

EFEECTO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LOS INSECTOS POLINIZADORES DEL CORREDOR INDUSTRIAL GUANAJUATO

EFFECTS OF AIR POLLUTION ON INSECT POLLINATORS
ALONG THE GUANAJUATO INDUSTRIAL CORRIDOR

Ana Rosa Rocha Vallejo¹
José de Jesús Esparza Claudio²
Johnattan Hernández Cumplido³
Domancar Orona Tamayo²
Elizabeth Quintana Rodríguez^{2*}

¹Universidad Tecnológica de León, León,
Guanajuato, México.

²Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías
Competitivas, Guanajuato, México.

³Universidad Nacional Autónoma de México,
Ciudad de México, México.

*equintana@ciatec.mx

Abstract

Industrial operations have brought important consequences such as large factories and favorable changes in the economic and social structure, but they also bring along a decline in the quality of the environment; this point can be highlighted by observing the emission of air pollutants, which have increased in recent decades. One of the places that stand out for this type of work is the industrial corridor of the state of Guanajuato, Mexico, especially the various companies located in the area that includes the municipalities of Celaya, Salamanca, Irapuato, Silao and León. In parallel, the area is also characterized by its abundant agricultural activity of crops particularly assisted by insects and other animals that the flowers attract for pollination. Pollutants such as ozone (O_3) have negative effects on the dispersion of volatile organic compounds (voc) emitted by flowers. This research analyzes the main pollutants that impair the industrial corridor, as well as their

Resumen

La operación industrial ha traído importantes consecuencias como las grandes fábricas y beneficios en la estructura económica y social, sin embargo acarrea consigo el declive en la calidad del ambiente; este punto se evidencia en el incremento de la polución del aire de las últimas décadas. Uno de los lugares que se distinguen por este tipo de quehaceres es el corredor industrial del estado de Guanajuato, México, especialmente las diversas empresas asentadas en la zona que abarca las municipalidades de Celaya, Salamanca, Irapuato, Silao y León. De manera paralela, la zona también se caracteriza por su abundante actividad agrícola de cultivos asistidos por insectos y otros animales que las flores atraen para su polinización. Los contaminantes como el ozono (O_3) comportan efectos negativos sobre la dispersión de compuestos orgánicos volátiles (cov) emitidos por las flores. En la presente investigación se analizan los principales contaminantes que menoscaban el corredor industrial, así como su repercusión en el servicio de polinización. La información aquí expuesta puntualiza la urgente necesidad de sopesar la contaminación del aire como un factor negativo en el servicio de polinización mediada por insectos.

Palabras clave: contaminación del aire, cov florales, declive de polinizadores, ozono.



impact on pollination service. The information presented here points to the urgent need to consider air pollution as a negative factor in insect-mediated pollination service.

Keywords: Air pollution, floral vocs, pollinator decline, ozone.

Introducción

La polinización consiste en la fecundación entre gametos a través del transporte de granos de polen desde las anteras, desembocando en el estigma de la misma flor (autopolinización), o de otra (polinización cruzada). Constituye un proceso esencial para el cultivo agrícola [1]. El servicio de polinización puede llevarse a cabo mediante el arrastre del viento o agua, o bien, a través de un vector biológico como consecuencia de los hábitos de alimentación de ciertos animales. Los más comunes incluyen insectos (polinización entomófila) como las abejas, abejorros, avispas, polillas, y en otros casos, aves y mamíferos [2]. La polinización permite la obtención de alimentos de consumo humano, por lo que cualquier alteración implica un golpe directo en la economía y salud de la sociedad [3].

Por desgracia, las poblaciones de insectos han experimentado reducciones importantes en los últimos años; algunos factores que han contribuido a estas pérdidas son el cambio de uso de suelo, el calentamiento global y la nitrificación [4]. El efecto de la contaminación atmosférica también ha provocado la acelerada extinción de artrópodos e impactado negativamente en la interacción entre plantas y polinizadores; pese a ello, aún escasea la atención a este problema por parte de la comunidad científica. Investigaciones recientes han valorizado que los principales contaminantes del aire son los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el ozono (O_3) [5]. Por otro lado, es sabido que las plantas atraen a sus polinizadores mediante sus aromas florales, producidos por compuestos orgánicos volátiles (COV); en otras palabras, es fundamental la presencia, concentración y proporción de los COV para que el insecto localice a su fuente de alimentación [6]. En síntesis, dichos conta-





minantes atmosféricos alteran estas emisiones al encubrirlas y diluirlas en el ambiente, y terminan por estropear la encomienda de los polinizadores [3].

México carece de evidencia experimental respecto al efecto de la contaminación atmosférica sobre los polinizadores, su emplazamiento floral y la producción de cultivos. De esta suerte se presenta al corredor industrial de Guanajuato como prospecto ideal de estudio para investigar dicho efecto, debido a que es una zona emisora de contaminantes en altas concentraciones y, al mismo tiempo, importante para la producción agrícola [8].

En la presente investigación se analizan los principales contaminantes que menoscaban el corredor industrial, así como su repercusión en el servicio de polinización. La información aquí expuesta puntualiza la urgente necesidad de sopesar la contaminación del aire como un factor negativo en el servicio de polinización mediada por insectos.

Polinizadores a nivel mundial

Existe evidencia de al menos 115 especies de plantas aprovechadas por el hombre que dependen de la polinización por insectos. Además, se estima que entre el 5 y 8 % de la producción mundial de los cultivos (con un valor de mercado anual de 235-577 mil millones de dólares) es directamente atribuible a la polinización animal [9]. Aparte de la producción de alimentos y bebidas, las industrias textil, cosmética y farmacéutica cuentan también con este servicio para la generación de productos [10]. Dentro de los polinizadores de mayor importancia en el mundo se encuentran las abejas europeas (*Apis mellifera*), las cuales abonan con aproximadamente el 80 % de la polinización entomófila [11]. Además de las abejas, otros artrópodos como escarabajos, avispas, mariposas y polillas también contribuyen con este servicio [12]. En el caso de los mamíferos, los murciélagos conforman al coro de polinizadores de plantas de excelencia económica como el agave. También desempeñan esta labor los colibríes, monos, lémures, zarigüeyas, musarañas y otros roedores, lagartijas, moscas, hormigas, mosquitos, caracoles, babosas e incluso salamandras [13].

