) e identificados por el estudiantado en sus respectivas V de Gowin.

Además, se pidió a los y las estudiantes establecer correspondencias explícitas entre los aspectos metodológicos y conceptuales, por un lado, y la pregunta y el fenómeno, por el otro. Junto con el diagrama, los equipos debían entregar: 1) una tabla de análisis en la que profundizaran en el eje conceptual, dado que el esquema de la V de Gowin está pensado para expresar las ideas sucintamente; 2) un resumen claro y conciso del dictamen; y 3) una evaluación crítica que incluyera limitaciones identificadas o sugerencias para mejorar el estudio analizado.

Asignatura	Introducción a la Ciencia Forense
Actividades	Construcción de la V de Gowin
Instrucciones	El INAH conformó seis equipos de científicas y científicos forenses encargados de traducir peritajes técnicos para un público no especializado. A cada equipo se le asignará un peritaje que deberá resumir en una presentación, apta para una exposición oral de máximo 10 minutos. Como parte del trabajo, cada equipo elaborará un análisis heurístico tipo V de Gowin sobre el peritaje asignado. Finalmente, tras las exposiciones, se realizará una sesión de discusión conjunta para integrar los resultados y valorar si puede emitirse una conclusión sobre la autenticidad del Códice Maya de México.
Material proporcionado	A cada equipo se le asignó un peritaje correspondiente a un capítulo del libro <i>El Códice Maya de México, antes Grolier de Martínez del Campo Lanz</i> (2018).
Evaluación	<p>En esta actividad se evaluaron los siguientes aspectos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de síntesis: la capacidad para resumir de forma clara y breve la información del informe • Tablas de análisis: se pidió al estudiantado desarrollar más a fondo las ideas del eje conceptual en una tabla • Resumen: debían resumir los aspectos conceptuales relacionándolos con la pregunta de investigación y las principales conclusiones del estudio • Evaluación: debían señalar alguna limitación o proponer sugerencias para mejorar el estudio

TABLA 2. Descripción general de la actividad con el CMM realizada en la asignatura de *Introducción a la Ciencia Forense*, especificando las instrucciones proporcionadas al estudiantado, el material proporcionado y los criterios de evaluación.

Evaluación y resultados

Los aspectos evaluados en esta actividad fueron los siguientes: 1) la categorización, que implica la capacidad del estudiantado para distinguir entre los elementos conceptuales y metodológicos; 2) la capacidad de síntesis, que se refiere a su habilidad para resumir de manera clara y breve la información contenida en el dictamen; 3) las tablas de análisis, en las que se les solicitó desarrollar con mayor profundidad las ideas del eje conceptual; 4) el resumen, en el que debían vincular los aspectos conceptuales con la pregunta de investigación y con las principales conclusiones del estudio; y 5) la evaluación, donde se esperaba que identificaran alguna limitación del estudio o propusieran sugerencias para su mejora. Los resultados de la evaluación promedio del grupo se presentan en la Figura 3.

Evaluación V de Gowin

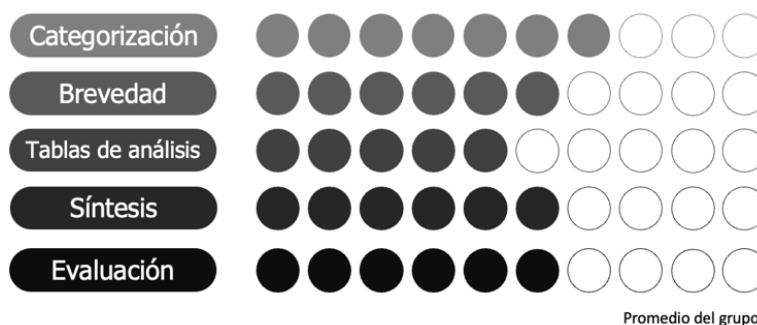


FIGURA 3. Resultados promedio de la evaluación de las V de Gowin del grupo de *Introducción a la Ciencia Forense*.

La parte de la secuencia didáctica correspondiente a *Introducción a la Ciencia Forense* concluyó con la presentación ante el grupo del proceso de datación por ^{14}C del CMM, impartida por uno de los expertos (el Dr. Miguel Ángel Martínez Carrillo) que colaboró en el estudio de autenticación del CMM y es coautor del capítulo correspondiente en el libro que recoge los diversos análisis practicados al códice (Solís et al., 2018).

Química General

Planteamiento

El análisis sobre la autenticación del CMM continuó en el curso de *Química General*, enfocándose específicamente en aspectos químicos de los pigmentos. Uno de los puntos críticos en la controversia sobre la autenticidad del códice fue el contraste entre la aparente frescura de la pintura y la apariencia envejecida del soporte de amate. Para quienes sostenían la hipótesis de que se trataba de una falsificación, este contraste sugería que se trataba de una obra reciente, pintada intencionalmente sobre un soporte antiguo imitando la pictografía maya. En este contexto, el estudio de los pigmentos empleados resultó fundamental, convirtiéndose en pieza clave para el análisis forense del códice.

