



## La química y los grandes delitos ambientales

### *Chemistry and the great environmental crimes*

Xochitl Cruz Núñez<sup>1</sup>

#### Resumen

Los delitos ambientales son relevantes a escala planetaria debido a que agreden la salud y estabilidad de los ecosistemas y, en muchas instancias, los daños son irreversibles debido a la fragilidad de los ecosistemas. Al menos siete de los 17 objetivos del desarrollo sostenible están dirigidos a la salud en un ambiente sano<sup>2</sup>. El artículo 4º de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos declara el derecho de todos los mexicanos a un “medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar” y la penalización a quien deteriore el medio ambiente.

La normatividad mexicana contiene un grueso acervo de normas, leyes y reglamentos encaminados a proteger la salud ambiental y humana, así como la conservación de las especies. Uno de los problemas asociados con este cumplimiento es la coordinación y cumplimiento de múltiples instancias, principalmente gubernamentales, que puede resultar en una dispersión de responsabilidades. Un ejemplo es la calidad del aire. Si el aire está contaminado, ¿quién es responsable? Encontrar las causas de la contaminación permitirá asignar responsabilidades. Determinar la base científica es el papel del científico, en este caso, del químico de la atmósfera, y asignar la responsabilidad es el papel del que imparte justicia.

En esta contribución se presenta un estudio de caso en el que el conocimiento de la química permite entender el problema de la calidad del aire en Hermosillo, Sonora, debido a la denuncia presentada por un ciudadano. El conocimiento de las causas de la contaminación proporcionó las herramientas para dirigirse a los directamente responsables, en este caso, las autoridades municipales de Hermosillo.

#### Palabras clave

Delito ambiental, Hermosillo, química forense.

#### Abstract

Environmental offenses are relevant on a planetary scale because they threaten the health and stability of ecosystems and, in many instances, damage is irreversible due to the fragility of ecosystems. At least seven of the 17 objectives of sustainable development are aimed at health in a healthy environment. Article 4 of the Political Constitution of the United Mexican States declares the right of all Mexicans to a “healthy environment for their development and well-being” and the penalization of those who damage the environment.

Mexican regulations contain many rules, laws and regulations aimed at protecting environmental and human health, as well as the conservation of species. One of the problems associated with this compliance is the coordination and enforcement by multiple agencies, mainly governmental, which can result in a dispersion of responsibilities. One example is air quality. If the air is polluted, who is responsible? Finding the causes of the pollution, its effects, makes it possible to hold accountable those who failed in their responsibility. This is the role of the scientist and, in this case, of the atmospheric chemist.

A case study is presented in which the knowledge of chemistry allows understanding the problem of air quality in Hermosillo, Sonora, due to the complaint filed by a citizen. Knowledge of the causes of pollution provided the tools to address those directly responsible, in this case, the municipal authorities of Hermosillo.

#### Keywords

Environmental offense, Hermosillo, Mexico, forensic chemistry.

<sup>1</sup> Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático.

<sup>2</sup> <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.

## Introducción

La ciencia forense es, de manera simple, la aplicación de la ciencia a la ley (Saferstein 2018). En la ciencia forense se investiga la escena del delito, se examinan las evidencias y se identifica al responsable usando el método científico. Por ello, la ciencia forense es una de las materias que pueden atraer fácilmente a los estudiantes. Sin embargo, enseñar esta asignatura no es una tarea fácil. Para hacerlo, hay que adicionar a la teoría una serie de instrumentos de práctica, desde kits de identificación de evidencias (Davidson et al. 2022), hasta la práctica real con estudios de caso y aún nuevas técnicas pedagógicas (Shukla (2022).

La química es la ciencia de la transformación, y la aplicación de la química a la ley es la química forense. En cualquier momento que la química se aplique a la ley se estará practicando la química forense. Debido a que la ciencia forense ha tenido una gran demanda en los últimos años, la química ha tenido un impulso en dicha aplicación. Las principales áreas de la química que han encontrado una veta de desarrollo en la ciencia forense son la general, analítica, bioquímica y orgánica (Harper-Leatherman y Huang 2019).

Los delitos ambientales son relevantes a escala planetaria debido a que agreden la salud y estabilidad de los ecosistemas y, en muchas instancias, los daños son irreversibles debido a la fragilidad de los ecosistemas. Al menos siete de los 17 objetivos del desarrollo sostenible están dirigidos a la salud en un ambiente sano<sup>1</sup>. El artículo 4º de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos declara el derecho de todos los mexicanos a un “medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar” y la penalización a quien deteriore el medio ambiente.

