



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA SALUD

MAESTRÍA EN SALUD PÚBLICA

PROYECTO TERMINAL

**FUNCIONES EJECUTIVAS Y EXPOSICIÓN CRÓNICA A
MATERIAL PARTICULADO EN HABITANTES DE
HIDALGO**

Para obtener el grado de Maestra en Salud Pública

PRESENTA

Norma Barragán López

Directora

Dra. en Psic. Andrómeda Ivette Valencia Ortiz

Comité Tutorial

Codirector: Dr. Alfredo Padilla López

Asesor: Dr. Rubén García Cruz

Lectora: D. en S.P. Josefina Reynoso Vázquez

Pachuca de Soto., Hidalgo., México., junio 2025



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias de la Salud

School of Health Sciences

Área Académica de Medicina

Department of Medicine

Maestría en Salud Pública

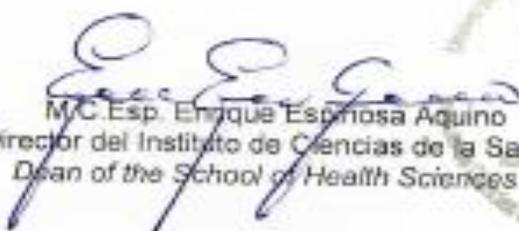
Master in Public Health

Oficio Núm. ICSa/AAMMSP/176/2024
Asunto: Autorización de Impresión de PPT
Pachuca de Soto, Hgo., agosto 26 del 2024

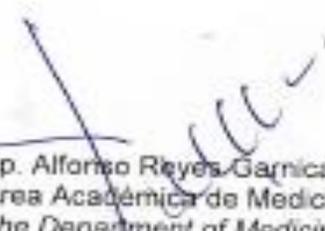
L.M.C. NORMA BARRAGÁN LÓPEZ
EGRESADA DE LA MAESTRÍA EN SALUD PÚBLICA
GRADUATED FROM THE MASTER'S DEGREE IN PUBLIC HEALTH

Con fundamento en el Título Tercero, Capítulo V en su Artículo 51, Fracc. III y IV del Estatuto General de la UAEH y en relación con lo establecido por el Título Quinto, Capítulo V, Sección Primera en su Artículo 127 y Artículo 130 Fracción III de dicho ordenamiento legal, así como los Artículos 124, 125, 126 y 127 del Reglamento de Estudios de Posgrado, comunicamos a usted, que el Comité Tutorial de su Proyecto Terminal denominado *"Funciones Ejecutivas y exposición crónica a material particulado en habitantes de Hidalgo."* considera que ha sido concluido satisfactoriamente, por lo que puede proceder a la impresión de dicho trabajo.

Atentamente,
"Amor, Orden y Progreso"


M.C. Esp. Enrique Espinosa Aquino
Director del Instituto de Ciencias de la Salud
Dean of the School of Health Sciences




MC. Esp. Alfonso Reyes Garnica
Jefe del Área Académica de Medicina
Chair of the Department of Medicine


D. en C. Lydia Lopez Portigo
Coordinadora de Posgrado del ICSa
Director of Graduate Studies of ICSa


D.A.D.E.S. Maria del Consuelo Cabrera Morales
Coordinadora de la Maestría en Salud Pública
Director of Graduate Studies Master in Public Health

EEAVAL01LLP/MCCB/teacher*



Pachuca de Soto, Hidalgo., 01 de junio del 2025

D. en S.P. JOSEFINA REYNOSO VÁZQUEZ
COORDINADORA DE LA MAESTRÍA EN SALUD PÚBLICA
P r e s e n t e.

Los integrantes del Comité Tutorial del egresado (a) Norma Barragán López, con número de cuenta 222831, comunicamos a usted que el Proyecto Terminal denominado "Funciones Ejecutivas y exposición crónica a material particulado en habitantes de Hidalgo" está concluido y se encuentra en condiciones de continuar el proceso administrativo para proceder a la autorización de su impresión.

A t e n t a m e n t e.
"Amor, Orden y Progreso"

Dra. Andrómeda Ivette Valencia Ortiz

Director

Dr. Alfredo Padilla López

Codirector

Dr. Rubén García Cruz

Asesor

Agradecimientos

A mis padres, hermano, mi esposo y mi hija, por ser el motor y la luz en mi vida.

A mi amiga Caro, por su ayuda invaluable.

Agradezco en especial a mi directora de proyecto la D. en Psic. Andrómeda Ivette Valencia Ortiz, por la orientación y ayuda que me brindó para la realización de este, por su apoyo y amistad que me permitieron aprender mucho más, y el impulso continuo para lograr mi meta.

Agradezco al Dr. Alfredo Padilla López, mi Codirector, por asesorarme y compartirme sus conocimientos en estadística para la realización del proyecto.

Agradezco a mi comité de evaluación, que me han brindado el camino para alcanzar este proyecto y el impulso durante este.

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT),

Por brindarme el apoyo esencial para desarrollar el proyecto de manera adecuada, y por darme el recurso para alcanzar mi meta.

Agradezco a cada uno de los pacientes que aceptaron participar en este estudio de investigación, la experiencia de conocerlos y aprender de ellos nunca la olvidaré.

Agradezco a la Unidad de Salud de Mineral del Chico, la casa de adultos mayores en Atotonilco de Tula y la Escuela Superior de Atotonilco de Tula, que me permitieron usar sus instalaciones para la aplicación de la Bateria Neuropsicológica y me acercaron con los usuarios para que se interesaran en participar en el estudio.

Agradezco a los compañeros del Laboratorio de Neuropsicología de la Facultad de Psicología de la UNAM

Por haberme enseñado la aplicación del instrumento BANFE-2 y compartir conmigo experiencias y conocimiento.

RESUMEN

El declive de la salud cognitiva es la principal causa de múltiples discapacidades y enfermedades, por lo que derivado de la contaminación del aire que ha crecido exponencialmente en las últimas décadas se ha tomado como un factor de riesgo importante para el deterioro de esta.

La función cognitiva no solo engloba los dominios de atención, percepción, memoria, aprendizaje y funciones ejecutivas, es sobre todo una formación social y cultural moldeada por las personas que encarnan el desarrollo social.

Por lo que dentro del ambiente la materia particulada (PM) que se presenta en el aire aumenta los riesgos para la salud de la población, lo cual puede incurrir en un potencial y poderoso daño, ya que cuando se inhala a través del sistema respiratorio, puede desencadenar reacciones superficiales en la piel, activar mecanismos de defensa e incluso causar estrés oxidativo a nivel biológico.

Esto indica el impacto que tiene el entorno circundante en el desarrollo de un individuo, incluso aquellos que luchan contra factores ambientales que pueden dañar el sistema nervioso que pueden mitigar estos efectos con estímulos adecuados.

En este proyecto se estudió la forma en que los contaminantes del aire, en especial el material particulado (PM), puede causar daños a diversos aparatos y sistemas en el organismo, pero en especial a la corteza prefrontal, el área más anterior del cerebro que aloja en gran medida a las Funciones Ejecutivas, funciones cerebrales del más alto nivel que nos permiten resolver los desafíos diarios y convivir en sociedad. Se aplicó a 60 sujetos la Batería Neuropsicológica de Funciones Ejecutivas y Lóbulos Frontales BANFE-2, en dos grupos de 30 individuos expuestos a PM de forma crónica y 30 sujetos no expuestos que habitan un lugar con buena calidad del aire, para saber si se puede hallar alteración en las Funciones Ejecutivas de los sujetos expuestos.

Dentro de los resultados, no se encontró una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos, sin embargo, al comparar las medianas existe un desempeño menor de los sujetos expuestos en tres de las 4 áreas que evalúa la prueba.

En conclusión, es importante continuar con estudios de este tipo con muestras más grandes que permitan mayor solidez estadística, se encontró también que los sujetos mejor puntuados, a pesar de estar en el grupo de los expuestos, contaban con un grado académico más elevado, lo que coincide con las investigaciones que mencionan que la educación puede actuar como un factor protector ante el deterioro cognitivo producido por otras causas.

Palabras clave: Material Particulado PM, Deterioro Cognitivo, Funciones Ejecutivas, BANFE-2

Summary

The decline in cognitive health is the leading cause of multiple disabilities and diseases. Therefore, due to air pollution, which has grown exponentially in recent decades, it has been considered a major risk factor for its deterioration.

Cognitive function not only encompasses the domains of attention, perception, memory, learning, and executive functions; it is, above all, a social and cultural formation shaped by the individuals who embody social development.

Therefore, within the environment, particulate matter (PM) present in the air increases the risks to the health of the population, which can incur potential and powerful damage. When inhaled through the respiratory system, it can trigger superficial reactions in the skin, activate defense mechanisms, and even cause oxidative stress at the biological level.

This indicates the impact that the surrounding environment has on an individual's development, even those who fight against environmental factors that can damage the nervous system can mitigate these effects with appropriate stimuli.

This project studied how air pollutants, especially particulate matter (PM), can damage various organs and systems in the body, but particularly the prefrontal cortex, the most anterior area of the brain that largely houses executive functions, the highest-level brain functions that allow us to solve daily challenges and coexist in society. The Neuropsychological Battery of Executive Functions and Frontal Lobes (BANFE-2) was administered to 60 subjects. These groups included 30 individuals chronically exposed to PM and 30 unexposed individuals living in a location with good air quality. This was done to determine whether any alterations in the

executive functions of the exposed subjects could be detected.

Among the results, no statistically significant differences were found between the groups; however, when comparing the medians, the exposed subjects performed less well in three of the four areas assessed by the test.

In conclusion, it is important to continue studies of this type with larger samples that allow for greater statistical robustness. It was also found that the highest-scoring subjects, despite being in the exposed group, had higher academic degrees, which is consistent with research indicating that education can act as a protective factor against cognitive decline caused by other causes.