En el CMM se identificaron pigmentos presentes también en otros códices prehispánicos: el negro de humo, el rojo de ocre, la grana cochinilla y el azul maya. Este último resultó particularmente relevante: aunque la existencia del códice está documentada desde 1965, no fue sino hasta 1980 que se logró determinar con precisión la composición de este pigmento, pudiéndose además reproducir su proceso de elaboración (Reyes Valerio, 1993).

Este hecho permitió descartar la hipótesis de que el CMM fuera una falsificación moderna para cuya elaboración se hubiera recurrido a dicho pigmento, en vista de la complejidad de la técnica asociada a su preparación y a que el descubrimiento del código antecedió a la elucidación de su carácter químico, haciendo del todo imposible que los presuntos falsificadores pudieran prepararlo y usarlo en la manufactura del código.

En el curso de *Química General*, que también se imparte en el primer semestre de la carrera, se abordan temas fundamentales como la clasificación de la materia y sus transformaciones. Los objetivos de la asignatura incluyen comprender y distinguir entre los conceptos de mezcla, sustancia, elemento y compuesto (MSEC), así como utilizar sus propiedades para identificar y/o separar sustancias. En este contexto, el análisis de los pigmentos empleados en el CMM se utilizó como una valiosa oportunidad didáctica, ya que permitió abordar simultáneamente los conceptos clave de MSEC y la introducción a técnicas de análisis como la cromatografía, conectando la teoría química con un caso real de relevancia histórica, cultural y forense.

Aunque los conceptos de MSEC suelen considerarse contenidos básicos en los cursos introductorios de química, su enseñanza y comprensión representan un desafío persistente para docentes y estudiantes, respectivamente. En lugar de atribuir la falta de apropiación conceptual de estos términos únicamente al estudiantado, es necesario, como señala Sosa (1999), reconocer que existen causas profundas detrás de las confusiones conceptuales, muchas de ellas asociadas al uso del lenguaje cotidiano, a la imprecisión terminológica y al orden en que se introducen los conceptos en la enseñanza. A ello se suma lo advertido por Reina et al. (2022), quienes identifican la persistencia de conceptos alternativos incluso a nivel universitario, dificultando la distinción entre mezclas, compuestos y moléculas. Reconociendo la complejidad que implica la apropiación significativa de estos términos, esta propuesta representa un esfuerzo más por abordarlos de forma significativa mediante su aplicación en un caso real y atractivo. El análisis de los pigmentos del CMM ofrece al estudiantado de la carrera de Ciencia Forense una oportunidad para conectar el conocimiento químico con un contexto auténtico del campo forense.

Actividad

Como primera actividad en el laboratorio de química, el estudiantado empleó la cromatografía en capa fina (CCF) para analizar tintas de plumones de distintos colores, a fin de conocer cómo se separan al someterse a la acción de un solvente. Posteriormente, se enfrentaron a un caso simulado en el que debían identificar, mediante CCF, cuál de dos fragmentos pertenecía a una pieza arqueológica original y cuál a una posible falsificación. Para esto, los y las estudiantes obtuvieron y analizaron diferentes patrones de separación de las sustancias que formaban las tintas, empleando material como el que se muestra en la Figura 4.

Posteriormente, se implementó la actividad titulada “Los colores de nuestros códigos: ¿colorante, tinte o pigmento?”, que permitió al estudiantado explorar, desde una perspectiva histórica y química, los compuestos presentes en los tintes utilizados en códigos prehispánicos. A través del análisis estructural de moléculas como la hematoxilina (proveniente del palo de Campeche) y el ácido carmínico (presente en la grana cochinilla), los y las estudiantes identificaron grupos funcionales, evaluaron su posible ionización y relacionaron los cambios de color con el pH. Para ello, se apoyaron en el uso de bases de datos científicas y herramientas digitales como ChemSketch para representar las estructuras moleculares.

FIGURA 4. A. Ejemplo de una réplica del CMM fragmentada en dos partes y proporcionada al estudiantado para realizar las pruebas de cromatografía en capa fina. B. Estudiante probando la solubilidad del tinte de la réplica del códice.



Cabe aclarar que los tintes son solubles en el medio de aplicación y penetran en el material, mientras que los pigmentos son insolubles y se adhieren a la superficie con ayuda de un aglutinante. Esta diferencia en solubilidad influye en su comportamiento y uso en distintos contextos. Por ello, en la segunda actividad se utiliza el término tinte para referirse a las sustancias presentes en las disoluciones preparadas en el laboratorio, y pigmento cuando se aborda el caso del CMM, en el que se analizan materiales insolubles aplicados sobre la superficie del soporte.

Como parte del componente experimental de la secuencia didáctica, se llevó a cabo una experiencia práctica de observación del comportamiento de diversos tintes naturales —como encino, cempasúchil, palo de Campeche, hematoxilina y grana cochinilla— frente a distintas condiciones de pH. Se aplicaron gotas de cada tinte sobre placas de porcelana, añadiéndoseles soluciones con valores de pH que iban del 2.0 al 13.0, registrándose los cambios cromáticos observados (Figura 5). Esta actividad permitió al estudiantado interpretar el comportamiento ácido-base de los grupos funcionales presentes en los tintes, vinculando el fenómeno del viraje de color con las propiedades químicas del entorno. Esta actividad integró contenidos clave de la química, como las propiedades ácido-base, con el análisis del patrimonio cultural, reforzando la comprensión de conceptos científicos en un contexto experimental, auténtico y significativo.