La normatividad mexicana contiene un grueso acervo de normas, leyes y reglamentos encaminados a proteger la salud ambiental y humana, así como la conservación de las especies. Uno de los problemas asociados con este cumplimiento es la coordinación y cumplimiento de múltiples instancias, principalmente gubernamentales, que puede resultar en una dispersión de responsabilidades. Un ejemplo es la calidad del aire. ¿De quién es responsabilidad la calidad del aire? ¿Del gobierno, de los ciudadanos, de la naturaleza?

Cada uno de los factores tiene un papel importante en la calidad del aire. Una ciudad con una planeación urbana deficiente y con poca vigilancia del cumplimiento de sus leyes y reglamentos en la materia, puede estar situada en un sitio muy bien ventilado, de forma que los contaminantes se mueven rápidamente y no causan efectos visibles. Por otro lado, si la misma ciudad se encuentra emplazada en un sitio con poca ventilación, la contaminación será más evidente. En cualquiera de los dos casos, el delito por contaminar está presente y la tarea del químico forense es encontrar tanto sus causas como sus consecuencias a fin de documentar completamente la base científica.

### Contaminación ambiental en Hermosillo, Sonora

La Comisión para la Cooperación Ambiental de América de Norte (CCA) fue creada en 1994 para instrumentar el Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte, convenio en materia de medio ambiente del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), en el que participan Canadá, Estados Unidos y México.

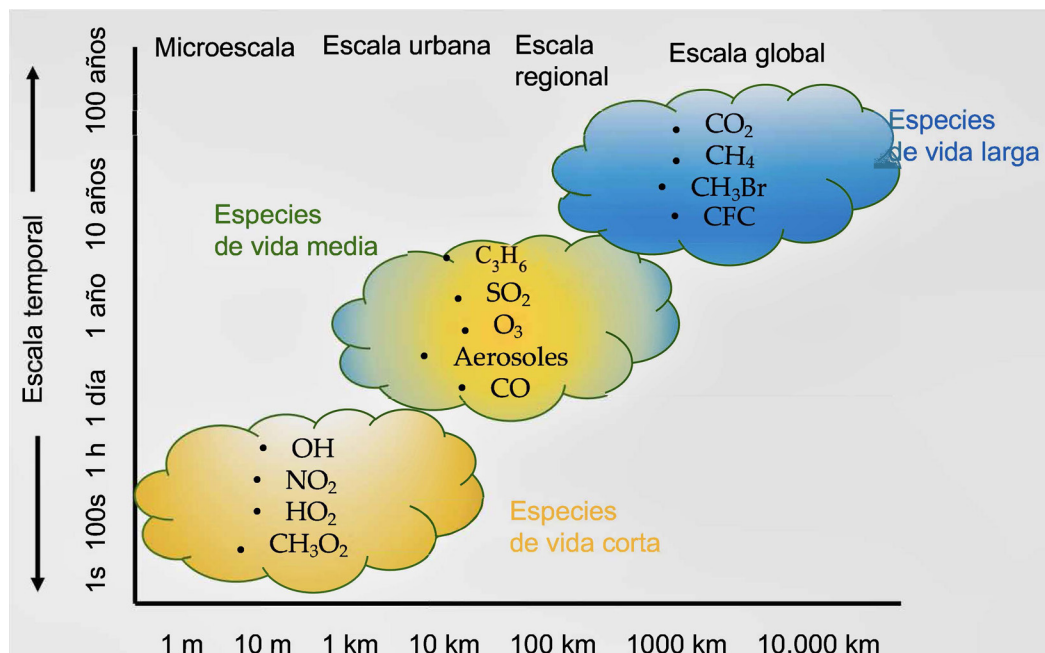
<sup>1</sup> <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.

La CCA atiende una diversidad de temas ambientales, de biodiversidad y climáticos. Si bien no es una entidad con la atribución de imponer sanciones, sí puede recomendar al país responsable de la queja o denuncia y éste debe atenderla con el fin de mantener el Acuerdo Trinacional en materia Ambiental en orden.