Keywords: *Particulate Matter (PM), Cognitive Impairment, Executive Functions, BANFE-2*

ÍNDICE

Agradecimientos.....	3
RESUMEN	4
INTRODUCCIÓN	15
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
Pregunta de investigación	19
MARCO TEÓRICO.....	20
Capítulo 1. Contaminación ambiental.....	20
Epidemiología de las afectaciones por mala calidad del aire.....	29
Capítulo 2. Funciones ejecutivas.....	35
JUSTIFICACIÓN	49
OBJETIVOS	51
Objetivo general.....	51
Objetivos específicos	51
Hipótesis	51
MATERIAL Y METODOS	52
Diseño del estudio	52
Fuente: (Elaboración propia, 2018).....	53
Población de estudio.....	54
Muestra.....	54
Lugar y tiempo	54
Criterios de elegibilidad	57
Criterios de inclusión.....	57
Criterios de exclusión.....	57
Criterios de eliminación.....	57
Variables de estudio	58
Instrumento	60
RESULTADOS.....	62
DISCUSIÓN	69
CONCLUSIONES.....	72
LIMITACIONES DEL ESTUDIO	73
MARCO LEGAL	73
Recursos Materiales y financiamiento	75
CONSIDERACIONES ÉTICAS.....	76

REFERENCIAS.....	77
14. ANEXO. Consentimiento Informado	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de contaminantes para el medio.....	20
Tabla 2. Obtención del Índice AIRE Y SALUD para PM10.....	34
Tabla 3. Obtención del Índice AIRE Y SALUD para PM2.5.....	35
Tabla 4. Municipios que conforman la cuenca atmosférica de Tula.	55
Tabla 5. Variables de estudio	58
Tabla 6. Porcentajes por sexo de expuestos y no expuestos	62
Tabla 7. Mediana de ambos grupos para cada uno de los 4 subtotales de las áreas prefrontales que evalúa la BANFE	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Límite de partículas PM10. Ilustración SEQ/ ARABIC 7. Concentración anual PM10 (promedio anual de los promedios de 24 horas), 2000-20016.	25
Figura 2 Concentración (ug-m3).....	26
Figura 3 Concentración Pm2 anual	27
Figura 4 Concentración Anual PM.....	28
Figura 5 Concentraciones promedio anuales de PM en norte américa.....	29
Figura 6 Muertes atribuibles a la contaminación ambiental	30
Figura 7 Corte transversal del encéfalo.....	38
Figura 8 Vista lateral del encéfalo dentro de la cavidad craneal	38
Figura 9 Diagrama de flujo del procedimiento.	53
Figura 10 Cuencas atmosféricas del estado de Hidalgo: I) Tula, II) Pachuca y III) Tulancingo.	55
Figura 11 Distribución geográfica de las emisiones de PM10 y PM25 en el estado de Hidalgo.	56
Figura 12 Ocupación de los participantes expuestos	63
Figura 13 Ocupación de los participantes no expuestos.	63
Figura 14 Años de escolaridad de los participantes no expuestos	64
Figura 15 Primera parte del Perfil Neuropsicológico del sujeto ejemplo.	67
Figura 16 Segunda parte del Perfil Neuropsicológico del sujeto ejemplo.	68

INTRODUCCIÓN

El ambiente, se define como la suma de todos los componentes vivos y no vivos, se caracteriza por procesos de interacción, mismos que tienen como punto central la adaptación a través del uso de recursos disponibles para vivir; desde el aire para la respiración, hasta la obtención y procesamiento de la materia para su consumo (UNAM, 2017). No obstante, entre los distintos tipos de ambientes se desarrollan actividades que no son siempre del total beneficio para los componentes, pues los múltiples factores, producto de la sobrepoblación, consumo excesivo y el efecto de las transiciones, pueden repercutir en la salud y por tanto en la calidad de vida. Uno de los ejemplos más conocidos, como resultado de la configuración de todos estos factores en un ambiente, que propiamente pueden ser generados por el hombre, es la alta contaminación, especialmente del aire y el suelo.

La contaminación del aire es la presencia de toda materia o energía en cualquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse en la atmósfera terrestre e interactuar con sus componentes altera su condición natural (DOF, 2019). Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) (2016), la contaminación del aire ha representado el mayor riesgo ambiental para la salud, como una de las grandes causantes del desequilibrio ecológico. De todas las sustancias suspendidas en el aire, ya sean sólidas o en gotas de líquido (conocidas como partículas en suspensión) o en otras palabras aerosoles; se clasifican por tamaño, y forman la mayor parte del contenido de contaminación, que define específicamente las partículas finas (2,5 micrómetros), estas pueden notarse visiblemente en el ambiente y pueden ser transportadas por el aire hacia el suelo y el agua.

Para la contaminación del aire y el material suspendido, se debe considerar que el tamaño de las partículas está asociada a la capacidad para generar problemas de salud (Balcarce & Berrios, 2009). Para la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (2025) respecto a las partículas de menor tamaño, como son las de <10 micrómetros de diámetro, existe la probabilidad de ingresar a tejidos más profundos, como los pulmones y, tomando como vía el torrente sanguíneo, llegar al tejido cardíaco y cerebral.

En estudios recientes experimentales y epidemiológicos, se ha demostrado que la exposición a partículas de contaminación en el aire ambiente está asociada con diferentes efectos adversos para la salud, sobre todo si padecen de enfermedades crónicas preexistentes. Entre estas, las afectaciones más comunes han sido: asma, bronquitis, enfermedades pulmonares, cardiovasculares, cerebro-vasculares, trastornos neurológicos, reproductivos, nacimientos prematuros, retraso en el crecimiento intrauterino, bajo peso al

nacer, mortalidad infantil, entre otros (SEMARNAT, 2019).

En la actualidad, las afectaciones siguen teniendo impacto en la calidad de vida en función del desempeño de las personas a largo plazo si no es que, durante el resto de la vida, son las del Sistema Nervioso Central (SNC), específicamente en las áreas motoras, (Cinvestav, 2021). Por ejemplo, se ha demostrado que afecta la recepción y liberación de dopamina, siendo uno de los neurotransmisores más importantes del SNC, e incluso modifica la conducta y hasta el estado de ánimo, llegando a tener como consecuencia enfermedades degenerativas como el Parkinson y la esquizofrenia (Bahena, Flores, & Arias, 2000).

Ante la capacidad de utilizar estos mecanismos para alcanzar los tejidos nerviosos, un fenómeno fisiológico en la exposición continua de las personas en lugares con alto índice de material particulado, uno de los fenómenos fisiológicos de interés es la inflamación sistémica, dejando aún más consecuencias de las esperadas, generando daños a las neuronas, e incidiendo en nuevas neuropatologías que modifican las habilidades, como la memoria y conductas como la auto-regulación (Mora Rodríguez, 2020).

Esta situación supone alteraciones en las funciones ejecutivas del cerebro, conocidas por ser un sistema complejo de habilidades de las personas para lograr resolver tareas de manera eficaz a través de la correcta toma de decisiones, garantizando una mejor la calidad de vida (Bausela, 2014). Si bien algunos estudios que toman relevancia en la exposición al material particulado y las alteraciones cerebrales no son concluyentes, el presente estudio busca proporcionar información sobre la relación entre la contaminación por material particulado y las alteraciones de las funciones ejecutivas en personas que han sido expuestas en sitios del estado de Hidalgo que mantienen niveles altos de contaminación del aire.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante mucho tiempo y hasta la actualidad, las organizaciones de salud y las políticas contra la lucha a los problemas de salud pública se han centrado sobre enfermedades infecciosas emergentes y reemergentes. Sin embargo, se sabe que uno de los principales riesgos para la salud es la contaminación del aire, causando daños que pueden provocar incapacidades, reducción de la calidad y esperanza de vida, así como atribuírsele un número elevado de muertes.

En la mayoría de los países desarrollados entre el 2017 y 2019, se lograron políticas sobre energías sostenibles, no obstante, con el impacto que ha dejado la pandemia por COVID-19, en el informe de Regulatory Indicators for Sustainable Energy (RISE 2020), del

Banco Mundial, mencionan que se han observado más avances que en el pasado en la política energética.

En 2014, México estimó que emitió alrededor de 23.3 millones de toneladas de contaminantes, sin considerar las fuentes móviles, de las cuales Hidalgo representó un poco más de 600 mil toneladas (SEMARNAT, 2017). Datos de la Organización Mundial de la Salud indican que casi 9 de cada 10 personas en el mundo están expuestas a aire que contiene niveles elevados de contaminantes (OMS, 2018).

Entre los principales contribuyentes de estos contaminantes son las emisiones de los vehículos motorizados, la quema de combustibles fósiles, la industria, la incineración continua de residuos, los desechos agrícolas e incluso las actividades cotidianas como son los productos de cocina, el baño, la quema de leña para calentar el hogar en temporada invernal. Estas prácticas o hábitos desarrollan un círculo vicioso que contribuye a la contaminación influida por determinantes sociales como la ocupación, la infraestructura y la clase social, pueden mantener por un largo tiempo la exposición (OMS, 2023).

Los efectos de la contaminación atmosférica y del aire en los hogares ocasionan cada año cerca de siete millones de muertes tempranas por los efectos de esta exposición; cabe destacar que, según características de las defunciones, el 90% de estas se dan en los países de ingresos medios y bajos, según la OMS (2023).

Los residuos de las actividades humanas pueden permanecer suspendidos en la atmósfera durante varios días, tal es el caso del material particulado (PM). Aunque se desintegran con el tiempo, se debe considerar dos aspectos importantes de la contaminación:

1. Durante su emisión, el desplazamiento de la masa por efecto de las corrientes de aire puede depositarlas en superficies como el suelo o el agua
2. En los últimos años las emisiones han sido crecientes, lo que convierte al PM problema ambiental complejo y silencioso

La materia particulada (PM) presente en el aire incrementa los riesgos para la salud de las personas, su potencial de daño depende según las características de su forma y tamaño (las más peligrosas son las de diámetro <10 micras, por su capacidad de penetrar los tejidos al ser tan pequeñas), provocando reacciones fisiopatológicas en el organismo. Cuando se inhala a través del sistema respiratorio, puede desencadenar reacciones superficiales en los tejidos, activar mecanismos de defensa e incluso provocar estrés oxidativo, poniendo en riesgo órganos y sistemas en el cuerpo según el informe de SEMARNAT (2017).

Es decir, las repercusiones a la salud van más allá de las enfermedades asociadas a la contaminación incluyendo las afecciones respiratorias y cardíacas, como indica en su

informe la OMS (2014): 3.7 millones de muertes, de las cuales el 11% son por enfermedad pulmonar obstructiva crónica, el 6% por cáncer de pulmón; 40% por enfermedad isquémica del corazón, 40% por accidente cerebrovascular y alrededor de 3% por infección respiratoria aguda, limitando la probabilidad de que, ante el paso del tiempo y la exposición, se conozcan daños a otros sistemas, como el neurológico, lo que debe generar expectativas sobre alteraciones en el comportamiento de las personas ante la contaminación.

El problema de explicar sobre exposición al PM y los efectos en la salud es complejo, ya que las poblaciones han sido caracterizadas de forma general y sus localizaciones y actividades durante la exposición están escasamente documentadas, además, los procedimientos y metodología para determinar las asociaciones de ciertos padecimientos, específicamente los neurológicos no están claros debido a la influencia de varios otros factores, como enfermedades degenerativas existentes, lesiones o los efectos de múltiples medicamentos tomados durante condiciones de salud particulares, como las asociadas con el uso de benzodiazepinas (EPA, 2024).

De esta forma es que el paradigma de los efectos de la contaminación ambiental se limita a los problemas respiratorios y cardíacos. Sin embargo, las afectaciones van más allá, en el caso de la ambiómica psiquiátrica, que trata del estudio de las condiciones y procesos ambientales que promueven la salud mental y su relación con los trastornos mentales, estableciendo vínculos entre estas exposiciones y diversos trastornos a lo largo de un período prolongado.

Durante la última década, estudios epidemiológicos indicaron relación con la contaminación del aire ambiental y el deterioro cognitivo, así como cambios patológicos en el cerebro (Chen et al., 2017) y un aumento de las hospitalizaciones por causas neurológicas (Kioumourtzoglou et al., 2016). La identificación de lesiones cerebrales en varias regiones debido a la contaminación respalda la investigación sobre cómo estas lesiones afectan las funciones físicas o mentales, en particular las funciones ejecutivas (FE), que presentan cambios notables en individuos con antecedentes de lesiones que afectan la corteza frontal (Stuss y Levine, 2002).