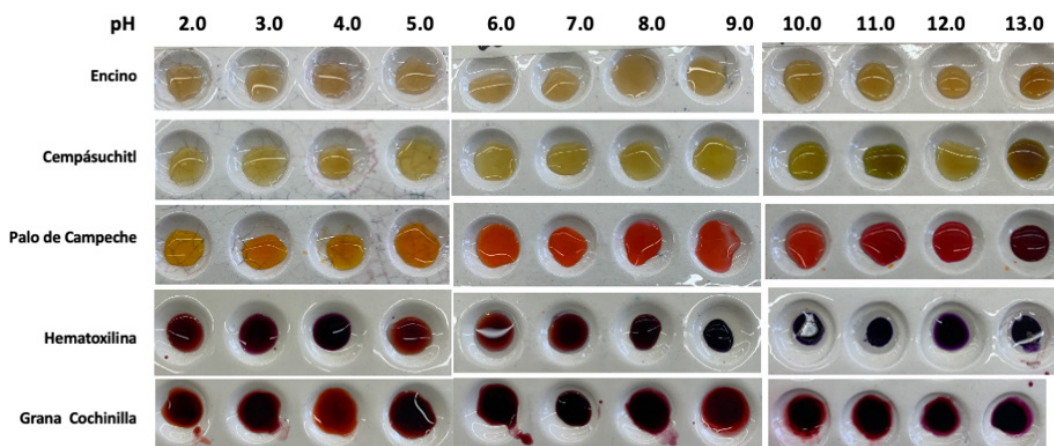


FIGURA 5. Placas de porcelana en las que se aprecian los cambios cromáticos de los cinco tintes puestos a prueba, bajo diferentes valores de pH.

En la Tabla 4 se muestran las preguntas que guiaron el trabajo de los y las estudiantes durante la observación del comportamiento de los tintes naturales frente a los cambios de pH. Por su parte, en la Tabla 5 se ofrece una descripción pormenorizada de las actividades realizadas.

Preguntas planteadas (Lo que averiguamos)	Conceptos identificados (Lo que sabemos)	Acciones (Lo que hacemos)
¿Cómo se interpreta la estructura molecular de un tinte para identificar sus propiedades químicas relevantes?	Los grupos funcionales determinan propiedades químicas clave del compuesto (acidez, basicidad, solubilidad, color, reactividad).	Identificar los grupos funcionales dentro de la estructura de los tintes.
¿De qué manera se relacionan los conceptos teóricos con los cambios cromáticos observados experimentalmente al variar el pH?	El viraje de color es una propiedad característica de muchos tintes naturales, como los derivados del ácido carmínico o la hematoxilina, y se puede documentar mediante observación visual y análisis de pH. Algunos grupos funcionales son sensibles al pH porque pueden ionizarse (aceptar o donar protones), lo que afecta la absorción de luz y, por lo tanto, el color percibido. Las interacciones ácido-base afectan la ionización de ciertos grupos funcionales, modificando las propiedades espectrales del tinte.	Aplicamos gotas de tintes naturales sobre placas de porcelana y añadimos soluciones con diferentes valores de pH (2.0 a 13.0). Observamos y documentamos los cambios de color generados por cada condición de pH. Relacionamos los cambios cromáticos con la estructura química de cada tinte y sus grupos funcionales.
¿Cómo se puede utilizar de forma precisa y fundamentada el lenguaje químico para explicar fenómenos observados?	El lenguaje químico incluye términos específicos (como mezcla, sustancia, elemento, compuesto, grupo funcional y ionización) que permiten describir fenómenos con precisión.	Interpretamos los resultados experimentales a partir de los conceptos de grupo funcional, ionización y pH.

TABLA 4. Preguntas planteadas al estudiantado para orientar las actividades con los tintes naturales en *Química General*.

TABLA 5. Descripción general de las actividades con el CMM realizadas en la asignatura de *Química General*, especificando las instrucciones proporcionadas al estudiantado, el material proporcionado y los criterios de evaluación.

Asignatura	Química General
Actividad 1	
Instrucciones	La imagen 1 muestra un fragmento original del Códice Maya de México (CMM) que fue subastado por la casa francesa Artcurial, a pesar de las objeciones de la Secretaría de Cultura de México, que alegó que las piezas fueron extraídas ilícitamente. La Imagen 2 muestra una copia elaborada en dos partes, al igual que el original. Durante su exhibición, los fragmentos pequeños fueron confundidos, por lo que ahora no se sabe cuál pertenece al código auténtico. Diseña un plan y aplica la técnica de cromatografía con el fin de identificar el fragmento original.