El expediente de hechos de una petición la integró el Secretariado para la CCA con arreglo al artículo 15 del TLCAN en relación con la denuncia de un ciudadano en conjunto con una asociación de derechos humanos en la ciudad de Hermosillo, Sonora, México, por la presunta omisión en que México incurre en la aplicación efectiva de su legislación ambiental que conduce al deterioro de la calidad del aire de Hermosillo y, por tanto, la salud de sus habitantes. Entre otros argumentos, los peticionarios señalan la supuesta falta de aplicación y cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia de contaminación atmosférica; la supuesta falta de acciones para prevenir la contaminación atmosférica en predios y zonas de jurisdicción estatal y municipal; la supuesta falta de establecimiento y actualización de un sistema nacional de información de la calidad del aire; y la supuesta falta de definición de planes de desarrollo urbano estatales y municipales que indiquen las zonas donde pueden operar las industrias contaminantes. Para ello, se hizo la investigación previa en la que se reunió un grupo de científicos para evaluar la información acerca del estado del aire y diversos acuerdos y normativas asociados en dicha ciudad.

### Química de la atmósfera

En la parte baja de la atmósfera, la tropósfera, existen gases y partículas. Los gases más abundantes son el nitrógeno (79%), el oxígeno (21%) y trazas de otros (óxidos de carbono, de nitrógeno, de azufre, gases inertes, ozono y otros oxidantes, compuestos orgánicos volátiles, etc.). Algunos de ellos son muy reactivos y duran pocos segundos o minutos en la atmósfera; otros son menos reactivos y permanecen más tiempo, hasta por miles de años, como los clorofluoro carbonos (CFC) (Figura 1).

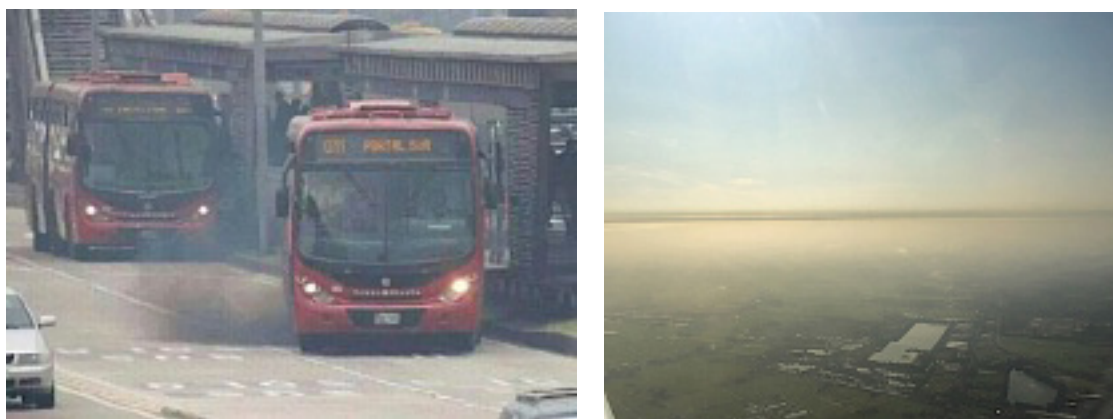


**FIGURA 1.** Especies químicas, su vida media en la atmósfera y escala espacial.

De las especies de la Figura 1 los compuestos de vida corta son generalmente gaseosos aunque ciertos tipos de partículas se encuentran en esta clase. Son, en general, altamente reactivos y desaparecen en minutos, horas o hasta días y se distribuyen en la parte más baja de la atmósfera. Algunos ejemplos son los gases emitidos por la combustión de los combustibles fósiles como los óxidos de nitrógeno o algunos compuestos orgánicos ligeros; se encuentran algunos compuestos formados por la acción de la luz, como los radicales oxhidrilo ( $\cdot\text{OH}$ ) que desaparecen en minutos o segundos; en este grupo se encuentran también los compuestos oxidantes, de los que el ozono es el más usado como indicador de la contaminación ambiental.

Las partículas que se encuentran en la tropósfera son emitidas directamente o se forman por reacciones de agregación, nucleación y condensación. Las emitidas directamente son, en general, gruesas, mientras que las secundarias, que se forman en la atmósfera, son pequeñas, de unas décimas hasta micras de diámetro (ver la Figura 2).

**FIGURA 2.** Partículas a) primarias, que se emiten directamente en la atmósfera, b) secundarias, que se forman in situ (Fuente: 2a, imagen libre de internet, paradero de la Ciudad de México; 2b, tropósfera sobre Amsterdam, propia).