El declive documentado en las poblaciones de insectos alrededor del mundo ha sido presuntamente ocasionado por la aumentada toxicidad del aire [12], [13] y disminuciones indirectas, debido al desequilibrio con otros organismos de su entorno [14-16]. A través del comportamiento de los insectos se puede observar el agravante de la polución aérea, ya que perjudica su sentido de orientación guiado por el olfato; estos organismos además lo emplean como medio de comunicación para localizar alimentos, conespecíficos, sitios de anidamiento, e inclusive para eludir depredadores [16]. Por ejemplo, los polinizadores perciben señales químicas en el aire para loca-



lizar flores; como consecuencia, el transporte puede verse obstaculizado o, peor aún, destruido por las reacciones químicas contaminantes [17]. Un estudio analizó el efecto de contaminantes como O₃ sobre los *COV* β-mirceno, β-linalool y β-ocimeno (comúnmente encontrados en los racimos de flores), en el proceso se determinó que estos compuestos poseen una alta reactividad a los contaminantes [18]. Al evaluar las amenazas que pesan sobre los polinizadores, se exhorta a la concientización de la presencia de elementos nocivos en el aire.

Polinización en México

Los cultivos de mayor producción en México, de acuerdo con la Encuesta Nacional Agropecuaria, son el maíz, trigo, sorgo y una variedad de hortalizas (Tabla 1). El 85 % de las especies son de frutas, verduras o semillas, tales como jitomate, fresa y cacao; todos consumidos en el país, dependen de los polinizadores para su productividad (Tabla 2) [19].

TABLA 1. Producción anual por cultivo de planta de acuerdo con la Encuesta Nacional Agropecuaria (2019).

CULTIVO	TONELADAS	CULTIVO	TONELADAS
MAÍZ BLANCO	25 811 328.1	CEBOLLA	999 487.2
MAÍZ AMARILLO	5 400 839.4	FRIJOL	828 113.9
TRIGO	3 735 122.9	CALABAZA	651 065.5
SORGO	3 671 068.0	SOYA	310 411.6
JITOMATE	2 860 305.2	ARROZ	157 423.7
CHILE	1 981 390.0	AMARANTO	5 352.5

Fuente. Encuesta Nacional Agropecuaria, 2019.

TABLA 2. Producción por cultivo.

CULTIVO	TONELADAS	TIPO DE POLINIZACIÓN	REFERENCIA
NARANJA	3 500 105.8	Entomófila (abejas principalmente)	[20]
AGUACATE	2 013 590.9	Entomófila (abejas principalmente)	[21]
PLÁTANO	1 927 485.3	Anemófila	[22]
LIMÓN	1 351 055.8	Entomófila (abejas principalmente)	[23]
MANZANA	406 211.1	Entomófila (abejas principalmente)	[24]
UVA	316 213.9	Anemófila o entomófila (abejas principalmente) dependiendo del cultivar	[25]
FRESA	233 467.5	Entomófila (abejas principalmente)	[26]
CACAO	24 265.6	Entomófila (moscas pequeñas)	[27]

Fuente. Encuesta Nacional Agropecuaria, 2019.



El mayor ingreso económico del país es generado por los cultivos dependientes de polinizadores, por tal motivo es crucial defender a los insectos encargados de esta faena para asegurar el proceso del mismo [28]. De forma efectiva, diversas especies de abejas y abejorros —algunos nativos de la región—, llevan a cabo los servicios de polinización en la labranza central (chile, jitomate, cucurbitáceas y cacao) [20], [29], [30]. Tal es el caso del *Bombus ephippiatus* Say (*Hymenoptera*), abejorro nativo localizado en el vasto territorio mexicano, exceptuando Baja California y península de Yucatán [30]. Estos insectos recorren plantas como el tomate (de la familia *Solanaceae*) y el arándano (*Ericaceae*) [31].

Aún en nuestros días se desconoce el número exacto de polinizadores dentro del país, así como de recursos florales necesarios para su supervivencia; sin embargo, el servicio que han otorgado permite una gran producción y, en consecuencia, un mayor ingreso económico. México cuenta con más de 21 mil especies de angiospermas que requieren de polinización efectuada tanto por abejas nativas como por legiones de distintos polinizadores [32]. Aunado a esto, es necesario reafirmar que familias de plantas nativas utilizadas en la gastronomía mexicana, como nopales, calabaza, frijol, aguacate, pitahaya, vainilla, chile, agave y cacao, precisan del servicio de transferencia de polen [34-39].

México es el principal cosechador y distribuidor global de aguacate; en el periodo de enero-julio de 2021, las exportaciones se cuantificaron en 576 286 toneladas, principalmente enviadas a Estados Unidos [33]. Cultivos como el aguacate, pimienta y jitomate generan una cuantiosa suma en el país, y por tal motivo la pérdida de polinizadores o la disminución de su efectividad implican un efecto adverso tanto para la producción como para los ingresos. Se estima que la obtención de aguacate genera un valor de 11 025 767 000 pesos [34]. En el caso del jitomate, México también domina el mercado mundial, con una aportación de 25.11 % del valor total de las exportaciones [35].

Polinización: perspectivas para el estado de Guanajuato











El estado de Guanajuato cuenta con una superficie de 1 millón 480 mil hectáreas destinadas a la producción de cultivos agrícolas. En los municipios de Celaya, Yuriria, Moroleón, Irapuato, Romita, Juventino Rosas, Purísima del





TABLA 3. Cultivos localizados en el corredor industrial de Guanajuato y su tipo de polinización.

Rincón, San Luis de la Paz, Salvatierra y Salamanca se encuentran los cultivos de frijol, manzana, alfalfa, tomate, chabacano, fresa, jícama, cebolla, zanahoria, sorgo y brócoli. Dichos son polinizados por abejas y abejorros, además los cultivos se ubican en núcleos de actividad humana (Tabla 3).