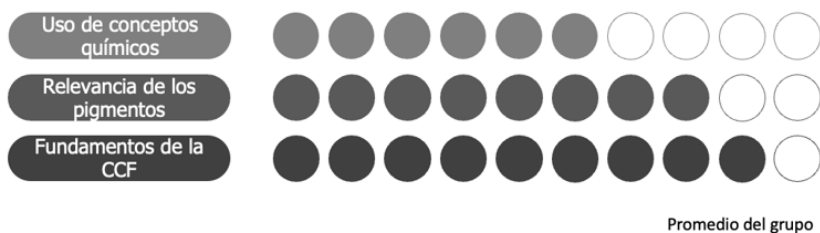
Material proporcionado	Dos reproducciones del código, cada una dividida en dos fragmentos, coloreadas con distintos plumones para simular pigmentos visualmente similares; además, se proporcionaron plumones adicionales y material de laboratorio necesario para realizar cromatografía.
Evaluación	A partir de la rúbrica utilizada para evaluar la actividad, se consideraron tres aspectos clave: el uso adecuado de los conceptos MSEC, la argumentación sobre la importancia de identificar pigmentos como el azul maya en la autenticación del CMM y la explicación clara de la técnica de CCF.
Actividad 2	
Instrucciones	<p>A partir del conocimiento sobre el uso tradicional de tintes en códigos prehispánicos, realizarás un análisis químico que vincule las propiedades estructurales de las moléculas colorantes con su comportamiento frente a distintas condiciones de pH. Para ello, sigue los siguientes pasos:</p> <ul style="list-style-type: none"> Investiga las estructuras químicas de los compuestos activos presentes en dos tintes naturales tradicionales: hematoxilina, principal componente del palo de Campeche, y ácido carmínico, presente en la grana cochinilla. Utiliza una fuente científica confiable para obtener las estructuras moleculares (por ejemplo, PubChem, SciFinder o artículos académicos). En caso de no encontrarlas, puedes elaborarlas tú mismo/a utilizando ChemSketch u otro software de modelado químico. Analiza las estructuras obtenidas e identifica todos los grupos funcionales presentes en cada molécula y señala cuáles pueden ionizarse en función del pH. Observa la imagen experimental proporcionada, que muestra el comportamiento de diversos tintes naturales (encino, cempasúchil, palo de Campeche, hematoxilina y grana cochinilla) frente a soluciones con valores de pH de 2.0 a 13.0. Con base en tus conocimientos, explica a qué se debe el cambio de color observado en las muestras al variar el pH. Fundamenta tu respuesta relacionando los conceptos de estructura molecular, ionización y propiedades ópticas de los compuestos.
Evaluación	<ol style="list-style-type: none"> Identificación y representación correcta de estructuras moleculares (hematoxilina, ácido carmínico). Identificación precisa de grupos funcionales presentes. Empleo correcto y contextualizado de los conceptos: ionización y pH. Explicación fundamentada del cambio de color en función del pH.

Evaluación y resultados

En la Actividad 1 se evaluaron tres aspectos: el uso correcto de los conceptos MSEC; la capacidad para destacar la relevancia de los pigmentos en la autenticación de una pieza arqueológica, haciendo especial énfasis en la importancia del azul maya; y la explicación adecuada de la técnica de CCF.

En la Actividad 2 se evaluaron cuatro aspectos: la correcta representación de las estructuras moleculares de la hematoxilina y el ácido carmínico; la identificación precisa de los grupos funcionales presentes en ambas moléculas; el uso adecuado y contextualizado de los conceptos de ionización y pH, específicamente en relación con su influencia sobre las propiedades de los tintes; y la explicación del cambio de color observado en función del pH, tomando en cuenta la fundamentación química basada en la estructura molecular y el comportamiento ácido-base de los compuestos analizados (Figura 6).

Evaluación sobre CCF



Evaluación sobre pigmentos

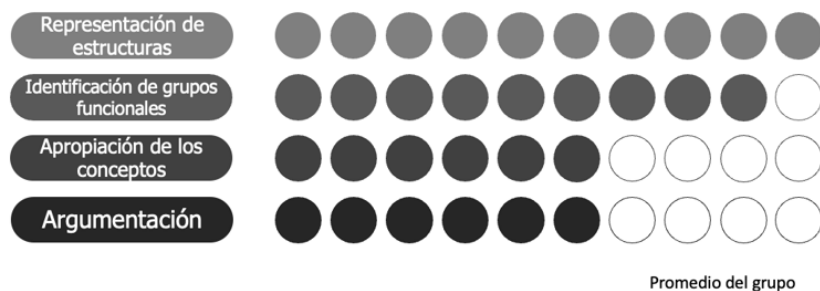


FIGURA 6. Resultados promedio de la evaluación de las Actividades 1 y 2 de la secuencia didáctica en *Química General*.

Fragmento 1

Se espera que con los resultados de esta técnica se pueda obtener un informe detallado de la composición de la pintura utilizada en las piezas y comprobar si corresponden al periodo de tiempo supuesto, además de conocer si los elementos que se encuentran en ésta también se encontraban en el entorno. Al realizar los estudios correctos y pertinentes se podrán separar y, posteriormente, identificar las muestras de materia con composición definida denominadas sustancias, ya sean elementales (formadas por un solo tipo de átomos) o compuestas (conformadas por más de un tipo de átomos), que constituyen entre sí a las mezclas con propiedades diversas y composición variable que, en este caso, son los pigmentos.