Las partículas primarias se producen por la quema incompleta de combustibles por los motores a diesel o los combustibles sólidos como la madera y el carbón, entre otros. Las partículas secundarias se integran por la condensación de vapores ácidos y compuestos orgánicos semivolátiles y mediante una serie de complejas reacciones de  $\text{NO}_2$  y  $\text{SO}_2$  que finalmente forman nitratos y sulfatos. En la atmósfera se encuentran suspendidas partículas muy distintas como polvo, polen, hollín (carbón), metales (plomo, cadmio), asbestos, sales, pequeñas gotas de ácido sulfúrico, dioxinas, pesticidas, etc. (Figura 3).



**FIGURA 3.** Tamaño relativo de las partículas suspendidas en la atmósfera.

Los aerosoles son las partículas que se constituyen por componentes sólidos, líquidos y gaseosos. Las partículas muy finas agregadas forman los aerosoles, mientras que se suele llamar polvo a la materia sólida de tamaño mayor (de 20 micras o más). El polvo suele ser un problema local debido a que se precipita en horas o hasta días mientras que los aerosoles pueden ser transportados largas distancias. Según su tamaño pueden permanecer suspendidas en la atmósfera desde uno o dos días, las de 10 micrómetros o más y hasta varios días o semanas, las más pequeñas (EPA, 1997). Aunque las partículas gruesas no penetran profundamente en el tracto respiratorio, su efecto en la salud es relevante como lo es su efecto en la calidad del aire y el paisaje. La Tabla 1 presenta un resumen de las características de algunas partículas por su tamaño y sus efectos en la salud humana.

| <i>Diámetro aerodinámico (mm)</i> | <i>Denominación de las partículas suspendidas</i> | <i>Características de distribución</i>  | <i>Efectos en la fisiología humana</i>   |
|-----------------------------------|---|---|--|
| 10                                | PM10  | Depósito en la nariz y garganta   | Puede causar rinitis alérgica, tos, asma y otros síntomas  |
| 2.5 – 10                          | PM2.5 – PM10                                      | Depósito en la cavidad nasal superior y profundamente en el tracto respiratorio | Causa parálisis fibrosa, hipersecreción mucosa branquial e hiperplasia glandular que conduce a broncoespasmos; inhibe la respiración profunda y expansión de los bronquios |
| 2.5                               | PM2.5   | Menos del 10% se deposita en los bronquios, 20-30% se deposita en los pulmones  | Puede causar bronquitis crónica, expansión de los bronquiolos, edema pulmonar, fibrosis bronquial u otros síntomas   |
| 0.1 – 2.5                         | PM0.1– PM2.5                                      | Depósito al interior del tejido alveolar  | Promueve el incremento significativo de los macrófagos en los pulmones, causa enfisema y destrucción alveolar  |

**TABLA 1.** Efectos en la fisiología de las partículas suspendidas en la atmósfera

## Hermosillo

La Comisión solicitó a la parte demandada la información relativa al caso y de esta manera se logró reunir la información técnico-científica y de políticas ambientales locales y estatales, tanto de fuentes oficiales como datos de fuentes académicas a lo largo de la última década para completar el expediente. Como parte del diagnóstico de los científicos se hizo un análisis que incluyó la topografía y ordenamiento territorial, uso de suelo, meteorología, análisis de emisiones de gases y partículas y de concentración atmosférica.

La ciudad de Hermosillo se encuentra situada en el estado de Sonora, noroeste de México. De acuerdo con el censo de 2010, contaba con cerca de 750,000 habitantes en 2010. La ciudad se encuentra en una zona de clima muy seco de acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por García (2004), con lluvias de verano, invierno y escasas todo el año. En el municipio, la sequía se presenta de forma moderada y muy alta al oeste del

municipio y sequía alta cubriendo el resto de la superficie municipal. Se presentan heladas en los meses de diciembre a febrero, de uno a 8 días en promedio mensual. La precipitación es veraniega con un promedio de 40 días al año con un intervalo promedio de 65 a 115 mm mensuales. En los meses de marzo a junio y octubre la presencia de lluvias es mínima, con humedad relativa del 30%. La condición de calma es dominante, principalmente en enero, abril, julio y octubre.