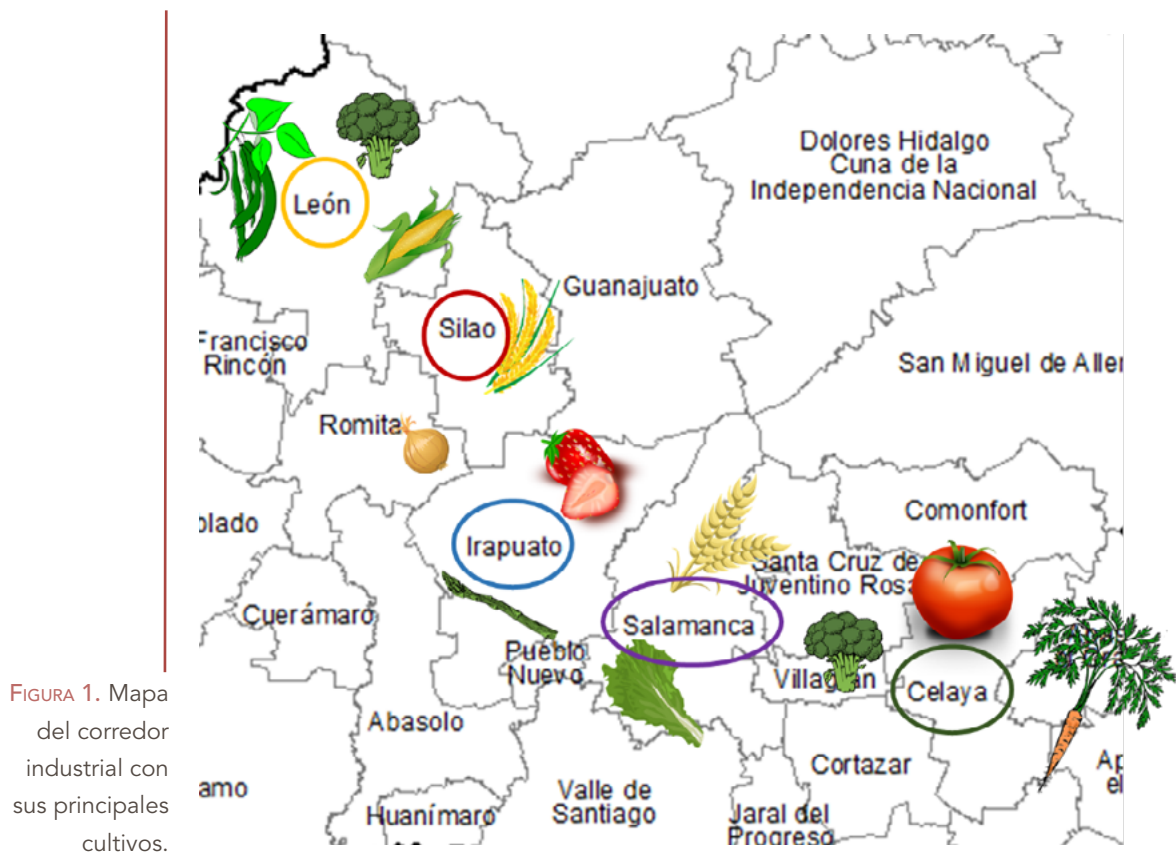
CULTIVO	TIPO DE POLINIZACIÓN	FIGURA	REFERENCIA
MAÍZ	Anemófila		[36]
TRIGO	Anemófila		[37]
CEBADA	Anemófila		[38]
ESPARRAGO	Entomófila (abejas y abejorros)		[39]
ZANAHORIA	Entomófila (principalmente abejas)		[40]
JITOMATE	Entomófila (principalmente abejorros)		[41]
LECHUGA	Entomófila (abejas y moscas)		[42]
BRÓCOLI	Entomófila (principalmente abejas)		[43]
FRESA	Entomófila (abejas)		[26]
CEBOLLA	Entomófila (abejas y moscas)		[44]

Los municipios de Irapuato, Celaya, Salamanca, Silao y León forman parte del corredor industrial de Guanajuato; además de contar con empresas, también son una zona agrícola que produce frijol, tomate, fresa, sorgo y brócoli (Figura 1). Si bien, los cultivos cosechados en la mayor parte de la superficie son independientes de los polinizadores, también hay algunos de exportación con gran valor monetario que sí requieren de estos agentes, tal es el caso del brócoli, fresa, jitomate y espárrago. En 2020, estas cosechas generaron una ganancia de 1866 millones de dólares [45]. Asociado a ello, Guanajuato es el segundo lugar en producción de espárragos a nivel nacional y ocupa el tercero en cebolla y fresa [8]. Conjuntamente, el área metropolitana de León es reconocida como la mayor exportadora de lechuga y brócoli (fresco y congelado); en 2017 distribuyó cerca de 374 mil




toneladas con una derrama de 408 MDD. Dicho sea de paso, ambos productos dependen de la polinización por insectos [46].

En Irapuato la superficie agrícola destinada para siembra es de 57 626 hectáreas; allí se cultiva, principalmente, maíz, alfalfa, trigo y fresa; en particular, esta última es dependiente de insectos polinizadores [47]. A pesar de que Irapuato es conocido como pieza clave en la producción de fresa, también se cultivan alimentos como el espárrago, brócoli, calabaza, zanahoria y lechuga [48]; se estima que el 90 % del espárrago producido se exporta a Estados Unidos, Japón y Europa [49]. Paralelamente, Celaya se destaca por sus actividades agrícolas en la obtención de hortalizas como jitomate y zanahoria; de esta última figura como el mayor productor a nivel nacional, con una aportación de 12 004 toneladas [50].



Relevancia económica del servicio de polinización

En el entorno, los sistemas ecológicos y su capital natural funcionan como protagonistas para el funcionamiento y soporte de la tierra, ya que contribuyen al bienestar humano y, por tanto, asumen parte del valor económico total del planeta [51]. La polinización es un capital natural vital y se realiza en ecosistemas de la misma índole [52]. Los agentes polinizadores integran

A decorative illustration on the left side of the page shows several bees flying along a winding, light blue path that curves across the page. The bees are depicted in various positions, some in flight and others resting on the path. The path starts from the top left and winds downwards and then back up towards the right side of the page.

parte crucial del ecosistema porque el beneficio y biodiversidad que brindan al planeta los liga íntimamente a la vida, y sus contribuciones son visibles gracias a la producción de alimentos; no obstante, su actividad no recibe retribución económica alguna. Nos referiremos a esa remuneración no cubierta como *valor potencial de la polinización* [53].