Fragmento 2

En primer lugar, es fundamental identificar los diferentes pigmentos y las sustancias que los conforman que se encuentran en las piezas arqueológicas para su autenticación. Un ejemplo claro de ello es el caso del Códice Maya de México.

Fragmento 3

En este caso en particular, desconocemos la cantidad de sustancias presentes en los pigmentos existentes en las piezas, por lo que sugerimos utilizar la técnica de cromatografía en capa fina. La cromatografía en capa fina es un método que ayuda a saber al menos cuántas sustancias hay en una mezcla utilizando la polaridad que posee cada una de ellas. La polaridad es una propiedad molecular que representa la separación de cargas eléctricas en una misma molécula, o en términos más simplificados, la forma en que estas se pueden ver atraídas o repelidas por otras sustancias dependiendo de sus propiedades.

Fragmento 1

El cambio de color se debe a que la capacidad de los grupos auxóchromos presentes en el colorante, de ionizarse, aumenta conforme el medio en que se encuentran es más ácido. El cambio de color se debe a la cantidad de grupos ionizados, relacionada directamente con la concentración de iones H^+ .

Fragmento 2

Cada grupo funcional tiene un pK_a distinto, es decir, su capacidad de disociación es diferente y dependiendo del pH cada grupo funcional se disociará con mayor facilidad o no, lo que ocasionará un cambio en la intensidad del tinte.

Fragmento 3

Este fenómeno se le atribuye a la forma en que interactúan los grupos funcionales de las moléculas del tinte con el pH de las soluciones.

Fragmento 4

El cambio de color se debe a un cambio estructural inducido por la protonación o desprotonación del grupo funcional que actúe como auxóchromo. Dependiendo de que tanto se disocie, hará que la longitud de cada sustancia cambie, generando así un cambio en el color observado.

FIGURA 7. Fragmentos de tareas realizadas por los y las estudiantes como parte de las actividades en la clase de *Química General*.

Los resultados obtenidos evidenciaron dificultades conceptuales en la mayoría de los equipos: seis de los ocho presentaron errores relacionados con el uso inadecuado de los términos MSEC. Por ejemplo, el término elemento fue empleado como sinónimo de sustancia, y muchos estudiantes usaron componente de manera general, evitando el uso preciso de los conceptos químicos mezcla, sustancia, elemento o compuesto. También se observó el uso indistinto de compuesto o componente en lugar de sustancia, y en varios casos el azul maya fue clasificado erróneamente como una sustancia en vez de una mezcla.

Respecto a la explicación de la técnica de CCF, cuatro equipos ofrecieron descripciones poco claras, mientras que dos equipos no comprendieron que el caso del código debía utilizarse para argumentar la importancia de identificar los pigmentos. Además, se detectaron confusiones respecto a conceptos clave de la técnica, como la función de la fase móvil y la fase estacionaria, así como el papel de la polaridad en el proceso de separación.

En general, los estudiantes mostraron un adecuado manejo de los aspectos estructurales y representaciones moleculares. La totalidad del grupo identificó y representó correctamente las estructuras químicas de la hematoxilina y el ácido carmínico, localizando con precisión los grupos funcionales relevantes en ambas moléculas. Esto indica una buena comprensión de la química aplicada al contexto de tintes naturales.

No obstante, se identificaron áreas de oportunidad en los apartados de análisis conceptual. Solo el 60 % del grupo empleó correctamente los conceptos de ionización y pH en sus explicaciones. Las dificultades principales radicarón en la falta de vinculación entre los grupos funcionales ionizables y su comportamiento bajo diferentes condiciones de pH, así como en explicaciones superficiales o incompletas sobre cómo la ionización modifica las propiedades ópticas (absorción y reflexión de luz) de los compuestos colorantes, provocando cambios en la percepción del color.

Se observó confusión entre el concepto de ionización y otros procesos químicos como oxidación o descomposición. Asimismo, en el análisis del cambio de color en función del pH, varios estudiantes describieron adecuadamente la evidencia visual observada en la imagen experimental, pero no fundamentaron sus respuestas con base en la estructura molecular y el equilibrio ácido-base de los grupos funcionales.

La parte de la secuencia didáctica correspondiente a *Química General* concluyó con un primer acercamiento a los análisis y mapas isotópicos, centrado en su aplicación en el ámbito de la ciencia forense. Se trató de una actividad complementaria que permitió introducir al estudiantado en una técnica emergente con gran potencial para determinar el origen o la procedencia de objetos, materiales o restos biológicos. Para ejemplificar su utilidad, se presentó el caso de un mastodonte apodado “Fred” (Miller, 2022), cuyo análisis isotópico del oxígeno y estroncio en sus colmillos permitió reconstruir sus patrones de migración a lo largo de su vida. A partir de este ejemplo, se promovió una discusión sobre cómo técnicas similares podrían emplearse en la autenticación del CMM, destacando el valor de estas herramientas como evidencia complementaria en investigaciones arqueológicas y forenses.