**FIGURA 4.** Localización de Hermosillo, Sonora, México.

El polvo fugitivo es la principal causa de la “nube café” de contaminación que en ciertas épocas del año pueden verse sobre la ciudad de Hermosillo (ver Figura 5). Este polvo es liberado de los caminos sin pavimentar con el paso de vehículos, por actividades de construcción y movimiento de tierra, así como por la erosión del viento sobre áreas sin vegetación en los alrededores de la ciudad. Este es uno de los problemas principales que se presenta en la localidad y que presenta una problemática específica para la comunidad que vive en las zonas no pavimentadas.

área desértica, las condiciones climáticas generan un nivel de contaminantes atmosféricos naturales. Los suelos erosionados, la baja cantidad de precipitación y la velocidad de los vientos impide la precipitación de partículas e incrementa la cantidad de sólidos suspendidos totales que se encuentran presentes en el ambiente dentro del valle en el que se encuentra la ciudad.

No solamente las actividades del hombre generan contaminación en la ciudad. Al estar ubicada dentro de un

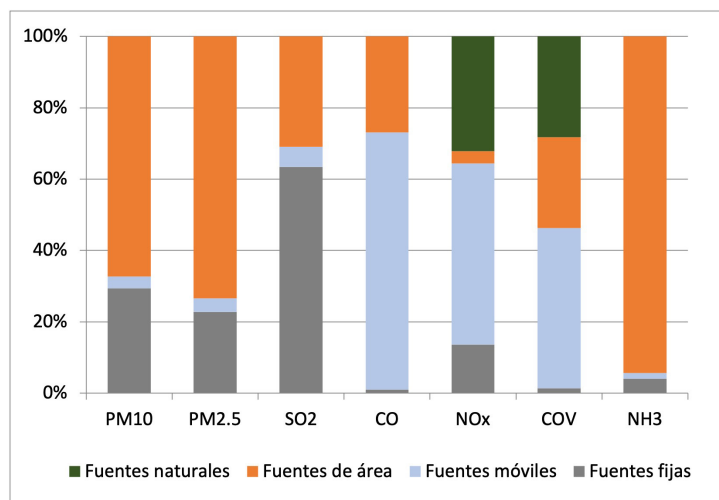
Aunado a esto, durante la época de invierno, las condiciones meteorológicas facilitan la permanencia de los contaminantes en la atmósfera. Las partículas suspendidas aumentan durante los meses de invierno, para volver a descender durante el verano cuando se aumenta la temperatura. Los niveles más altos de material articulado se encuentran en invierno, reduciéndose gradualmente a partir de febrero.



**FIGURA 5.** Contaminación en Hermosillo. Fuente: [www.elimparcial.com](http://www.elimparcial.com).

La magnitud de las emisiones se puede controlar regulando la velocidad y el peso de los vehículos que circulan en un área. Así mismo se puede incrementar el nivel de humedad en los caminos, por medio de riegos, así como con la adición de productos para estabilización de suelos que eviten que las partículas se eleven al aire.

El inventario de emisiones de Hermosillo de gases criterio y material particulado fue realizado por la Red estatal de información del estado de Sonora para el año de 2005. En el inventario de emisiones se presentan las emisiones de diferentes fuentes.



**FIGURA 6.** Contribución por tipo de compuesto y fuente de emisión en Hermosillo (Fuente, CEC 2004).

La Figura 6 muestra la composición de las emisiones de gases criterio y partículas suspendidas PM10 y PM2.5. Se observa que para las PM10 y PM2.5 las fuentes de área, las fuentes móviles y las fuentes fijas son las principales fuentes de emisión. Las fuentes de área, que constituyen el principal aporte de partículas suspendidas, se refieren al rubro de combustión en fuentes de área. El inventario de emisiones proviene del Ayuntamiento de la ciudad de Hermosillo y no consideró las partículas que se emiten de los caminos sin pavimentar. Se observó que, a pesar de los problemas de contaminación, el ayuntamiento de Hermosillo no ha instrumentado algún programa de verificación vehicular en el municipio. El inventario de emisiones de Hermosillo que presentó el Ayuntamiento tampoco incluyó las emisiones erosivas provenientes de las calles sin pavimentar que constituyen uno de los problemas de visibilidad y salud principales del municipio.