La exposición a la contaminación ha afectado a las habilidades cognitivas como es la memoria de trabajo, autoconciencia, planificación, preparación para actuar y autocontrol emocional, estas habilidades son relevantes para la resolución de problemas (Gilbert y Burgess, 2008). De acuerdo con los datos epidemiológicos mencionados, el mayor porcentaje de la población puede estar sufriendo dificultades para responder de forma efectiva a las actividades y retos de la vida diaria. Esto podría conducir a estados emocionales negativos y obstaculizar su capacidad para alcanzar objetivos importantes, lo que en última instancia disminuiría su calidad de vida.

Lamentablemente, sigue habiendo falta de interés y un bajo número de estudios que den seguimiento a la correlación de estos fenómenos, entre la afectación de las FE y la exposición a la contaminación del aire por material particulado. De esta forma, en el presente estudio se pretende contribuir con el estudio de los efectos que se generan en las FE de las personas que habitan en lugares del estado de Hidalgo con índice alto de material particulado a través del uso de la Batería Neuropsicológica Evaluación de las Funciones Ejecutivas y Lóbulos Frontales BANFE-2, respondiendo a la siguiente pregunta:

Pregunta de investigación

¿Existen diferencias entre las funciones ejecutivas de los individuos expuestos y los no expuestos al material particulado en el estado de Hidalgo?

MARCO TEÓRICO

Capítulo 1. Contaminación ambiental

En los últimos años, la contaminación ambiental, junto con el cambio climático, ha sido considerada como uno de los principales factores de riesgo para la salud humana, su tendencia en aumento ha condicionado alteraciones en los ecosistemas. La contaminación puede influir en la frecuencia y ocurrencia de múltiples enfermedades mortales, así como colaborar en muertes prematuras de las personas.

Además de estos datos, la contaminación ambiental, como se ha comentado anteriormente, es responsable de la pérdida de años de vida derivada de sus efectos tanto a corto como a largo plazo. La contaminación se define como la presencia de sustancias o elementos tóxicos en el ambiente en niveles superiores a los tolerados por los seres humanos y que, al combinarse, provocan un desequilibrio en la ecología, según la Dra. Guadalupe Teresa Araujo Pulido (2010) del Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) en el Documento sobre Contaminación Ambiental y sus efectos sobre la Salud.

Con base en lo anterior, un ambiente sano puede definirse de manera general como aquel que favorece la salud y el desarrollo de las actividades humanas (Araujo, 2010). La mayoría de las actividades que realiza el humano, conocidas como actividades antropogénicas, así como actividades o fenómenos de orden natural generan emisiones como gases, vapores, polvos y partículas.

La contaminación se puede presentar de diferentes tipos, en los cuales depende de la zona o elemento que se afecta, puede ser el agua, aire o suelo, así como del tipo de contaminante (Gobierno del Estado de México, 2024). De acuerdo con Respira México, como se señala en una *tabla 1* del Instituto de Estudios Legislativos del Estado de México, los principales contaminantes ambientales, sin incluir los residuos, son los siguientes:

Tabla 1. Tipos de contaminantes para el medio

Contaminantes primarios	Contaminantes secundarios
Dióxido de azufre (SO ₂)	Ozono (O ₃)
Monóxido de carbono (CO)	Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)
Vapores de combustibles y solventes	Algunos tipos de partículas

Contaminantes primarios	Contaminantes secundarios
Plomo (Pb)	
Partículas suspendidas (PM)	

Fuente: Elaboración propia con datos de Respira México, citado por Huizar, et al., 2016.

Contaminación del aire

La contaminación del aire también es conocida como contaminación atmosférica, similar al concepto de la contaminación ambiental, se puede definir como cualquier sustancia que se encuentra en el aire, que produzca efectos negativos a la salud de las personas y a los componentes del medio ambiente.

A pesar de que el aire tiene como principales compuestos al nitrógeno, oxígeno e hidrógeno, puede contener cerca de mil compuestos. La calidad que posea el aire estará determinada por la presencia o ausencia de sustancias y sus concentraciones, sin omitir sus características como la apariencia física (Bouza, et al., 2022).

De las causas de contaminación del aire se pueden resaltar:

- **Combustibles fósiles:** con emisiones de la combustión de vehículos, aviones y otros medios de transporte común en el mundo, que de manera exagerada circulan. Es de considerarse que este tipo de transporte colabora con entre el 15 y 70% de la contaminación del aire en dependencia del tipo de lugar, pues se ve impulsado por el crecimiento urbano (OPS, 2018).
- **Industria:** emisiones provenientes de las chimeneas industriales, donde a pesar de transitar en gran parte de las empresas o fábricas, de uso de petróleo o carbón a la electricidad, siguen emanando cantidades descontroladas.
- **Prácticas agrícolas:** por la producción gigante de heces y el uso de pesticidas que liberan cantidades inimaginables de gases contaminantes y agentes tóxicos.
- **Quema de basura:** con la sobrepoblación, el sobreconsumo tiene como efecto la producción de cantidades abismales de residuos o de basura, y es importante tomar en cuenta que existen países en los cuales la forma en que se intenta reducir su tamaño es con la quema, sin embargo, los principales resultados son la liberación de humo, gases e incremento del efecto invernadero (Gobierno del Estado de México, 2024).

- Consumo de gas o quema de materiales sólidos (madera, carbón, desechos orgánicos o estiércol): aunque sus emisiones son menos densas, se realizan de forma diaria para cubrir las necesidades en los hogares para calentar el hogar o para cocinar (National Geographic, 2022).

Un aspecto importante para considerar sobre la contaminación del aire es la contaminación del aire ambiental exterior y describe la afectación de los ambientes al aire libre. A pesar de que las políticas públicas de mejora en países de altos ingresos han avanzado en las últimas décadas, los efectos negativos en el ambiente exterior principalmente por el desplazamiento de material particulado (PM) se han convertido en un problema mundial (OPS, 2018).

La contaminación del aire en el interior de las viviendas no es menos significativa, y existe la necesidad de que las personas se ocupen de los desechos que se producen en el hogar, en su mayoría en entornos rurales y periurbanos, en viviendas con servicios deficientes. Tales prácticas, caracterizadas por el uso de recipientes mal ventilados, exacerbaban los residuos tóxicos en el aire provenientes de una combustión incompleta; dependiendo del tipo de material, la humedad y la práctica, ponen en riesgo la salud de las personas tanto dentro como fuera de sus hogares (OPS, 2018).

Desafortunadamente, como lo menciona el Observatorio Global de Salud de la Organización Mundial de la Salud, con base en todas las prácticas y tipos de contaminantes, la contaminación del aire se ha convertido en un fenómeno global imparable donde está expuesta prácticamente toda la población (99%). Es de ahí la importancia específica de adentrarse en aquellos que provocan efectos ambientales y de salud altamente adversos para intentar ofrecer algunas bases para combatirlos y avanzar hacia investigaciones, políticas y estrategias coherentes, que puedan lograrse como es el caso del PM considerado más nocivo para la salud, donde se requieren medidas urgentes de educación y transición hacia fuentes de energía limpias y ambientalmente sanas (COFEPRIS, 2017).

Material particulado

Entre el grupo de los contaminantes llamados “objetivos normativos críticos de la OMS” se encuentra el material particulado (Bouza, et al., 2022). Según la Organización Panamericana de la Salud (OPS) (2018), se considera como material particulado (PM por sus siglas en inglés: particulate matter), a las partículas que se encuentran en el aire, en una mezcla de estructuras sólidas y líquidas, entre los ejemplos están: el polvo, hollín, humo y el aerosol (OPS, 2018).

El PM, además del daño al medio ambiente, se conoce entre las principales precursoras de problemas para la salud por ser inhalables debido a su capacidad aerodinámica en razón a su tamaño, con un diámetro igual o inferior a 10 micrómetros. Estas partículas se clasifican en PM_{10} y en $PM_{2.5}$; las últimas también llamadas “partículas finas”, pues en una comparación donde, generalmente el diámetro de un cabello humano es de 70 micrómetros, respecto a las partículas finas, éstas pueden ser hasta 30 veces más pequeñas (Liu, et al.,2019).

De acuerdo a sus orígenes, el PM_{10} puede también componerse de $PM_{2.5}$, entendiéndose como $PM_{10-2.5}$, derivando esencialmente del material de corteza terrestre, sales marinas y del material biológico, por otra parte, exclusivamente el $PM_{2.5}$ es el resultado de la combustión; por consiguiente, la cantidad o densidad de los dos tamaños de partículas tiene como variable principal el lugar, donde se define la fuente, por ejemplo, lugares con obras de construcción, carreteras de terracería o zonas desérticas, dando lugar a la emisión y distribución de partículas gruesas; o de lugares con alta circulación de los diferentes transportes de combustión (autos, autobuses, camiones, aviones, entre otros), generando partículas más finas (Chen & Hoek, 2020).

Las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ para el 2024 suman más de 37 mil toneladas de PM_{10} y más de 15 mil toneladas de partículas 2.5 provenientes de fuentes móviles en servicio sobre la megalópolis Valle de México, en los municipios del estado de Hidalgo (INEGI, 2014), exponiendo a los vehículos de carga pesada y automóviles como los que mayormente contribuyeron (32% de las emisiones) (SEDEMA, 2023).

La contaminación por material particulado es un tema relevante que genera preocupación a los expertos en el campo de la salud pública, debido al riesgo que ofrece la exposición ante sus componentes, su alta toxicidad, la capacidad de suspensión (duración), desplazamiento y adherencia, permitiendo una exposición continua y extendida para las poblaciones (Liu, et al., 2019).