Nociones de Derecho

Planteamiento

Para concluir la secuencia didáctica, en la clase de *Nociones de Derecho* se discutió sobre la necesaria relación entre la ciencia y el derecho para la solución de los problemas forenses, buscando que el alumnado comprendiera la trascendencia jurídica de las propuestas científicas para resolver problemas de índole social. En este contexto, y en coordinación con los profesores de las demás asignaturas participantes en este proyecto, se analizaron los artículos 16, 28, 29, 33, 49, 52 y 53 de la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas (LFMZAAH, 1972).

Actividad

En la clase de *Nociones de Derecho* se solicitó al estudiantado redactar una recomendación técnica dirigida a la fiscalía en la que, en su papel de científicas y científicos forenses, argumentaran la pertinencia de emplear la técnica de CCF para autenticar una pieza arqueológica que, según el escenario propuesto, estaba siendo subastada de manera ilegal. En su escrito debían utilizar adecuadamente los conceptos MSEC, así como explicar de forma clara y accesible —para un público lego en química, como lo sería un o una fiscal— los fundamentos de dicha técnica. Además, se les pidió que retomaran el caso del CMM y destacaran la relevancia del hallazgo del azul maya en su autenticación, como ejemplo del valor que tiene la identificación de pigmentos en contextos de análisis del patrimonio cultural. Esta estrategia se apoya en la idea de que, como señala Sanmartí (2002), el significado que el alumnado atribuye a los términos científicos se construye de manera progresiva mediante interacciones sociales, acercándose gradualmente al significado compartido por la comunidad científica. En este sentido, la actividad no solo busca promover el uso contextualizado del lenguaje y los conceptos químicos, sino también favorecer su apropiación significativa al ponerlos en juego dentro de una situación con relevancia práctica y forense.

El propósito de esta sección de la secuencia fue hacer que el alumnado identificara la relevancia jurídica de investigar si una pieza arqueológica es falsa, saber en manos de quién se encuentra, verificar su autenticidad y determinar qué trascendencia jurídica tiene extraerla ilícitamente del país. Llamó la atención del alumnado averiguar que las definiciones legales permiten encuadrar las conductas debidamente para que puedan perseguirse penalmente, lo que les permitió adecuar sus solicitudes al Ministerio Público utilizando el lenguaje adecuado.

A saber, la ley define como monumentos arqueológicos a aquellos bienes muebles, producto de culturas anteriores al establecimiento de la hispánica en el territorio nacional (Art. 28, LFMZAAH). Por otro lado, define a los monumentos artísticos como los bienes muebles que revistan valor estético relevante, dada alguna de las siguientes características: representatividad, inserción en determinada corriente estilística, grado de innovación, materiales y técnicas utilizados y otras análogas (Art. 33, LFMZAAH). Esto significa que, de acuerdo con la ley, el CMM podría considerarse bien como un monumento arqueológico o como un monumento artístico, dependiendo de si se decide que tiene un valor estético o no. De cualquier manera, la ley protege a ambos del tráfico ilícito y de su alteración.

En efecto, se identificó en clase que los monumentos arqueológicos muebles no pueden ser transportados, exhibidos o reproducidos sin permiso del INAH o de la instancia que resulte competente (Arts. 16 y 29, LFMZAAH). Se identificaron, en lo conducente, tres tipos penales en esta ley especial, que sancionan lo siguiente:

- Cualquier acto traslativo de dominio de un monumento arqueológico mueble, su comercio, transporte, exhibición o reproducción sin permiso (Art. 49, LFMZAAH).
- Daño, alteración o destrucción de un monumento arqueológico o artístico (Art. 52, LFMZAAH).
- Pretender sacar o sacar del país un monumento arqueológico o artístico sin permiso. Se agrava la pena si se ordena, induce, dirige, organiza o financia este saqueo (Art. 53, LFMZAAH).

Si bien las conductas se encuentran tipificadas como delitos, las penas previstas no van más allá de doce años como máximo, lo que las sitúa como delitos no graves.

Esta articulación permitió vincular el trabajo químico con el marco jurídico vigente, fortaleciendo el carácter interdisciplinario de la secuencia didáctica.

Asignatura	Nociones de derecho
Actividad	
Instrucciones	<p>El INAH te ha solicitado asesoría en el proceso legal para la repatriación de piezas arqueológicas ubicadas en el extranjero, cuya autenticidad deberá verificarse al momento de su recepción. Como parte de esta labor, se requiere elaborar una solicitud dirigida al equipo jurídico encargado del caso.</p> <p>En esta solicitud, actuarás como asesora o asesor forense y deberás explicar de forma clara y concisa lo siguiente: la importancia de identificar los tintes presentes en las piezas, con énfasis en el azul maya; en qué consiste la técnica de cromatografía en capa fina (TLC); cuáles son sus ventajas y limitaciones; y cómo puede aplicarse esta técnica en la autenticación de materiales arqueológicos.</p>
Evaluación	<ul style="list-style-type: none"> • Uso correcto de los conceptos químicos de mezcla, sustancia, elemento y compuesto. • Comprensión sobre la relevancia de los pigmentos para la autenticación de una pieza arqueológica, destacando en particular la importancia del azul maya. • Explicación correcta de la técnica de cromatografía en capa fina (TLC). • Correcta aplicación del marco jurídico de la falsificación de obras de arte en México.