En 1997 se propuso asignar un precio al capital natural, tal como los servicios ecosistémicos (polinización), otorgándole valores estimados entre 33-125 MMDD por año [54]. Tomemos como ejemplo un recurso vital como el agua, que ostenta un valor incalculable, y ninguna persona podría pagar completamente por su uso diario. En este sentido, la naturaleza posee un enorme e inestimable valor económico [56]. Actualmente se ha estimado que el medio de producción de los servicios ecosistémicos ronda entre 400-539 MMDD por año [55].

Como hemos mencionado al principio, un ejemplo clásico de servicio ecosistémico altamente determinante es la polinización. Se trata de agentes que interactúan con la flora y la polinizan gratuitamente [57]. En ese aspecto, los científicos determinaron el valor económico mundial de esta labor, respecto a los principales cultivos alimentarios en un estimado de 217 MMDD [58]. Es claro que el servicio de polinización es de un capital incalculable, y sin él las pérdidas económicas en mermas de alimentos serían catastróficas, entre 266-434 MDD en un solo año e incrementarían con el paso del tiempo [59].

En México el valor potencial de la polinización agrícola varía dependiendo de la importancia de la producción. Por ejemplo, en el periodo de 2003 fue 2360 MDD, e incrementó paulatinamente hasta llegar a los 4400 MDD en 2018 [60]. En específico, la agricultura guanajuatense generó una demanda potencial de polinización que rondó de 50 a 78 MDD en el año 2018 [60]. Como referencia, se estima que el servicio de polinización alcanza un valor global de 127-184 MMDD [61], [62]. Los efectos negativos que conllevan la pérdida total de polinizadores, en particular las abejas, desencadenarían un desastre y disminución alimentaria y económica a nivel global.

Contaminación del aire en el corredor industrial de Guanajuato

Guanajuato se distingue de otros estados por la extensa proliferación de industria y fabricación que abarca áreas como la agroindustrial, automotriz, químicos, cuero, calzado, textil, farmacéutica y cosmética. Sin embargo, de



manera adversa se han identificado en la atmósfera diversos agentes contaminantes [63] :

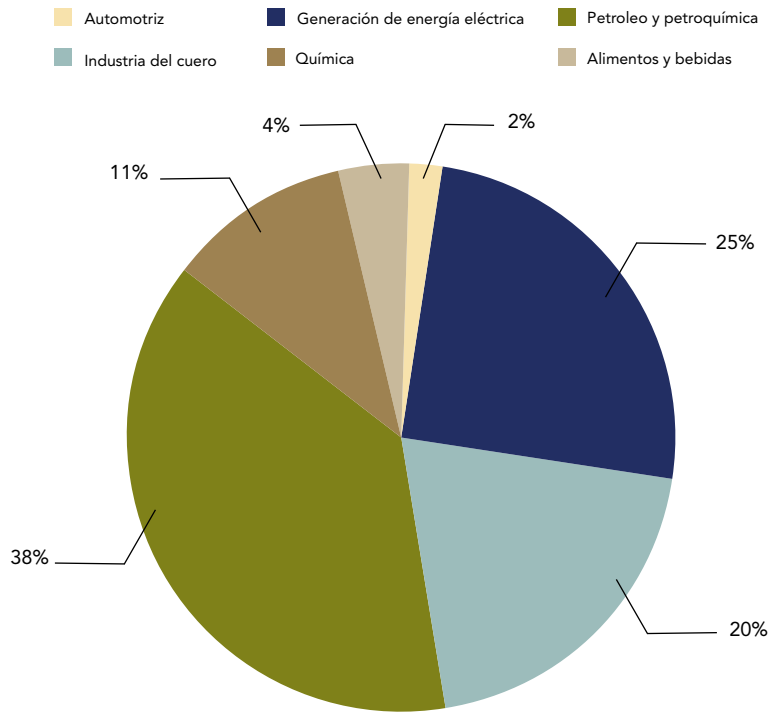
- Compuestos orgánicos (metano, tolueno, n-butano, i-pentano, etano, benceno, n-pentano, propano y etileno)
- Dióxido de azufre (SO_2)
- Dióxido de carbono (CO_2)
- Dióxido de nitrógeno (NO_2)
- Monóxido de carbono (CO)
- Partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$)
- Metano (CH_4)
- NOX

En Salamanca hay una excesiva emisión de SO_2 , mientras que en Irapuato y Celaya predomina el NOX [63]. Esta zona industrial presenta factores de estrés como el tránsito vehicular, actividades de refinación, combustión con gas LP, quema agrícola, uso de solventes, generación de energía eléctrica y uso de pesticidas [64]. En cuanto a las emisiones contaminantes, el 38 % de NOX más los compuestos orgánicos son producto del tránsito vehicular, y el 57 % del registro vehicular se concentra en el corredor industrial de Celaya, Irapuato, León, Salamanca y Silao [65].

En 2020 se manifestaron múltiples reportes del recalcitrante aumento en las quemas agrícolas, viéndose abrasados los municipios de Celaya, León, Salamanca, Salvatierra e Irapuato [65]. Para empeorar las cosas, la industria ladrillera emite altas concentraciones de PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y SO_2 , contribuyendo, si cabe, a la contaminación del estado, especialmente en el municipio de León, debido a su deficiente regulación ambiental. A su vez, la petroquímica y la generación de energía eléctrica ocasionan la mayor cantidad de emisiones de NOX (Figura 2). En el caso de la emisión de compuestos orgánicos, la industria petroquímica contribuye con un 48 %. De forma paralela, la automotriz es responsable de un 38 % en este rubro (Figura 3).