Estadísticas del monitoreo y concentraciones de PM

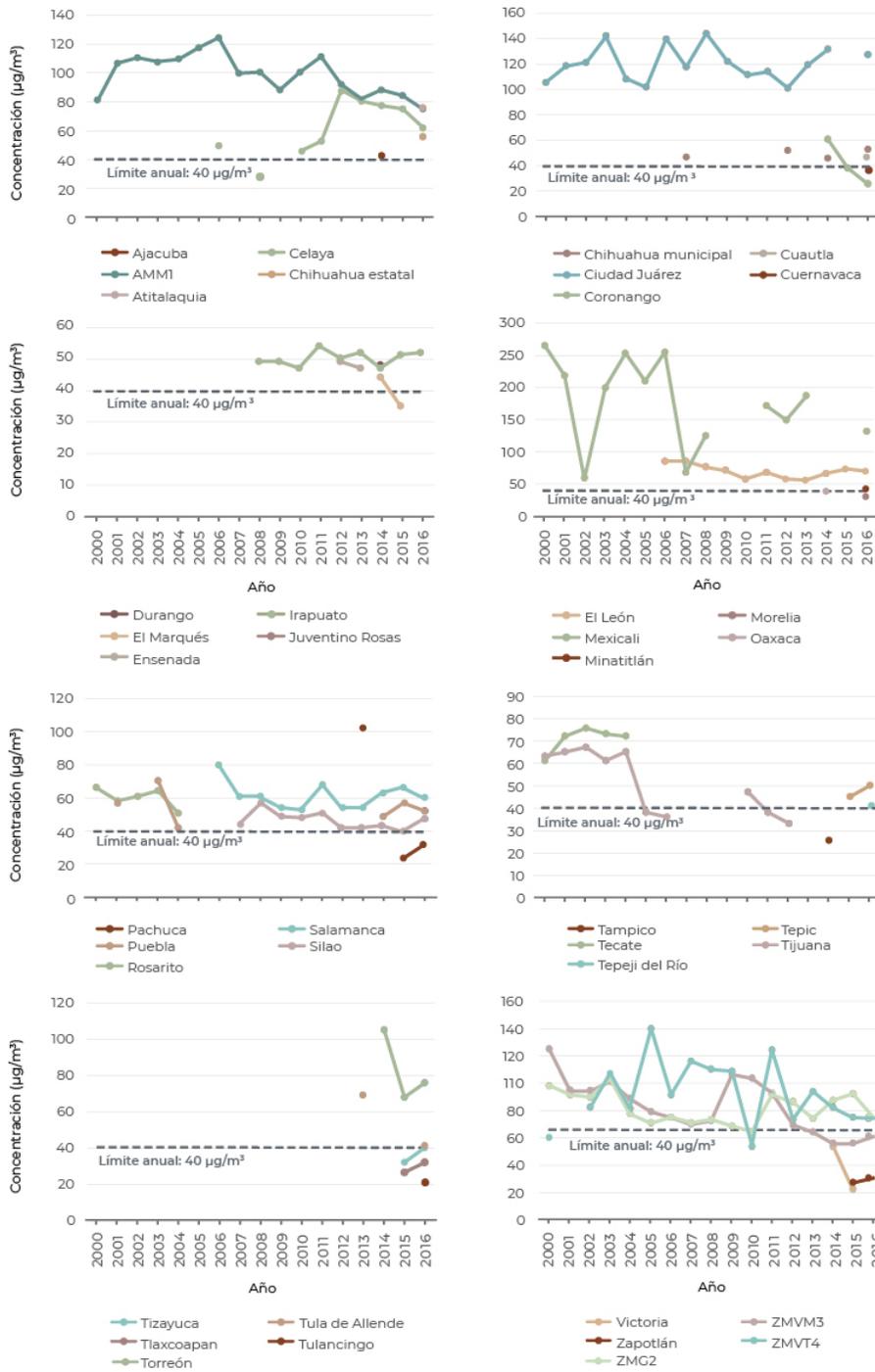
El aumento en el deterioro del ambiente radica en la población, englobando una serie de fenómenos a partir de la urbanización, en el que las actividades económicas y productivas son un círculo vicioso donde se agrega la deforestación, la quema de combustibles y materia, recayendo en lugares con mala calidad del aire, y por consiguiente la exposición continua al material suspendido.

Para ello, la generación de información suele ser un proceso funcional para contribuir a conocer las principales fuentes de contaminación, los contaminantes y las cantidades liberadas a las que se exponen, siendo el monitoreo de la calidad del aire de donde se obtienen los datos, partiendo hacia la acción, y la elaboraciones de las políticas, estrategias y líneas de acción para reducir el impacto en la salud pública y con el tiempo corregir este problema ambiental (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2019).

Desde principios de los años 1980 y principios de los años 1990 se reforzaron los esfuerzos para reducir las emisiones mediante el seguimiento de los reportes de la calidad del aire y los estudios de efectos en el ambiente la salud. Sin embargo, los avances no son los esperados de forma uniforme, pues cada territorio tiene un desarrollo a un ritmo distinto, por ello es por lo que la OMS, desde 1987 ha generado directrices como base de referencia para los gobiernos y la población, en la búsqueda de hacer consciencia sobre la regulación de la exposición y reducción de los riesgos para la salud.

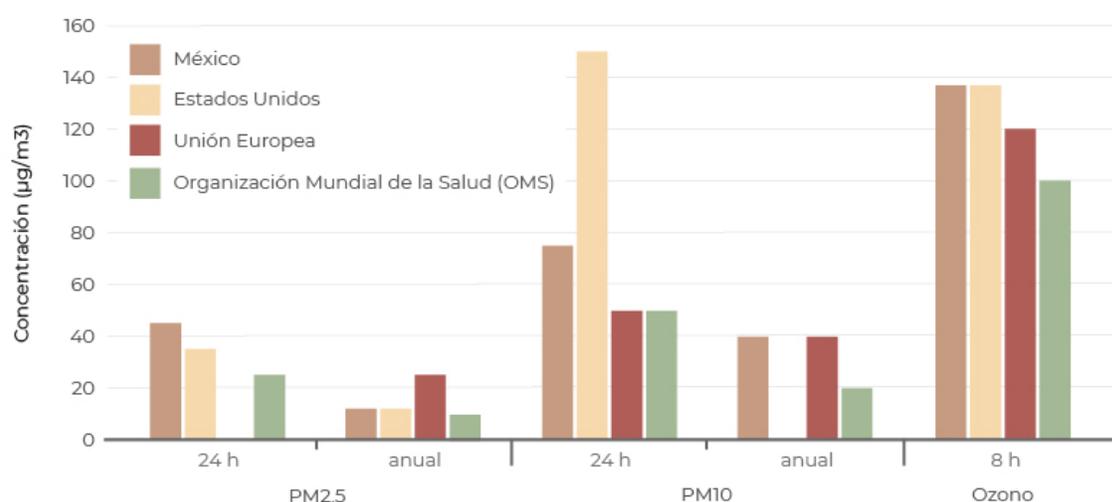
Estas directrices tuvieron una pausa en su producción en el año 2006, manteniendo incertidumbre en el seguimiento de acuerdos y evaluaciones en cuanto a niveles recomendados de contaminantes, y fue hasta el 2015 que, durante la 68 Asamblea Mundial de la Salud se generaron acuerdos entre 194 estados miembros, para redoblar esfuerzos en el control de las emisiones y la exposición. Para 2016, la OMS solicitó a los países miembros que trabajaran para reducir los niveles de contaminación del aire, con el objetivo de mantener los promedios anuales en $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 y $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2,5, junto con límites de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2,5. Esta solicitud se basó en avances como el crecimiento de las unidades de monitoreo y las tecnologías mejoradas para medir las emisiones con precisión, entre otros desarrollos (OMS,2018).

Figura 1. Límite de partículas PM10. Concentración anual PM10 (promedio anual de los promedios de 24 horas), 2000-2016.



Desde 1994, México ha modificado su regulación en materia de niveles de emisión, enfocándose inicialmente en las partículas en suspensión. Si bien estos niveles se consideran mejorados, aún se encuentran por debajo de los estándares establecidos por la OMS. Las concentraciones atmosféricas de material particulado fino, específicamente PM10 y PM2.5, con el promedio anual basado en promedios de 24 horas. De acuerdo con la norma establecida, el límite para partículas PM10 se establece en 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que para partículas PM2.5, el límite es de 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Ver figura 1).

Figura 2. Concentración ($\mu\text{g}-\text{m}^3$)



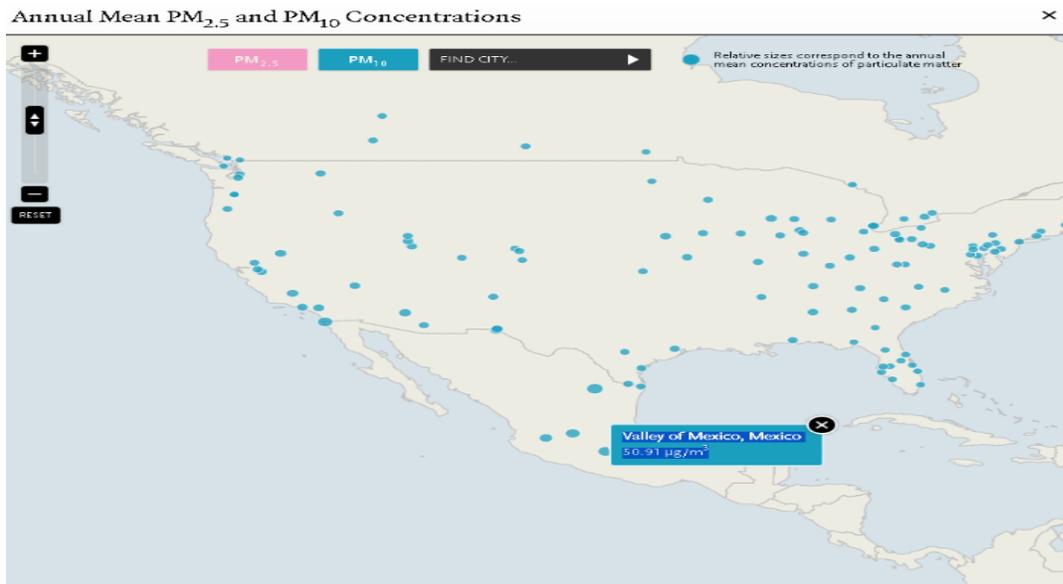
Fuente: (INECC, 2018).

Material particulado y daños a la salud

Además, no existe suficiente conciencia sobre el impacto de la contaminación del aire en la salud. Esto podría deberse a una falta de conocimiento de la evidencia que vincula la exposición a la contaminación del aire con problemas de salud, una deficiencia en los datos de monitoreo de la calidad del aire o incluso un reconocimiento limitado de las posibles soluciones y acciones que se pueden implementar para mejorar la calidad del aire (OPS, 2018).

Existe una relación cuantitativa entre los altos niveles de partículas pequeñas (PM10 y PM2.5) y el aumento de la mortalidad o morbilidad diaria y a largo plazo. Por otra parte, la reducción de los niveles de estas partículas pequeñas y finas conduce a una disminución de la mortalidad asociada, siempre que los demás factores se mantengan constantes (COFEPRIS, 2017).