TABLA 7. Descripción general de las actividades con el CMM realizadas en la asignatura de *Nociones de Derecho*, especificando las instrucciones proporcionadas al estudiantado, el material proporcionado y los criterios de evaluación.

Análisis pedagógico de la secuencia didáctica

La integración de tres asignaturas (Introducción a la Ciencia Forense, Química General y Nociones de Derecho) en torno al caso de autenticación del CMM permitió articular un trabajo interdisciplinario que trascendió la enseñanza aislada de contenidos. La propuesta se apoyó en marcos teóricos como el aprendizaje significativo (Ausubel), el aprendizaje basado en problemas y la enseñanza contextualizada, favoreciendo que el estudiantado relacionara conocimientos previos con nuevos contenidos a partir de un caso real.

De forma transversal, la secuencia promovió:

- La apropiación contextualizada del lenguaje científico y legal, al trabajar con dictámenes técnicos reales y traducirlos a formatos comprensibles para públicos no especializados.
- El desarrollo del razonamiento basado en evidencia, al vincular datos experimentales con la formulación de hipótesis y conclusiones.
- La interconexión disciplinar, mediante la identificación de la convergencia de los análisis químicos, las consideraciones jurídicas y los procedimientos forenses para el abordaje y resolución de un caso.
- El trabajo colaborativo efectivo, replicando la dinámica de equipos profesionales que integran diversas áreas de especialidad.

El análisis de resultados mostró avances en el manejo de conceptos químicos y estructurales, así como en la representación molecular y en la identificación de grupos funcionales. Sin embargo, persistieron dificultades en el uso preciso de términos MSEC y en la explicación fundamentada de fenómenos químicos, lo que evidencia la necesidad de reforzar la explicitación de vínculos conceptuales y de promover instancias de reflexión al cierre de cada actividad.

La propuesta confirma el potencial de los contextos culturalmente relevantes para generar aprendizajes significativos, transferibles y alineados con las demandas profesionales de la ciencia forense, pero también señala la importancia de sistematizar el acompañamiento pedagógico y la retroalimentación formativa para consolidar las competencias trabajadas.

Conclusiones

La implementación de esta secuencia didáctica en el contexto del programa de Licenciatura en Ciencia Forense permitió explorar nuevas posibilidades para la enseñanza de la química desde una perspectiva interdisciplinaria, contextualizada y orientada al desarrollo de competencias profesionales. Asimismo, esta metodología tiene el potencial de adaptarse a otros niveles y contextos educativos, resultando valiosa no solo para docentes de química, sino también para quienes imparten asignaturas en diversas áreas, en entornos con distintas características y necesidades.

El uso de los diagramas heurísticos de Gowin permitió visibilizar las conexiones entre las preguntas de investigación, los fundamentos teóricos y los procedimientos metodológicos presentes en cada peritaje, promoviendo una reflexión más profunda sobre el proceso de construcción del conocimiento. Las actividades prácticas, desde la cromatografía en capa fina hasta el análisis jurídico de la legislación aplicable, facilitaron que el estudiantado aplicara de manera integrada competencias conceptuales, procedimentales, argumentativas y colaborativas. En particular, se fortalecieron las competencias conceptuales (MSEC, fundamentos jurídicos y principios forenses), procedimentales (técnicas analíticas y de análisis heurístico), argumentativas (elaboración de dictámenes y exposiciones) y colaborativas (trabajo interdisciplinario).

Si bien se evidenciaron avances, también se identificaron áreas de mejora, particularmente en la comprensión de conceptos y en la fundamentación química de fenómenos observados. Estas observaciones subrayan la necesidad de seguir desarrollando estrategias didácticas que integren la reflexión cognitiva y la retroalimentación formativa como elementos centrales del proceso.

El uso de un caso auténtico y de gran valor histórico como el del CMM no solo permitió conectar la química con el derecho, sino también evidenciar su papel central en la resolución de problemas complejos con implicaciones legales, patrimoniales y sociales, contribuyendo así a una formación más sólida y pertinente para el ejercicio profesional.

Agradecimientos

Se agradece a la profesora Tania Montiel Amador (alumna de la MADEMS) por su valiosa asesoría en la preparación de las disoluciones de los tintes naturales utilizados en esta actividad.

Este trabajo fue apoyado por la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), a través del proyecto PAPIIT PE202421.