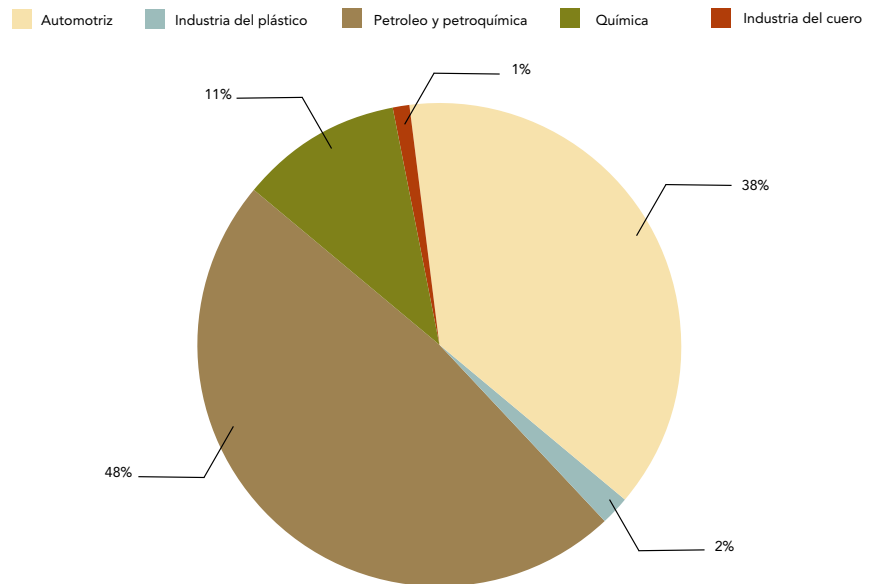


FIGURA 2. Emisión de NOx por industrias alojadas en el estado de Guanajuato en el año 2017.



Fuente: Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio y Precursores del Estado de Guanajuato, 2017.

FIGURA 3. Emisión de compuestos orgánicos por industrias alojadas en el estado de Guanajuato en el año 2017.



Fuente: Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio y Precursores del Estado de Guanajuato, 2017.

En la mayoría de los casos, las altas emisiones de O₃ son consecuencia de la reacción entre NOx y COV; bajo esta circunstancia, en 2019 los municipios



de Salamanca, Irapuato, Celaya y León rebasaron las concentraciones del límite establecido [64]. En México, se efectuaron estudios que auguran para el 2050 la desaparición del 58 % de especies polinizadoras, por efecto del cambio climático y emisiones de gases [66]. Como se ve, faltan investigaciones que concienticen acerca del impacto de los contaminantes aéreos sobre el servicio de polinización. Es menester realizar investigaciones que expongan los efectos contaminantes del corredor industrial, ya que es una zona ideal para este análisis.

Efecto de los contaminantes atmosféricos sobre la emisión de *COV* florales

El éxito en la polinización entomófila se centra en la capacidad del insecto para localizar una fuente, mediante la comunicación química influida por aromas, color y forma de las flores. Los *COV* que emiten las flores son prueba de esta comunicación química, ya que se difunden en el ambiente y son detectados por los polinizadores [67]; asimismo, actúan como fuente de información para los agentes, les permite evaluar la calidad y cantidad de alimento para decidir si realizarán la visita a la flor [6]. Es decir, los polinizadores se distinguen por su capacidad de discernir entre diferentes especies de flores mediante los *COV* [68].

El antagonico principal dentro del coro de contaminantes generados en el mercado industrial del estado es el O_3 ; su presencia daña directamente la mezcla y proporción de *COV* en los racimos, además de coadyuvar la producción de nuevos volátiles, derivados de la reacción del ozono [51]. Un análisis reciente publicó que el incremento en la concentración de O_3 afecta la capacidad de los agentes para detectar *COV* florales y perturba la emisión de *COV* en las plantas [51], [69]. Estudios de electroantenografía mostraron que los abejorros presentan una capacidad de detección reducida de estos compuestos cuando hay un incremento de O_3 en el ambiente [52], mientras en las abejas se ostenta un resultado similar que repercute en su respuesta de detección [17]. Ciertamente es que la contaminación por ozono causa daños en la vegetación; se presenta como la degradación de clorofila y color amarillento en las hojas, así como estragos en la atracción del polinizador.

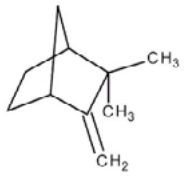

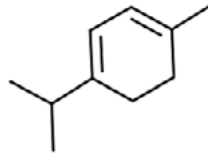
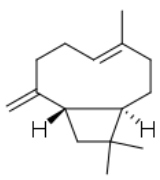
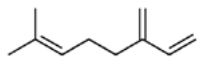
La reacción de las flores frente a los químicos presentes en la atmósfera (O_3 , NO_3 y HO) puede variar desde la eliminación de un átomo de hidrógeno



hasta la incorporación de moléculas en la estructura química, con aceleraciones de reacción únicas para cada *COV* [69, 70]. De tal manera, la señal es degradada, pierde la especificidad y cambia las proporciones de los *COV*. A su vez, estas reacciones conducen a la ruptura de los *COV* y la formación de nuevos volátiles.

TABLA 4. Modificación de los *COV* por reacción con los contaminantes del aire.

Por ejemplo, las reacciones que se llevan con los volátiles (β -mirceno y β -ocimeno con contaminantes HO y O₃) conducen la formación de compuestos imperceptibles para los polinizadores, como acetona, 4-vinil-4-pentanal y 4-metil-3,5-hexadienal (Tabla 4) [71].

COV	ESTRUCTURA QUÍMICA	CONTAMINANTE	PRODUCTO	REFERENCIA
CANFENO		HO, O ₃	CANFENILONA	[72]
		HO	ACETONA	
SABINENO		HO, O ₃	ACETONA	[73]
		O ₃	3-OXO-SABINAKETONA	
A-TERPINENO		HO, O ₃	ACETONA	[74]
CARIOFILENO		O ₃	FORMALDEHÍDO	[75]
MIRCENO		HO	FORMALDEHÍDO	[74]

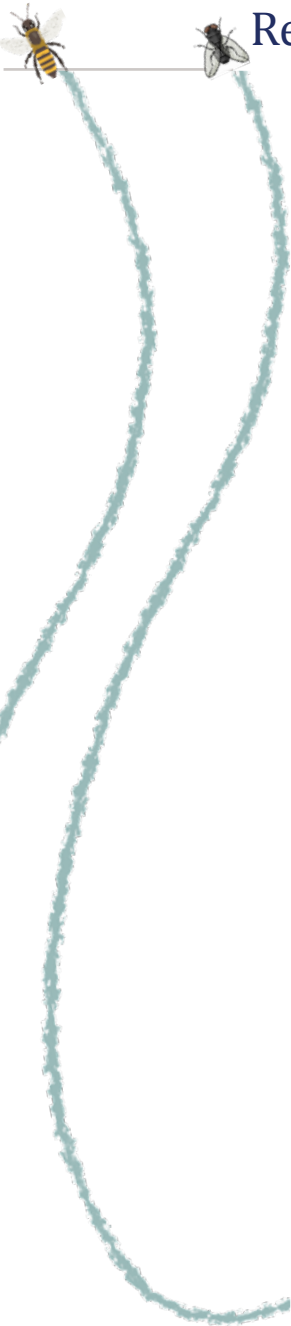
Se ha demostrado que los NO_x emitidos por los motores de diésel alteran la composición de los *COV* florales, e intervienen en la localización de huéspedes [18]. Estos estudios atestiguan que las reacciones de los *COV* junto a los contaminantes del aire alteran las percepciones de los polinizadores, debido a la formación de otros compuestos químicos que diluyen la señal en el ambiente.