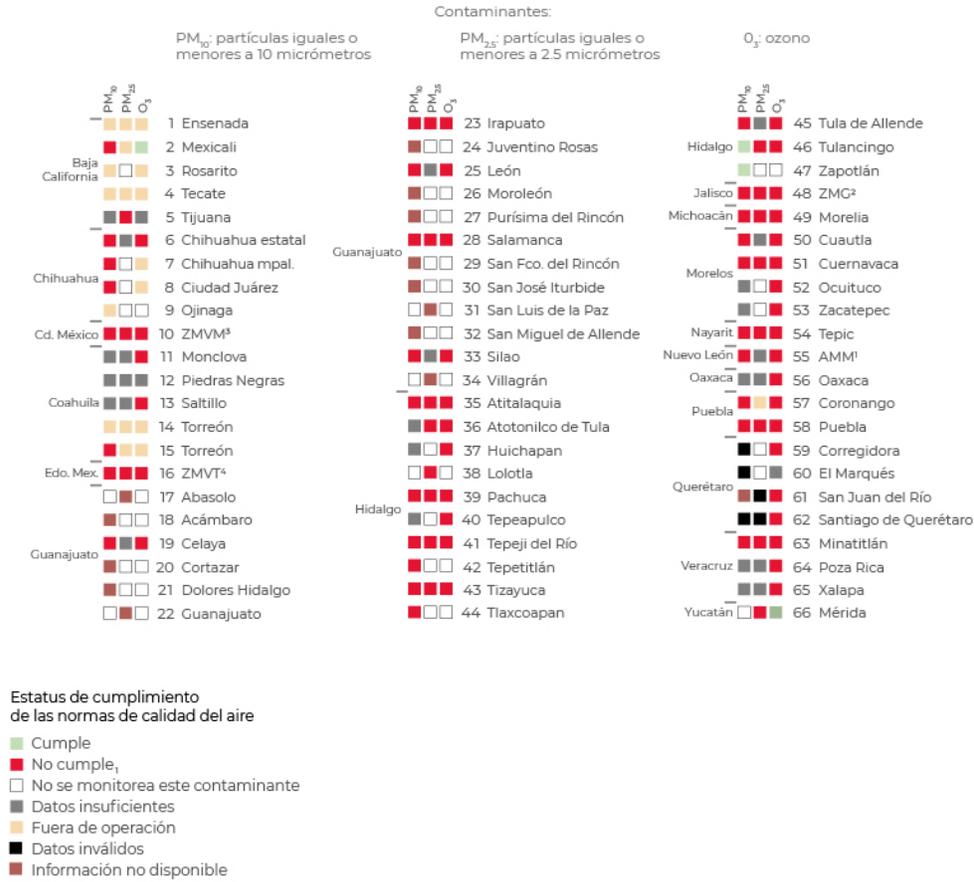
Figura 3. Concentración Pm2 anual



Fuente: (COFEPRIS, 2017)

De acuerdo con la OMS, la contaminación del aire ocupa el segundo lugar como causa principal de enfermedades no transmisibles a nivel mundial, que están incrementando su incidencia, como enfermedades cardio y neuro vasculares, así como cáncer. La implementación de políticas para reducir la contaminación del aire tiene beneficios a la salud de las personas y del ambiente, así como económicos y sociales (World Health Organization, 2018).

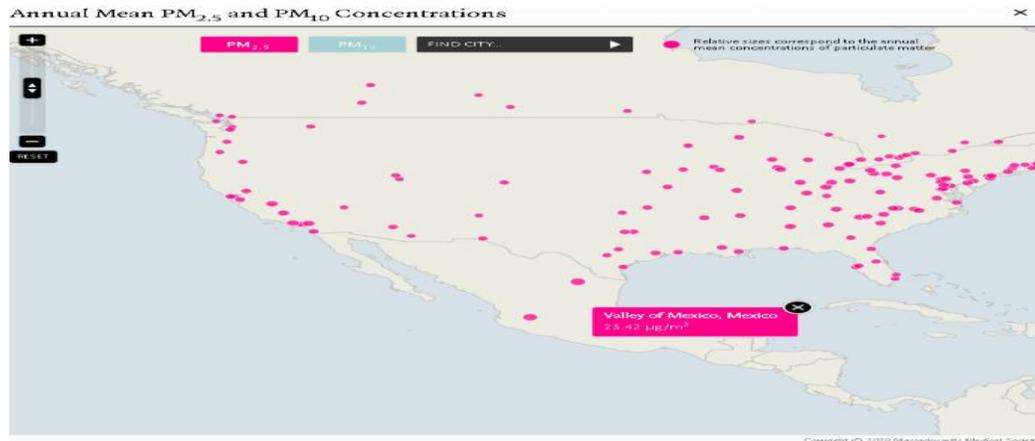
Figura 4. Concentración Anual PM



Fuente: (INECC, 2017)

La contaminación del aire está relacionada con diversos problemas de salud en los niños, como asma, cánceres infantiles y trastornos del desarrollo neurológico, así como con mayores tasas de mortalidad infantil.

Figura 5. Concentraciones promedio anuales de PM en norte américa



Fuente: (Bechara, 2010)

Epidemiología de las afectaciones por mala calidad del aire

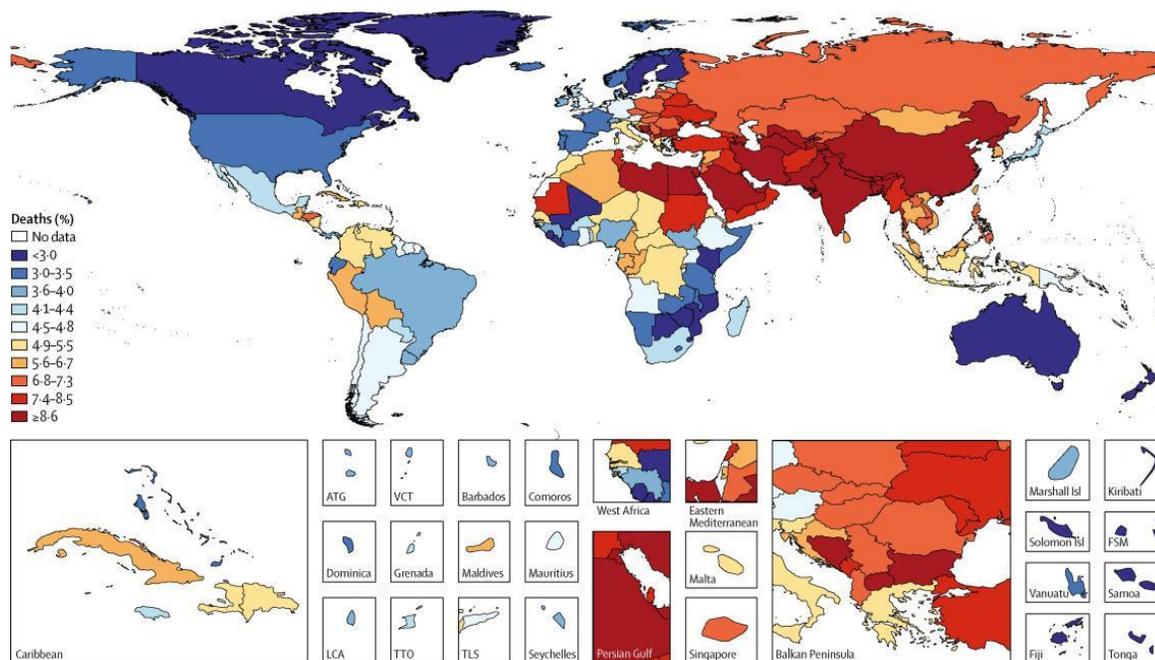
Según el Informe de Calidad del Aire de la Ciudad de México de 2014, las concentraciones de PM10 y PM2.5 en América Latina en México, superan los límites establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas. Esto es evidente durante las temporadas de verano y sequía, lo que se correlaciona con un aumento en la morbilidad por enfermedades respiratorias en la población infantil (Baron, Castaño y Osorio, 2017)

En 2015, el número de muertes relacionadas con la exposición prolongada a PM 2,5 mostró una variación entre los distintos países (ver ilustración 6). El sur y el este de Asia representaron el 59% de los 4,2 millones de muertes mundiales asociadas con PM 2,5 ambiental. En los países de altos ingresos, la contribución de la exposición a PM 2,5 ambiental a las muertes totales fue del 4,3%, mientras que fue del 9,0% en los países de ingresos medianos altos, del 8,7% en los países de ingresos medianos bajos y del 4,9% en los países de ingresos bajos.

Estas variaciones en las tasas de mortalidad se deben principalmente a la proporción de muertes totales resultantes de enfermedades cardiovasculares en cada país. Las tasas de mortalidad estandarizadas por edad más altas por exposición a PM 2,5 se observaron en el sur de Asia (133,4 por 100.000 habitantes), seguida de Asia central (85,2 por 100.000 habitantes) y Asia oriental (83,2 por 100.000 habitantes). Las tasas en países de América del Norte (E.U., Canadá y Groenlandia) fueron de 17.8 por 100,000 personas); Asia con 18.7 por 100,000 persona) y los países de Europa occidental con 19.9 por 100,000, fueron de cuatro a ocho veces más bajas.

Las muertes atribuibles a la exposición prolongada a PM 2.5 en 2015 variaron sustancialmente entre países (figura). El sur y el este de Asia contribuyeron con el 59% de los 4.2 millones de muertes mundiales atribuibles a las partículas ambientales PM 2.5. En los países de ingresos altos, la exposición a PM 2.5 ambiental contribuyó al 4.3% del total de muertes en 2015 frente al 9.0% en los de ingresos medianos altos, el 8.7% en los de ingresos medianos bajos y 4.9% en países de bajos ingresos. Estas diferencias en la mortalidad atribuible reflejan principalmente la fracción del total de muertes por enfermedad cardiovascular entre países. Las tasas más altas estandarizadas por edad de muerte debido a la exposición a PM 2.5 se registraron en el sur de Asia (133.4 por 100 000 habitantes), Asia central (85.2 por 100,000 habitantes) y Asia oriental (83.2 por 100,000 habitantes). Las tasas en países de América del Norte (E.U., Canadá y Groenlandia) fueron de 17.8 por 100,000 personas); Asia con 18.7 por 100,000 persona) y los países de Europa occidental con 19.9 por 100,000, fueron de cuatro a ocho veces más bajos.

Figura 6. Muertes atribuibles a la contaminación ambiental



Fuente: Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., & Forouzanfar, 2017.

Exposiciones prolongadas

Como valor guía para el PM 2.5 en exposiciones prolongadas se eligió una concentración anual media de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En el estudio de la Sociedad Americana del Cáncer (ACS) (Pope et al., 2002), este valor representa el extremo inferior de la gama en la que se observaron efectos significativos en la supervivencia. La adopción de una guía en este nivel concede un valor importante a los estudios de exposición prolongada que utilizan los datos de la ACS y los de Harvard de seis ciudades (Kioumourtzoglou et al., 2016; Araujo-Pulido 2010; Baron et al., 2017; Calderón Garcidueñas et al., 2004). En todos estos estudios se notificaron asociaciones estrechas entre la exposición prolongada al PM 2.5 y la mortalidad.

La concentración media de PM 2,5 encontrada en el estudio de seis ciudades fue de 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con un rango de 11,0 a 29,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el estudio de la ACS informó un promedio de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con un rango de 9,0 a 33,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ninguno de los estudios identificó umbrales, aunque los períodos y patrones de exposición específicos permanecieron indeterminados.

En el estudio de la ACS se pone de manifiesto una incertidumbre estadística de las estimaciones del riesgo con concentraciones de unos 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valor por debajo del cual aumentan de manera significativa los intervalos de confianza, puesto que las concentraciones están relativamente alejadas de la media, lo que indica que cabe esperar efectos en la salud cuando las concentraciones medias anuales son del orden de 11 a 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Por consiguiente, se puede considerar que, según la bibliografía científica disponible, una concentración media anual de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ estaría por debajo de la media para los efectos más probables. La elección de una concentración media prolongada de PM 2.5 de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ también confiere cierto valor a los resultados de los estudios de series cronológicas de exposición diaria en los que se examina la relación entre la exposición al PM 2.5 y los efectos adversos agudos en la salud. En estos estudios se señala que las medias de las exposiciones prolongadas (es decir, de tres a cuatro años) son del orden de 13 a 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Aunque no se pueden descartar del todo los efectos adversos en la salud por debajo de dichos niveles, el promedio anual del valor de las Guías de Calidad del Aire (GCA) de la OMS (2021) representa la concentración de PM 2,5 que no sólo se ha demostrado que se puede alcanzar en zonas urbanas extensas de los países muy desarrollados, sino también cuyo logro cabe suponer que reducirá de manera significativa los riesgos para la salud.