Referencias

- Arroyo-Ortíz, L. (2020). *Tintes naturales mexicanos: su aplicación en algodón, henequén y lana*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bodner, G. M., y McMillen, T. (1986). Cognitive restructuring as an early stage in problem solving. *Journal of Research in Science Teaching*, 23(8), 727–737. <https://doi.org/10.1002/tea.3660230807>
- Braun, K. L., y Labby, K. J. (Eds.). (2021). *Contextualizing chemistry in art and archaeology: Inspiration for instructors* (ACS Symposium Series). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-2021-1386>
- Cummings, M. (2017, January 18). Authenticating the oldest book in the Americas. *Yale News*. <https://news.yale.edu/2017/01/18/authenticating-oldest-book-americas>
- Dupey-García, E. (2015a). El color en los códices prehispánicos del México Central: Identificación material, cualidad plástica y valor estético. *Revista Española de Antropología Americana*, 45(1), 149–166. https://doi.org/10.5209/rev_REAA.2015.v45.n1.52359
- García Castillo, Z., y Bravo-Gómez, M. E. (2017). *El estado del arte de las ciencias forenses en México*. Tirant lo Blanc / El Colegio Nacional / Conacyt.
- Izquierdo Aymerich, M. (1994). La V de Gowin, un instrumento para aprender a aprender (y a pensar). *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales*, (1), 114–124.
- Lambert, J. B. (1983). Archaeological chemistry. *Journal of Chemical Education*, 60(4), 345–347. <https://doi.org/10.1021/ed060p345>
- Licenciatura en Ciencia Forense, Facultad de Medicina. (2013). *Plan de estudios de la Licenciatura en Ciencia Forense* (Vol. 1). Universidad Nacional Autónoma de México. https://www.enacif.unam.mx/?page_id=370
- Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas. (1972). *Diario Oficial de la Federación*. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/131_160218.pdf
- Marcano, D. (2018). *Introducción a la química de los colorantes*. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales.
- Miller, J. H., Fisher, D. C., Crowley, B. E., Secord, R., y Konomi, B. A. (2022). Male mastodon landscape use changed with maturation (late Pleistocene, North America). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119, 1–10. <https://doi.org/10.1073/pnas.2118329119>
- Martínez del Campo Lanz, S. (Coord.). (2018). *El Códice Maya de México, antes Grolier*. Secretaría de Cultura / Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Novak, J. D., y Gowin, D. B. (1988). *Aprendiendo a aprender*. Martínez Roca.
- Reina, A., García-Ortega, H., Gracia-Mora, J., Marín-Becerra, A., y Reina, M. (2022). Juegos para distinguir compuestos y moléculas. *Journal of Chemical Education*, 99, 1266–1271. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00975>

- Reyes-Valerio, C. (1993). *De Bonampak al Templo Mayor: El azul maya en Mesoamérica*. Siglo XXI Editores.
- Romero Guerra, A. P. (2016, June). Para comprender el sistema acusatorio. *Letras Libres*, (210), 46–48. <https://letraslibres.com/revista-mexico/para-comprender-el-sistema-acusatorio/>
- Romo Guadarrama, G., Sosa Reyes, A. M., Suzuri Hernández, L. J., y Mungarro Menchaca, X. F. (2017a). Una estrategia para evaluar competencias en la Licenciatura en Ciencia Forense. *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas (Extra)*, 5023–5028. <https://raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/337688>
- Romo Guadarrama, G., Sosa Reyes, A. M., Suzuri Hernández, L. J., y Mungarro Menchaca, X. F. (2017b). Taller interdisciplinario para la resolución de casos forenses. *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas (Extra)*, 5505–5510. <https://raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/337708>
- Sanmartí, N. (2002). *Didáctica de las ciencias en la educación secundaria obligatoria*. Síntesis Educación.
- Solís, C., Martínez Carrillo, M. Á., Rodríguez-Ceja, M., Chávez-Lomelí, E. R., y Christen, J. A. (2018). Datación del Códice Maya de México con radiocarbono y espectrometría de masas con aceleradores. En S. Martínez del Campo Lanz (Coord.), *El Códice Maya de México, antes Grolier* (pp. 109–117). Secretaría de Cultura / Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Sosa, P. (1999). De palabras, de conceptos y de orden. *Educación Química*, 10(1), 57–60. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.1999.1.66508>
- Sosa Reyes, A. M. (2017). Del laboratorio al juzgado: enseñanza de las ciencias para el ejercicio forense. *Educación Química*, 28(4), 238–245. <https://doi.org/10.1016/j.eq.2017.09.001>
- Sosa Reyes, A. M., Romo Guadarrama, G., García Castillo, Z., López Zepeda, J. L., Farfán Sánchez, R., y Suzuri Hernández, L. J. (2022a). Perfil del estudiantado de la Licenciatura en Ciencia Forense, del ingreso a la titulación. *Investigación en Educación Médica*, 11(43), 72–81. <https://doi.org/10.22201/fm.20075057e.2022.43.22421>
- Sosa-Reyes, A. M., Villavicencio-Queijeiro, A., y Suzuri-Hernández, L. J. (2022b). Interdisciplinary approaches to the teaching of forensic science in the Forensic Science Undergraduate Program of the National Autonomous University of Mexico, before and after COVID-19. *Science & Justice*, 62(6), 676–690. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2022.08.006>
- Vo, K., Sarkar, M., White, P. J., y Yuriev, E. (2025). Exploring problem-solving scaffolds in general chemistry: A systematic review of scaffolding goals and instructional approaches. *Journal of Chemical Education*, 102(3), 1004–1018. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c01327>
- Waterman, M. A., y Rissler, J. F. (1982). Use of scientific research reports to develop higher-level cognitive skills. *Journal of College Science Teaching*, 11(6), 336–340.