Conclusiones

En México apenas comienza el escrutinio de los contaminantes habituales que podrían intervenir en el servicio de polinización. Destaca en este aspecto la zona del corredor industrial, que funge como productor, protagonista a nivel nacional, de cultivos dependientes de polinizadores y también como antagonista por favorecer a los contaminantes aéreos. En la presente investigación se postulan los efectos adversos en el servicio de polinización debido a la formación de nuevos compuestos o la dilución de los COV. Hemos concluido que los contaminantes aéreos intervienen en la polinización, por lo que el corredor industrial resulta prospecto de estudio para analizar el efecto negativo de los contaminantes sobre los compuestos orgánicos volátiles florales y, por tanto, la polinización.

Referencias

- 
- [1] E. Gute, R. O. David, Z. A. Kanji y J. P. D. Abbatt, "Ice nucleation ability of tree pollen altered by atmospheric processing," *ACS Earth Sp. Chem.*, vol. 4, no. 12, pp. 2312-2319, 2020.
- [2] R. G. Porto et al., "Pollination ecosystem services: A comprehensive review of economic values, research funding and policy actions," *Food Secur.*, vol. 12, no. 6, pp. 1425-1442, 2020.
- [3] S. Bänsch, T. Tschardt, D. Gabriel y C. Westphal, "Crop pollination services: Complementary resource use by social vs solitary bees facing crops with contrasting flower supply," *J. Appl. Ecol.*, vol. 58, no. 3, pp. 476-485, 2021.
- [4] D. L. Wagner, R. Fox, D. M. Salcido y L. A. Dyer, "A window to the world of global insect declines: Moth biodiversity trends are complex and heterogeneous," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 118, no. 2, p. e2002549117, 2021.
- [5] C. M. Reitmayer, J. M. W. Ryalls, E. Farthing, C. W. Jackson, R. D. Girling y T. A. Newman, "Acute exposure to diesel exhaust induces central nervous system stress and altered learning and memory in honey bees," *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, pp. 5793, 2019, DOI: 10.1038/s41598-019-41876-w
- [6] L. Conchou, P. Lucas, C. Meslin, M. Proffit, M. Staudt y M. Renou, "Insect odorscapes: from plant volatiles to natural olfactory scenes," *Front. Physiol.*, vol. 10, pp. 972, 2019.



- [7] J. A. Riffell et al., "Flower discrimination by pollinators in a dynamic chemical environment," *Science*, vol. 344, no. 6191, pp. 1515-1518, 2014.
- [8] sDAYR, "Diagnóstico agrológico del Estado de Guanajuato," Guanajuato, 2020.
- [9] S. G. Potts, T. Breeze y B. Gemmill Herren, "Crop Pollination," in *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, N. K. Van Alfen, Ed. Oxford: Academic Press, 2014, pp. 408-418.
- [10] G. Martin, C. Fontaine, F. Accatino y E. Porcher, "New indices for rapid assessment of pollination services based on crop yield data: France as a case study," *Ecol. Indic.*, vol. 101, pp. 355-363, 2019.
- [11] N. Dorjay, D. P. Abrol y B. Vikram, "Effect of Bee Attractants on Foraging Activities of Honeybees *Apis mellifera*, *A. dorsata* and *A. cerana* on *Cucumis sativus* L. and *Morinda charantia* L. Flowers," *J. Apic.*, vol. 2, pp. 123-134, 2022.
- [12] S. Debnam, A. Saez, M. A. Aizen y R. M. Callaway, "Exotic insect pollinators and native pollination systems," *Plant Ecol.*, vol. 222, no. 9, pp. 1075-1088, 2021.
- [13] A. Das, S. Sau, M. K. Pandit y K. Saha, "A review on: Importance of pollinators in fruit and vegetable production and their collateral jeopardy from agro-chemicals," *J. Entomol. Zool. Stud.*, vol. 6, no. 4, pp. 1586-1591, 2018.
- [14] B. C. Lister and A. Garcia, "Climate-driven declines in arthropod abundance restructure a rainforest food web," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 115, no. 44, pp. E10397-E10406, 2018.
- [15] F. Sánchez-Bayo y K. A. G. Wyckhuys, "Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers," *Biol. Conserv.*, vol. 232, pp. 8-27, 2019.
- [16] G. G. Thimmegowda et al., "A field-based quantitative analysis of sublethal effects of air pollution on pollinators," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 117, no. 34, pp. 20653-20661, 2020.
- [17] N. Masui, E. Agathokleous, T. Mochizuki, A. Tani, H. Matsuurra y T. Koike, "Ozone disrupts the communication between plants and insects in urban and suburban areas: an updated insight on plant volatiles," *J. For. Res.*, vol. 32, pp. 1337-1349, 2021.
- [18] J. M. W. Ryalls et al., "Anthropogenic air pollutants reduce insect-mediated pollination services," *Environ. Pollut.*, vol. 297, pp. 118847, 2022.
- [19] V. Hernández-Villa, H. Vibrans, E. Uscanga-Mortera y A. Aguirre-Jaimes, "Floral visitors and pollinator dependence are re-



lated to floral display size and plant height in native weeds of central Mexico," *Flora*, vol. 262, p. 151505, 2020.