Además del valor guía, se definen tres objetivos intermedios (OI) para el PM 2.5. Se

ha demostrado que éstos se pueden alcanzar con medidas sucesivas y sostenidas de reducción. Los países pueden encontrar estos valores intermedios particularmente útiles para calcular los progresos con el paso del tiempo en el difícil proceso de reducir constantemente la exposición de la población al PM. Como nivel del OI-1 se eligió una concentración media anual de PM 2,5 de 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Este nivel corresponde a las concentraciones medias más elevadas notificadas en estudios sobre los efectos prolongados en la salud y puede reflejar también concentraciones históricas más altas, pero desconocidas, que pueden haber contribuido a los efectos observados en la salud. Se ha demostrado que en el mundo desarrollado este nivel está asociado con una mortalidad elevada (OMS, 2021).

El nivel de protección del OI-2 se establece en 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y se basa en los estudios de exposición prolongada y mortalidad. Este valor es superior a la concentración media con la cual se han observado efectos en tales estudios, y probablemente esté asociado con efectos significativos en la salud derivados de exposiciones tanto prolongadas como diarias a PM 2.5. El logro de este valor del OI-2 reduciría los riesgos de la exposición prolongada para la salud en alrededor de un 6% (IC del 95%, 2–11%) en relación con el valor del OI-1. El nivel recomendado del OI-3 es de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, concediendo un valor aún mayor a la probabilidad de efectos significativos asociados con la exposición prolongada. Este valor está próximo a las concentraciones medias que se notifican en los estudios de exposición prolongada y determina una reducción adicional en el riesgo de mortalidad del 6% con respecto al valor del OI-2. Estos son los niveles más bajos con los cuales se ha demostrado, con más del 95% de confianza, que la mortalidad total, cardiopulmonar y por cáncer de pulmón, aumenta en respuesta a la exposición prolongada al MP 2.5. Se prefiere el uso del valor guía del MP 2.5 (OMS, 2021).

También se recomiendan en las Guías de Calidad del Aire (OMS, 2021) los objetivos intermedios correspondientes para el PM 10. Esto se debe a que un valor guía para el PM 2.5 por sí solo no ofrecería protección frente a los efectos perjudiciales del PM grueso (la fracción entre 10 y 2,5 μ). Sin embargo, se estima que las pruebas cuantitativas sobre el PM grueso son insuficientes para preparar guías separadas. En cambio, hay abundante bibliografía sobre los efectos de la exposición breve al PM 10, que se ha utilizado como base para la formulación de las GCA de la OMS y los objetivos intermedios para las concentraciones de 24 horas de PM.

Exposiciones de corta duración

Suele haber diferencias de opinión entre los países sobre si el promedio más restrictivo de las GCA es el de 24 horas o el anual, dependiendo fundamentalmente de las características específicas de las fuentes de contaminación y de su localización. Al evaluar las GCA de la OMS y los objetivos intermedios, se suele recomendar que se de preferencia al promedio anual sobre el de 24 horas, ya que con niveles bajos despiertan menos preocupación las desviaciones episódicas. Sin embargo, el logro de los valores guía para la media de 24 horas protegerá frente a niveles máximos de contaminación que de otra manera determinarían un exceso sustancial de morbilidad o mortalidad.

Se recomienda que los países con lugares que no cumplen con los valores de referencia de 24 horas adopten medidas inmediatas para alcanzar este nivel lo antes posible. Los únicos valores que se pueden estimar de manera suficientemente fiable provienen de dos series: la serie de 2 Estados Unidos (20 ciudades, modelo de efectos aleatorios) y una estimación meta analítica de 29 ciudades europeas: ambas sugieren una asociación a corto plazo de alrededor del 0,6 % por $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, todos estos casos basados en la media de 24 horas para PM10 (Samet et al. 2000; Katsouyanni et al. 2001). Un metaanálisis de los datos que abarcan 29 ciudades del mundo distintas de Europa Occidental y América del Norte demuestra incluso más similitud con los hallazgos asiáticos en cuanto a la fuerza de la asociación: el efecto estimado es de 0,5 % por $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, prácticamente cerca de la cifra encontrada para las ciudades asiáticas (0,49 %) (Cohen et al., 2004). Los resultados indican que los riesgos para la salud asociados con PM10 probablemente sean más o menos iguales en las ciudades desarrolladas y en las ciudades en desarrollo. La concentración diaria estimada de PM10 de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aumentará la mortalidad en alrededor de un 0,5%. Por lo tanto, se puede suponer que una concentración de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ resultará en un aumento aproximado del 5% en la mortalidad diaria, un efecto que sería muy preocupante y para el cual se recomendarían medidas correctivas inmediatas.

El nivel de OI-2 de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ estaría asociado con un aumento aproximado del 2,5% en la mortalidad diaria y el nivel de OI-3 con un aumento del 1,2% (**Tabla 2**). El nivel en las Guías de Calidad del Aire para PM10 es de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y se basa en la relación entre las distribuciones del promedio de 24 horas (y su percentil 99) y las concentraciones promedio anuales.

Fundamento del nivel elegido Objetivo intermedio-1 (OI-1) $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Basado en coeficientes de riesgo publicados en estudios multicéntricos y metaanálisis (incremento de

alrededor del 5% de la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA). Objetivo intermedio-2 (OI-2) 100 50 Basado en coeficientes de riesgo publicados en estudios multicéntricos y metaanálisis (incremento de alrededor del 2,5% de la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA) (Hernán, 2015).

Las partículas ultrafinas (UF), definidas como partículas con un diámetro inferior a 0,1 μ , han atraído atención en los campos científicos y médicos. Normalmente, estas partículas se cuantifican por su número, aunque existe una gran cantidad de datos toxicológicos que sugieren posibles efectos adversos de las partículas UF en la salud humana, la evidencia epidemiológica actual no proporciona suficiente información para establecer una relación clara entre exposición y respuesta. Como resultado, no es posible hacer recomendaciones sobre las concentraciones de referencia de partículas de UF en este momento.

Tabla 2. Obtención del Índice AIRE Y SALUD para PM10

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de PM10 promedio móvil ponderado de 12 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Buena	Bajo	50
Aceptable	Moderado	>50 y 75
Mala	Alto	>75 y 155
Muy Mala	Muy Alto	>155 y 235
Extremadamente Mala	Extremadamente Alto	>235

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Obtención del Índice AIRE Y SALUD para PM2.5

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de PM2.5 promedio móvil ponderado de 12 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Buena	Bajo	25
Aceptable	Moderado	>25 y 45
Mala	Alto	>45 y 79
Muy Mala	Muy Alto	>79 y 147
Extremadamente Mala	Extremadamente Alto	>147

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2019.

Capítulo 2. Funciones ejecutivas

De acuerdo con la definición que se atribuye a Muriel Lezak (1982), conforme a lo descrito en su artículo llamado *“The Problem of Assessing Executive Functions”*, lo que se conoce como Funciones Ejecutivas (FE) comprende a “las capacidades mentales necesarias para formular metas, planificar la manera de lograrlas y llevar adelante ese plan de manera eficaz” (citado por Aponte, 2008). Para Tirapu y Muñoz (2005), las FE, al igual que diversos conceptos de salud, han recibido nuevos aportes a lo largo del tiempo, no todas las contribuciones brindan una comprensión clara de las funciones involucradas. Por lo general, estas funciones se reconocen como habilidades, pero también se las considera como procesos que vinculan ideas simples y las integran para abordar problemas complejos.

Para Duncan (1995) y Funahashi (2001), describen el concepto como las estrategias necesarias para afrontar los retos de la vida, que se ejecutan de forma sistemática para superar las barreras que impiden alcanzar una meta. De esta forma, el funcionamiento o control ejecutivo considera los mecanismos utilizados para la optimización de los procesos cognitivos y así resolver problemas de forma eficaz para alcanzar los objetivos propuestos. El autor Joaquín Fuster fundamenta que el desempeño de las FE es la secuencia y organización del lenguaje para llegar al objetivo (2008).

Comprender el concepto de FE, es complejo debido a sus diferentes componentes, debido a que se presenta diversas situaciones en las actividades de la vida diaria, es decir, los desafíos que enfrentamos en el día a día pueden diferir significativamente entre sí y, dependiendo del contexto en el que surjan, estos desafíos pueden volverse intrincados (Verdejo & Bechara, 2010). Entre los componentes básicos que conforman estos procesos de las FE se consideran la memoria de trabajo, la orientación, atención y la forma en cómo se conserva la respuesta ante lo inapropiado en ciertos momentos y la reflexión de la conducta, lo que se refiere en cuanto a lo socioemocional, a estados motivacionales y emocionales de las personas (Tirapu & Muñoz, 2005).

Desde los inicios de la humanidad las funciones ejecutivas que tienen el componente emocional han sido fundamentales para la supervivencia y preservación de nuestra especie ya que están involucradas en sucesos como encontrar refugio, víveres, elegir pareja sexual, ocupar el rol en la sociedad, etc. (Ardila, 2008). Con base en lo anterior, entre los ejemplos de las FE radican en la actualidad, entre las de la propia naturaleza cognitiva. Por ejemplo, cuando un Arquitecto afronta un reto para la elaboración de un plano de obra, y con el tiempo se va ajustando a las demandas del cliente, de la misma manera en cuestión socioemocional, la adaptación del mismo Arquitecto en el uso de la voz y la búsqueda del momento para convencer al cliente sobre ciertas sugerencias, involucrando el razonamiento previo y ágil sobre las consecuencias que estos actos pueden producir programación y control, tal como lo explicaba Luria en 1974 (Barkley, 2011, Verdejo & Bechara, 2010).

Componentes de las Funciones Ejecutivas

Como se mencionó anteriormente, existen distintos planteamientos e interpretaciones sobre el conjunto de habilidades de las FE en las que se puede centrar de manera general (Restrepo, 2008):

1. Iniciativa, creatividad y reacción adaptativa.
2. Capacidad de cálculo, planificación y organización.
3. Fluidez, flexibilidad, ejecución y corrección de un plan de acción.
4. Atención selectiva, concentración y memoria de trabajo.
5. Monitoreo y control inhibitorio.

De esta manera, se entiende que las funciones ejecutivas (FE) se relacionan con el

control de los pensamientos, junto con la reacción ágil y la regulación de los actos y la conducta, donde se involucran las emociones para la adaptación en la vida diaria. Se ha observado que las funciones ejecutivas y su expresión puede conducir a mejoras a través de la autogestión, especialmente en etapas tempranas de la vida de maduración de las funciones ejecutivas, destacando el papel importante del ambiente en el que se desarrolle el individuo.

Anatomía de las Funciones Ejecutivas

Con una comprensión más clara de lo que implica la función ejecutiva, es esencial discutir la región anatómica específica donde ocurren estos procesos. La corteza prefrontal en el cerebro juega un papel crucial en la planificación para lograr objetivos complejos.

Para una mayor claridad con respecto al área del cerebro donde se encuentra la corteza, es necesario desglosar anatómicamente las regiones del cerebro. El lóbulo frontal, se considera como aquella estructura anterior de la masa encefálica, ubicada en la parte más frontal del cerebro que se encuentra solo por delante de la cisura central y por arriba de la cisura lateral (Lázaro & Solís, 2008).