Se investigó el funcionamiento de la red local de monitoreo cuya red manual consiste en cuatro estaciones manuales para partículas suspendidas totales y PM10. La red automática, operada estatalmente, tiene una estación en Hermosillo. Se encontró que el programa de monitoreo es deficiente debido a las dificultades de orden técnico-financiero, en conjunto con los cambios administrativos que generan cambios en la plantilla técnica. No hay certificación ni un análisis de calidad de las mediciones ni del estado de las estaciones de monitoreo. Se dispone de una base de datos histórica de partículas suspendidas que sería importante integrar y difundir tanto localmente como a escala nacional. De la inspección se recomendó a) brindar capacitación específica al personal responsable de su operación; b) aplicar un programa de control y aseguramiento de la calidad, y c) integrar los datos que se generen al sistema nacional de calidad del aire, dado que ya sea por población, actividad industrial o por ser zona fronteriza, existe gran interés en conocer las mediciones de calidad del aire en el municipio.

## Resolución

De acuerdo con la opinión técnica, la "Ciudad de Hermosillo, Sonora presenta un problema de contaminación atmosférica por partículas suspendidas debido al tráfico vehicular sobre calles sin pavimentar, exacerbado por la acción de los vientos predominantes." Se conminó a las autoridades a tomar acción debido a que las partículas suspendidas podrían causar un incremento en enfermedades respiratorias en la población, debido a la exposición prolongada de material particulado proveniente de la combustión automotriz como son irritación de ojos y nariz, e incremento de enfermedades respiratorias, así como emisiones de partículas provenientes de los suelos sin pavimentar. Concluye que la pavimentación de las vialidades es una alternativa viable y probada para la reducción de polvos fugitivos producidos por el tráfico vehicular

También se recomendó tomar las medidas necesarias en materia de control vehicular para reducir las crecientes cifras de emisiones de esta fuente, principalmente las de óxidos de nitrógeno, que según las más recientes mediciones han aumentado en la última década. Estos compuestos son, además de tóxicos y contaminantes primarios importantes, precursores del ozono, otros compuestos oxidantes y partículas.

## Conclusiones

Los delitos ambientales asociados con la contaminación y la calidad del aire suelen ser difusos en el sentido que su avance es lento pero constante. Se constituyen por un conjunto de factores de política pública que atentan contra la naturaleza y los ecosistemas, pero encontrar una falla precisa o un responsable único es difícil pues sus causas son multifactoriales. La actividad industrial mal regulada, la calidad del combustible, la falta de una política de movilidad sostenible, la falta de planeación urbana, todas las causas que ocasionan una mala calidad del aire causan problemas en la salud de las personas, el paisaje y los ecosistemas. Indagar en todas las causas y resolverlas puede llevar muchos recursos económicos y de colaboración interinstitucional, así como de educación, que muchas veces no son populares políticamente y, por ello y por su relativa intangibilidad, son difíciles de señalar y atender y reducen en detrimento del bienestar general.

El papel del químico en los delitos ambientales mediante el entendimiento de los procesos químicos asociados y ponerlos a disposición en un lenguaje sencillo para su solución es fundamental para dilucidar y resolver y, principalmente, prevenir, tales delitos.

## Referencias

- CEC (2004). *Environmental pollution in Hermosillo* Submission ID: SEM-04-002, Commission for the Environmental Cooperation. <http://www.cec.org/submissions-on-enforcement/registry-of-submissions/environmental-pollution-in-hermosillo/>
- Davidson, K. J., Haddrill, P. R., Casali, F., Murphy, B., Gibson, L., Robinson, M., Clunie, A., Christie, J., Curran, L., & Carlisle-Davies, F. (2022). *Lockdown labs: Pivoting to remote learning in forensic science higher education*. Science & Justice. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1355030622000582>.



- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Serie Libros Núm. 6 Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México*. ISBN-10 (02) 970-32-1010-4, 97 pp. México.
- Harper-Leatherman, A.S., Huang, L. (2019). *Introduction to Teaching Chemistry with Forensic Science en Teaching Chemistry with Forensic Science* [Harper-Leatherman, A.S., Ling Huang, coords.] Symposium Series Vol. 1324, ISBN 13: 9780841234833, American Chemical Society. EUA.
- Saferstein, R. (2018). *Criminalistics: An Introduction to Forensic Science*, 12<sup>th</sup> ed.; Pearson: Boston, MA.
- Shukla, R. K. (2021). *A new systematic approach of teaching and learning of forensic science for interdisciplinary students: A step towards renovating the forensic education system*. *Forensic Science International: Synergy*, 3, 100146. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589871X21000140>