- [20] F. Baena-Díaz, E. Chévez y L. Porter-Bolland, "¿Qué sabemos de las abejas sin aguijón (*Hymenoptera: Apidae, Meliponini*) en México?: Diversidad, Ecología y polinización," *Acta zoológica Mex.*, pp. 1-17, 2023.
- [21] K. Dymond, J. L. Celis Diez, S. G. Potts, B. G. Howlett, B. K. Willcox y M. P. D. Garratt, "The role of insect pollinators in avocado production: A global review," *J. Appl. Entomol.*, vol. 145, no. 5, pp. 369-383, 2021.
- [22] A. Waniale et al., "Use of timelapse photography to determine flower opening time and pattern in banana (*Musa* spp.) for efficient hand pollination," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1-9, 2021.
- [23] A. Sajjad, W. Akram, W. Muhammad, M. Ahmad y A. Ahmad, "Pollination in Citrus," in *Citrus Production*, CRC Press, 2022, pp. 303-310.
- [24] A. Pardo and P. A. V Borges, "Worldwide importance of insect pollination in apple orchards: A review", *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 293, pp. 106839, 2020.
- [25] A. Sabir and H. Kucukbasmaçi, "Agronomic response of 'Michele palieri' (*Vitis vinifera* L.) table grape to intraspecific diploid and interspecific tetraploid pollinizers," *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 272, pp. 109589, 2020.
- [26] G. MacInnis and J. R. K. Forrest, "Pollination by wild bees yields larger strawberries than pollination by honey bees", *J. Appl. Ecol.*, vol. 56, no. 4, pp. 824-832, 2019.
- [27] M. Toledo-Hernández, T. Tschardtke, A. Tjoa, A. Anshary, B. Cyio y T. C. Wanger, "Landscape and farm-level management for conservation of potential pollinators in Indonesian cocoa agroforests", *Biol. Conserv.*, vol. 257, pp. 109106, 2021.
- [28] SADER, SEMARNAT, SENASICA, CONABIO y CONANP, "Diagnóstico. Situación actual de los polinizadores en México", CDMX, 2021.
- [29] W. M. Janousek et al., "Recent and future declines of a historically widespread pollinator linked to climate, land cover y pesticides", *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 120, no. 5, 2023.
- [30] O. Martínez López, J. B. Koch, M. A. Martínez Morales, D. Navarrete Gutiérrez, E. Enríquez y R. Vandame, "Reduction in the potential distribution of bumble bees (*Apidae: Bombus*) in Mesoamerica





- under different climate change scenarios: Conservation implications", *Glob. Chang. Biol.*, vol. 27, no. 9, pp. 1772–1787, 2021.
- [31] K. Maebe et al., "Bumblebee resilience to climate change, through plastic and adaptive responses", *Glob. Chang. Biol.*, vol. 27, no. 18, pp. 4223–4237, 2021.
- [32] J. L. Villaseñor, "Diversidad y distribución de la familia Asteraceae en México", *Bot. Sci.*, vol. 96, no. 2, pp. 332–358, 2018.
- [33] D. de análisis estratégico SIAP, "Escenario mensual de productos agroalimentarios: Aguacate". https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/759460/Aguacate_Agosto_2022.pdf
- [34] A. Borrego y T. C. Allende, "Principales detonantes y efectos socioambientales del boom del aguacate en México," *J. Lat. Am. Geogr.*, vol. 20, no. 1, pp. 154–184, 2021.
- [35] SAGARPA, "Planeación agrícola nacional 2017–2030, Jitomate mexicano," CDMX, 2017.
- [36] D. Timerman and S. C. H. Barrett, "The biomechanics of pollen release: new perspectives on the evolution of wind pollination in angiosperms", *Biol. Rev.*, vol. 96, no. 5, pp. 2146–2163, 2021.
- [37] A. H. Ganie, Z. A. Reshi y B. A. Wafai, "Quantitative, Qualitative Pollen Characters and Pollination Mechanisms: A Case Study of Ten *Potamogeton* Species", *Inl. Water Biol.*, pp. 1–7, 2022.
- [38] G. Bugin et al., "Agriculture and Pollinating Insects, No Longer a Choice but a Need: EU Agriculture's Dependence on Pollinators in the 2007–2019 Period", *Sustainability*, vol. 14, no. 6, p. 3644, 2022.
- [39] M. Kapoor, P. Mawal, V. Sharma and R. C. Gupta, "Analysis of genetic diversity and population structure in *Asparagus* species using SSR markers", *J. Genet. Eng. Biotechnol.*, vol. 18, no. 1, pp. 1–10, 2020.
- [40] A. Gaffney, B. Bohman, S. R. Quarrell, P. H. Brown and G. R. Allen, "Frequent Insect Visitors Are Not Always Pollen Carriers in Hybrid Carrot Pollination", *Insects*, vol. 9, no. 2, p. 61, 2018.
- [41] A. Dingley et al., "Precision Pollination Strategies for Advancing Horticultural Tomato Crop Production", *Agronomy*, vol. 12, no. 2, pp. 518, 2022.
- [42] K. Seki, "Detection of candidate gene *Lsacos5* and development of InDel marker for male sterility by ddRAD-seq and resequencing analysis in lettuce", *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–8, 2022.