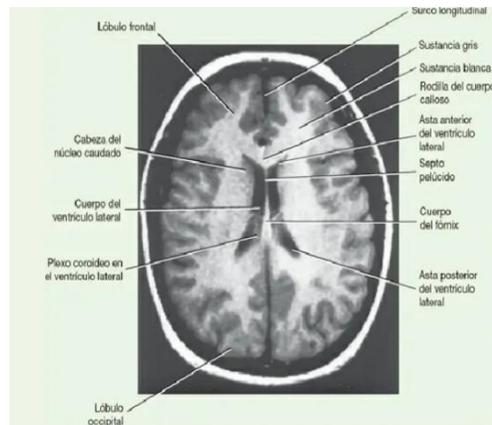
Tal como sucede con todos los lóbulos en el cerebro, se encuentra cubierto por la corteza cerebral, siendo este el nivel más superior del SNC, constituyéndose de materia gris, funcionando con relación a los centros inferiores de la masa. Se caracteriza por su capacidad de recibir grandes cantidades de información, responder con precisión y adaptarse en caso de lesión.

Los componentes celulares se nutren a través de vasos sanguíneos, ya que la gran mayoría de tipos de neuronas (piramidales, estrelladas, fusiformes, horizontales de Cajal, y de Martinotti que realiza funciones específicas centradas en la sinapsis neuronal y participando así en circuitos inhibitorios esenciales para el procesamiento de información cerebral), requieren gran aporte de oxígeno para realizar sus funciones.

En la extensión de la corteza cerebral, en el recubrimiento del lóbulo frontal tiene áreas o secciones, entre las que se encuentra el área precentral, motora suplementaria, campo ocular central, área motora del lenguaje de Broca y el área prefrontal. En la corteza prefrontal ocupa el área extensa en el lóbulo con aproximadamente 30% del total de la corteza en humanos, el tamaño es mayor en los primates que en otros animales (Gutiérrez & Ostrosky, 2011). Esta área se encuentra en la parte más anterior del lóbulo frontal, entre sus fibras y vías aferentes y eferentes, conectan con otras áreas de la corteza, el tálamo,

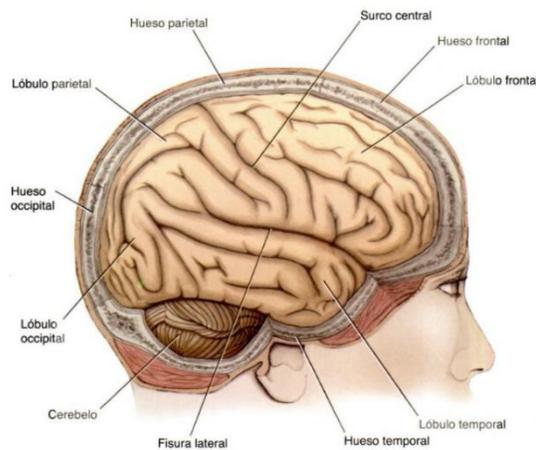
hipotálamo, cuerpo estriado, además del cerebelo; ante esta complejidad nerviosa de conexión con fuentes corticales y subcorticales, se cree que se relaciona con la regulación de sentimientos y emociones, y es donde se llevan a cabo los procesos mentales que pueden regir el juicio, la conducta y la iniciativa (Miller, 1999).

Figura 7. Corte transversal del encéfalo



Fuente: Snell, 2014.

Figura 8. Vista lateral del encéfalo dentro de la cavidad craneal



Fuente: Snell, 2014.

Es importante mencionar que la región cerebral asociada a estas funciones no es la única área implicada, ya que estudios neuropsicológicos en la actualidad, e investigaciones de imágenes funcionales, han demostrado que varias regiones cerebrales contribuyen a la resolución de problemas, conseguir objetivos y tareas similares. Este proceso se entiende mejor como una red de comunicaciones neuronales, en donde la corteza prefrontal tiene un

papel fundamental de monitoreo y control, cognición y emoción, debido a su capacidad de integrar la información proveniente de otras regiones (Ardila, 2008). Restrepo (2008) menciona que de que serviría tener solo habilidades lingüísticas o memoria, si no hubiera una coordinación y orientaciones de todas las habilidades a la vez.

De acuerdo con lo anterior, los términos "tareas del lóbulo frontal" y "funciones del lóbulo frontal" se utilizan a menudo indistintamente para describir las funciones ejecutivas. Estos conceptos surgen de investigaciones sobre el desarrollo humano y las lesiones cerebrales, pero pueden tener una precisión limitada, sin embargo, se necesita el desarrollo de más estudios que se basen en la función de las porciones cerebrales con el lóbulo frontal, que desempeña un papel crucial en estas funciones (Bettcher, et al., 2016).

Desde la las primeras etapas de la vida se produce un desarrollo importante en las funciones ejecutivas, acompañado de las diferentes etapas de aprendizaje y cambios estructurales y anatómicos del SNC, principalmente los de la corteza prefrontal (Diamond, 2001), la cual continúa evolucionando hasta aproximadamente los treinta años del sujeto, convirtiéndose en uno de los últimos procesos de maduración en el SNC. Factores como el medio ambiente y factores socioculturales pueden influir en el desarrollo de las funciones ejecutivas, por tanto, los cambios funcionales de la corteza dependen de los procesos estructurales y de la cantidad y calidad del aprendizaje y experiencias (Hackman y Farah, 2008).

En los seres humanos, el daño macroscópico, microscópico o bioquímico en la corteza prefrontal produce signos variados relacionados con cambios en la toma de decisiones, la memoria, la atención y la planificación, entre otros (Miller, 1999).

Existen hipótesis que apoyan la asignación de las FE a la corteza prefrontal, como la hipótesis frontal relacionada con el envejecimiento, donde el principio esencial es que la resistencia a la interferencia (es decir, la capacidad de inhibición) es un factor importante en el proceso de la competencia intelectual y el deterioro de la capacidad mental en las diferentes etapas de la vida. Estas postulan que el envejecimiento es una de las características de la reducción de las FE y corresponden a la afectación de la velocidad del procesamiento derivada de los cambios estructurales de la corteza prefrontal. Hace una década la hipótesis anterior fue reforzada con los hallazgos reportados por Miyake y colaboradores (2000).

Aunado a lo anterior en el 2000 diversos autores hablaron sobre el envejecimiento, la disminución de las FE y el menor volumen de la materia gris, (Bettcher, et al., 2016), dando como resultado un decremento en el rendimiento cognitivo a lo largo de la vida.

Afectaciones de las funciones ejecutivas en el daño prefrontal

La corteza prefrontal funciona como una región donde se integra la cognición y la emoción dentro del cerebro, de tal forma que se puede asumir, el daño que sufre esta estructura y las alteraciones combinadas en estos dos aspectos (Ardila, 2008). Algunas expresiones clínicas a consecuencia de los daños que sufre la corteza prefrontal, se relacionan con localización y extensión, se pueden distinguir los siguientes síndromes:

1. Síndrome prefrontal dorsolateral (disejecutivo): suele haber una grave alteración de las FE, por lo cual el grado de desorganización es muy alto; entre sus principales características se encuentran el deterioro de la atención, bajo control de interferencia, deficiencias en el desempeño de la memoria de trabajo, por tanto, de la planeación e integración de la conducta. Finalmente, las personas con este síndrome pueden abandonar lo planeado, sin conseguir el objetivo.
2. Síndrome prefrontal medial: en este caso entra una emoción negativa, con desmotivación, comportándose de forma pasiva y apática.
3. Síndrome prefrontal orbitofrontal: el comportamiento impulsivo y la conducta antisocial definen este síndrome, puede ser notoria la ausencia del control de la espera y el déficit de atención. Las personas que tienen esta afectación, pueden ser hiperactivos, con una energía desorganizada y al mismo tiempo manifiestan poca preocupación por las consecuencias de su conducta.

Otras circunstancias en las que se ven afectadas las FE en el adulto son: abuso de sustancias, la dependencia a los medicamentos, esquizofrenia, depresión mayor, trastorno obsesivo compulsivo, daño cerebral por traumatismo craneal, Parkinson, esclerosis múltiple, VIH, entre otras (Delgado, 2013).

Efectos de la contaminación en la salud mental y las FE

Desde los inicios del estudio de las funciones mentales, el medio ambiente ha desempeñado un papel crucial en el examen y la comprensión de las enfermedades mentales. Es posible observar un cambio desde una perspectiva ambiental amplia a una comprensión más contemporánea que considera factores como el clima (como la escasez de luz natural en las regiones nórdicas), así como diversas influencias físicas y químicas en los trastornos del estado de ánimo y las afecciones neurológicas. La interacción entre la naturaleza y la crianza ha sido durante mucho tiempo un foco clave en los estudios sobre las causas de los problemas de salud mental y en la comprensión general de estas

afecciones (Ordóñez, 2020). Si los niveles de PM2.5 se hubieran reducido a los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en México en 2015, se podrían haber evitado aproximadamente 14,666 muertes y 150,771 años de vida ajustados por discapacidad (Riojas et al., 2021).

Luria fue el autor inicial en conceptualizar las funciones ejecutivas y sus afectaciones, aunque no utilizó el término tal cual lo conocemos ahora, el concepto se atribuye a Muriel Lezak, quien observó que los pacientes con afectación del lóbulo frontal mostraban dificultades con la motivación y la iniciativa. A medida que se avanza en la vida, los seres humanos se encuentran con diferentes situaciones que tienden a evolucionar y volverse más complejas a medida que maduramos y asumimos nuevos intereses y responsabilidades. En consecuencia, los mecanismos ejecutivos se involucran en una amplia gama de escenarios y etapas de la vida, y su eficacia es esencial para un funcionamiento óptimo que sea socialmente apropiado (Lezak, 2004, citado por Verdejo & Bechara, 2010).

Los procesos de la memoria (tanto a corto como a largo plazo) están influidos por las diferentes funciones ejecutivas, Fuster señaló que cualquier modelo de memoria activa debería reconocer que el control, el mantenimiento o la manipulación de la información también afectan al contenido de la memoria a largo plazo. La recuperación de información está vinculada a las tareas específicas que enfrentamos, incluida la selección de información pertinente, el establecimiento de nuestros objetivos, la determinación de lo que debe retenerse en la memoria y la indicación de lo que debe recuperarse, todo lo cual está evidentemente conectado con los procesos ejecutivos.

Por el contrario, sin memoria a largo plazo, nuestro entorno perdería todo sentido de coherencia. Por ejemplo, durante la aplicación de una prueba neuropsicológica que evalúa la memoria, cuando se plantea a un paciente que ordene las tarjetas de Wisconsin, ¿qué ocurriría si no conociera el significado de la palabra “tarjeta” u “ordenar”? En este contexto, la memoria a largo plazo desempeña un papel crucial al suministrar continuamente información a la memoria de trabajo, lo que le permite funcionar utilizando tanto datos previamente almacenados como señales nuevas del entorno. Además, está claro que la nueva información que se adquiere al interactuar con nuevos datos altera y refresca la memoria a largo plazo, en particular en conductas que requieren el funcionamiento ejecutivo (Tirapu, et al., 2005).