- [43] S. Singh, J. Singh, P. K. Chhuneja y R. Singh, "Impact of *Apis mellifera* linnaeus in augmenting seed yield of broccoli, *Brassica oleracea* var. Italica Plenck," 2019.
- [44] S. D. Divija and P. D. Kamala Jayanthi, "Pollination efficiency and foraging behaviour of honey bees and flies to onion *Allium cepa* L.", *J. Apic. Res.*, vol. 61, no. 5, pp. 688-694, 2022.
- [45] J. Rosales-Ortiz, "Lidera Guanajuato en exportación de brócoli, coliflor y zanahoria," Mexicoxport. <https://mexicoxport.com/lidera-guanajuato-en-exportacion-de-brocoli-coliflor-y-zanahoria/>
- [46] E. Martínez-Borrego and J. L. Hernández-Pérez, "Integración comercial de los agricultores de la Zona Metropolitana de León, en Guanajuato", *Política y Cult. UAM*, vol. 52, pp. 9-37, 2019.
- [47] Implan, "Programa municipal de desarrollo urbano y de ordenamiento ecológico territorial de Irapuato," Irapuato, 2020.
- [48] PCEF, "Compendio de indicadores 2018". <https://www.agricultura.gob.mx/sites/default/files/sagarpa/document/2020/03/19/1894/19032020-guanajuato-pcef-compendio-2018.pdf>
- [49] TecnoAgro, "Producción de esparrago", TecnoAgro.com.mx. <https://tecnoagro.com.mx/no.-139/produccion-de-esparrago>
- [50] Gobierno del estado de Guanajuato, "Es Guanajuato principal productor de zanahoria del país", Boletines Guanajuato. <https://boletines.guanajuato.gob.mx/2022/07/13/es-guanajuato-principal-productor-de-zanahoria-del-pais/>
- [51] E. Agathokleous, Z. Feng y J. Penuelas, "Ozone pollution disrupts plant-pollinator systems," *Trends Ecol. Evol.*, vol. 37, no. 11, pp. 939-941, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.08.004>
- [52] M. Vanderplanck et al., "Ozone pollution alters olfaction and behavior of pollinators," *Antioxidants*, vol. 10, no. 5, p. 636, 2021.
- [53] P. A. Henríquez-Piskulich, C. Schapheer, N. J. Vereecken y C. Villagra, "Agroecological strategies to safeguard insect pollinators in biodiversity hotspots: Chile as a case study," *Sustainability*, vol. 13, no. 12, p. 6728, 2021.
- [54] R. Costanza et al., "The value of the world's ecosystem services and natural capital," *Nature*, vol. 387, no. 6630, pp. 253-260, 1997, DOI: 10.1038/387253a0.
- [55] R. Costanza et al., "Changes in the global value of ecosystem services," *Glob.*



- Environ. Chang.*, vol. 26, pp. 152–158, 2014, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>
- [56] M. Vardon et al., "From COVID-19 to Green Recovery with natural capital accounting," *Ambio*, vol. 52, no. 1, pp. 15–29, 2023, DOI: [10.1007/s13280-022-01757-5](https://doi.org/10.1007/s13280-022-01757-5)
- [57] P. Sutton, "If dollars rule the world, why don't the bees get a bailout?", *The conversation*. <https://theconversation.com/if-dollars-rule-the-world-why-dont-the-bees-get-a-bailout-38384>
- [58] D. M. Bauer, "Valuing pollination services: a comparison of approaches," in *Valuing Ecosystem Services*, Edward Elgar Publishing, 2014.
- [59] M. R. Berenbaum, "The Global Pollinator Situation and Potential Environmental Impacts (PowerPoint)", en *Agricultural Outlook Forum 2009*, 2009. <https://ideas.repec.org/p/ags/usao09/50608.html>
- [60] L. M. Galindo and S. Basurto, "Valoración monetaria del servicio de polinización en Mexico. Informe del proyecto NCAVES, Nueva York, 2021.
- [61] D. M. Bauer and I. Sue Wing, "The macroeconomic cost of catastrophic pollinator declines", *Ecol. Econ.*, vol. 126, pp. 1-13, 2016, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.01.011>
- [62] J. T. Murphy, T. D. Breeze, B. Willcox, S. Kavanagh y J. C. Stout, "Globalisation and pollinators: Pollinator declines are an economic threat to global food systems", *People Nat.*, vol. 4, no. 3, pp. 773-785, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1002/pan3.10314>
- [63] SEMARNAT, "Programa de la calidad del aire_Salamanca-Celaya_Irapuato," Gob. mx. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/796834/7_ProAire_Salamanca-Celaya_Irapuato.pdf
- [64] SMAOT, "Informe de estado y tendencia de la calidad del aire 2019". [Smaot.guanajuato.gob.mx. https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/calidad-del-aire/1/Sistema-de-Monitoreo-de-la-calidad-del-Aire-del-Estado-de-Guanajuato-\(SIMEG\)](https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/calidad-del-aire/1/Sistema-de-Monitoreo-de-la-calidad-del-Aire-del-Estado-de-Guanajuato-(SIMEG))
- [65] SMAOT, "Informe Ambiental del Estado de Guanajuato 2020" [Portalsocial.guanajuato.gob.mx. https://portalsocial.guanajuato.gob.mx/sites/default/files/documentos/2021_SMAOT_Informe_ambiental_estado_guanajuato_2020_20210324.pdf](https://portalsocial.guanajuato.gob.mx/sites/default/files/documentos/2021_SMAOT_Informe_ambiental_estado_guanajuato_2020_20210324.pdf)
- [66] L. Galetto et al., "Risks and opportunities associated with pollinators' conservation and management of pollination services in Latin America".



Ecología Austral, 2022. DOI:
10.25260/EA.22.32.1.0.1790

- [67] M. Proffit *et al.*, "Chemical signal is in the blend: bases of plant-pollinator encounter in a highly specialized interaction", *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, p. 10071, 2020.
- [68] M. Gérard, M. Vanderplanck, T. Wood y D. Michez, "Global warming and plant-pollinator mismatches", *Emerg. Top. life Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 77–86, 2020.
- [69] J. D. Blande, "Effects of air pollution on plant-insect interactions mediated by olfactory and visual cues", *Curr. Opin. Environ. Sci. Heal.*, vol. 19, p. 100228, 2021.
- [70] J. D. Fuentes *et al.*, "Biogenic hydrocarbons in the atmospheric boundary layer: a review", *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 81, no. 7, pp. 1537–1576, 2000.
- [71] Q. S. McFrederick, J. D. Fuentes, J. C. Kathilankal y M. Lerdau, "Effects of air pollution on biogenic volatiles and ecological interactions", *Oecologia*, vol. 160, no. 3, pp. 411–420, 2009.
- [72] N. Carslaw, "Indoor Gas-Phase Chemistry," in *Handbook of Indoor Air Quality*, Springer, 2021, pp. 1-18.
- [73] S. Shrestha *et al.*, "Traffic, transport y vegetation drive VOC concentrations in a major urban area in Texas," *Sci. Total Environ.*, vol. 838, p. 155861, 2022.
- [74] T. Berndt, "Peroxy radical processes and product formation in the OH radical-initiated oxidation of α -pinene for near-atmospheric conditions," *J. Phys. Chem. A*, vol. 125, no. 41, pp. 9151-9160, 2021.
- [75] H. Li *et al.*, "Atmospheric organic vapors in two European pine forests measured by a Vocus PTR-TOF: insights into monoterpene and sesquiterpene oxidation processes," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 21, no. 5, pp. 4123–4147, 2021.