Los pacientes con déficits cognitivos junto con los problemas de memoria pueden condicionar el resultado de la evaluación realizada. Con frecuencia es difícil establecer si

los déficits son primarios o consecuencia de otras alteraciones de la atención, funcionamiento ejecutivo, lenguaje, etc. Pero siempre constituyen un desafío y en ningún caso debe ignorarse su estudio, puesto que van a condicionar el tipo de intervención y, en definitiva, la calidad de la atención ofrecida a las personas con este tipo de patologías (Tirapu y Muñoz, 2005)

En los últimos diez años, varios estudios epidemiológicos han indicado que la exposición a la contaminación del aire exterior está relacionada con el deterioro cognitivo, la patología cerebral (Chen et al., 2015; Wilker et al., 2015) y un aumento de las admisiones hospitalarias por causas neurológicas (Kioumourtoglou et al., 2016). Los estudios experimentales y en animales también observaron que la inhalación de partículas y los gases de escape de diésel aumentaban las especies reactivas de oxígeno y respuestas inflamatorias en el cerebro, que se acompañaron de cambios neuropatológicos que incluían la activación microglial (Block et al., 2004) y la alteración de la barrera hematoencefálica. Aunado a esto, la contaminación del aire se ha asociado con disfunción y accidentes cerebrovasculares, que conducen a neurodegeneración con mayor incidencia de demencia (Chen et al., 2017).

Los pacientes con lesiones en la corteza frontal presentan deterioros en las funciones ejecutivas (Stuss y Levine, 2002), lo que lleva a clasificar esta área como la base neuroanatómica primaria de estas capacidades. En primer lugar, la investigación que involucra tanto a individuos lesionados como la neuroimagen funcional ha demostrado que las funciones ejecutivas dependen de la participación colaborativa de sistemas dinámicos que incluyen la corteza frontal, varias áreas corticales posteriores y estructuras paralímbicas adicionales como el hipocampo, la amígdala o la ínsula, así como estructuras basales como los ganglios basales y el tronco encefálico (Alexander et al., 1986; Bechara et al., 2000; Clark et al., 2008; Collette et al., 2005, 2006; Goldberg et al., 1989; Robbins, 2007, 2009, citado por Verdejo & Bechara, 2010). Por otro lado, la corteza frontal es la región más grande del cerebro, representa un tercio de su superficie total, y tiene diversidad funcional es amplísima (Snell, 2014).

La evidencia de diversas fuentes sugiere que la contaminación del aire puede tener un impacto perjudicial en los procesos neurodegenerativos; estudios han explorado esta relación la relación entre demencia y contaminación del aire (Yun-Chun, 2015; Santos et al) además, sigue sin estar claro si la exposición a niveles bajos de contaminación del aire puede influir negativamente en el riesgo de desarrollar demencia.

Dada la ubicuidad de la exposición a la contaminación del aire y la enorme carga de

salud pública de la demencia, realizamos un gran estudio de cohorte basado en la población en Ontario, Canadá, donde las concentraciones de contaminantes se encuentran entre las más bajas del mundo, para investigar si la exposición al aire común Los contaminantes , especialmente las partículas finas ($\leq 2,5\mu\text{m}$ de diámetro o PM 2,5), el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el ozono (O₃) se asocian con el diagnóstico incidente de demencia. Los pacientes de edad avanzada demuestran una asociación más aparente entre la hipertensión arterial y el deterioro cognitivo cuando la primera condición surge por primera vez en la mediana edad. La hipertensión puede promover cambios en la estructura y función del cerebro a través de la remodelación de los vasos cerebrales (Chen et al., 2017).

Esto puede provocar alteraciones en la autorregulación cerebral, reducciones en la perfusión cerebral y limitaciones en la capacidad del cerebro para eliminar proteínas potencialmente dañinas, como la β -amiloide. Además, la hipertensión altera la estructura y función de los vasos sanguíneos cerebrales y puede provocar un daño isquémico en la sustancia blanca que es fundamental para la función cognitiva, favoreciendo así el desarrollo de enfermedades neurodegenerativas.

La contaminación atmosférica por partículas se ha relacionado con la neuroinflamación en el contexto de las enfermedades cerebrovasculares. En un estudio con perros expuestos a altos niveles de ozono, partículas y otros contaminantes se encontraron pruebas iniciales que indicaban que la inhalación de contaminantes puede provocar neuroinflamación. Se observó inflamación en los cerebros de estos animales, que presentaban daño endotelial. Investigaciones in vivo adicionales han revelado que las partículas pueden desencadenar reacciones inflamatorias y oxidativas en el sistema nervioso central. Los ratones sometidos a la inhalación de diésel mostraron una mayor progresión de las características de la enfermedad de Alzheimer junto con respuestas inflamatorias y microgliales activadas. Estos estudios en animales destacaron signos de daño celular relacionado con la contaminación atmosférica (Santos, et al., 2021)

Según un estudio de 2023 realizado por Hu y He, que encontró un vínculo entre los niveles elevados de PM 2,5 y el aumento de las temperaturas ambientales que contribuyen al aumento de la multimorbilidad, la investigación se centró tanto en las poblaciones rurales como en las urbanas. Los resultados indicaron que los residentes urbanos mostraron una asociación más fuerte entre la multimorbilidad y las partículas en suspensión (Hu y He, 2023)

Aunque la mayoría de las investigaciones sobre los efectos de la contaminación del aire o de las partículas en suspensión en la salud se centran principalmente en las

enfermedades respiratorias y cardiovasculares, así como en problemas neurológicos como la demencia, es fundamental cuestionar los paradigmas existentes. Desde el punto de vista de los procesos fisiológicos únicos que se producen en el organismo y de las características de las partículas en suspensión, en particular las PM 2,5, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) destaca en el libro Importancia de las partículas PM 2,5 que estas partículas pueden ser aún más dañinas (citado por SEMARNAT, 2021). Contienen sulfatos, nitratos, ácidos, metales y carbono negro, este último conocido por su naturaleza porosa y su extensa superficie, lo que le permite absorber subproductos adicionales de la combustión que son mutagénicos, lo que potencialmente permite su transferencia a los tejidos humanos.

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) indica que una reducción en los niveles de contaminación del aire conlleva mejoras tanto en la salud cardiovascular como respiratoria (SEMARNAT, 2021). Esto permite pensar que la población expuesta a niveles más bajos, tiene la probabilidad de tener menos alojamiento de material particulado en tejidos importantes, como el cerebro, por tanto, menos riesgo de afectar sus condiciones neurológicas.

Las investigaciones mecanicistas recientes indican que las partículas de los contaminantes del aire pueden atravesar la barrera olfativa y acceder directamente al cerebro. Al entrar en el cerebro, estas partículas pueden provocar neuroinflamación y provocar un plegamiento excesivo de proteínas, lo que podría contribuir a la demencia. Aunque la evidencia todavía se encuentra creciendo en la literatura, un número cada vez mayor de estudios epidemiológicos en Europa, América del Norte y Asia están demostrando que vivir en áreas con altos niveles de contaminación aumenta el riesgo de desarrollar demencia. Algunas investigaciones apuntan a los cambios cardiovasculares inducidos por la contaminación del aire como un posible factor impulsor, pero la vía de efecto directo sigue sin descartarse. La hipótesis de que la asociación entre la contaminación del aire y la demencia está mediada por la enfermedad cardiovascular y el síndrome metabólico es razonable, ya que se sabe que la contaminación del aire causa y agrava las afecciones cardiovasculares. Sin embargo, la población y los gobiernos del mundo no parecen estar preparados para afirmar que la contaminación del aire afecta al cerebro y provoca demencia.

Los estudios de campo pueden, como en este caso, ser propensos a diversos sesgos en relación, por ejemplo, con la selección de casos de demencia y la evaluación de la exposición a largo plazo a la contaminación del aire de cada individuo. Esto podría explicar por qué la contaminación del aire actualizada no se ha incorporado a la lista de

factores de riesgo establecidos y potencialmente modificables para la demencia. Se sugiere que esta percepción debe modificarse y que la contaminación del aire debe considerarse un factor de riesgo para contraer demencia a fin de reducir la carga de la enfermedad en los países de América Latina y el Caribe. En agosto de 2020, por primera vez, la contaminación del aire entró en un informe sobre la prevención de la demencia como un riesgo modificable de la enfermedad (Santos et al., 2021).

Un proceso de vital importancia de acuerdo a lo anterior es el monitoreo de la calidad del aire, del cual se obtienen los índices de calidad del aire y es la vía para obtener información para la acción, tanto de la población como de los gobiernos; y por un lado, reducir o evitar la exposición cuando la calidad es mala, así como diseñar políticas públicas integrales encaminadas a limitar y, de ser posible, corregir este problema de salud pública (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2019).

JUSTIFICACIÓN

La OMS recomienda encarecidamente que los países tomen medidas nacionales para reducir los factores de riesgo bien establecidos de demencia a nivel individual y poblacional. Estos factores de riesgo incluyen obesidad, hipertensión, accidente cerebrovascular, diabetes mellitus, enfermedades cardíacas, inactividad física, mala alimentación, abuso de alcohol, tabaquismo, inactividad cognitiva, depresión y aislamiento. Al menos cinco de estos riesgos pueden ser causados o agravados por respirar aire de mala calidad. Esto significa que controlar la contaminación del aire a través de políticas y regulaciones podría ayudar a reducir la carga de la demencia. Esto es relevante en los países de ALC, donde los casos aumentarán y el control de la contaminación no suele ser estricto. Grandes áreas urbanas de los territorios más poblados de ALC, como São Paulo y Ciudad de México, presentan una mala calidad del aire muy por encima de los niveles de seguridad sanitaria recomendados por la OMS. Ambas regiones metropolitanas se encuentran entre las ciudades globales con los índices de intensidad de tráfico más altos. La reducción de la intensidad del tráfico es un ejemplo de una política de control de la contaminación que ya se ha adoptado con éxito en otras grandes áreas urbanas de Europa, por ejemplo.

La contaminación del aire ambiental contribuyó sustancialmente a la carga mundial de morbilidad en 2015, que aumentó en los últimos 25 años debido al envejecimiento de la población, los cambios en las tasas de enfermedades no transmisibles y el aumento de la contaminación del aire en los países de ingresos bajos y medios. Se producirán reducciones modestas de la carga en los países más contaminados a menos que los valores de PM 2.5 se reduzcan sustancialmente, pero existe la posibilidad de que la reducción de la exposición produzca importantes beneficios para la salud (Cohen, et al., 2017)

Las investigaciones en relación al efecto de la contaminación ambiental con el desarrollo neuropsicomotor cada día toman más fuerza, porque cada día son más los niños expuestos a contaminación por tal razón es necesario utilizar un instrumento que permita detectar los niños como mayor riesgo de presentar alteraciones del desarrollo, en Colombia se ha adoptado y validado la escala abreviada del desarrollo neuropsicomotor que evalúa cuatro aspectos fundamentales, como las capacidades, habilidades motora y fina, el lenguaje, así como la interacción social del niño menor de 4 años (Baron, & Osorio, 2017).

Los efectos en salud de la contaminación atmosférica pueden ser a corto y largo plazo dependiendo de la magnitud de la exposición, el tiempo de exposición, la vulnerabilidad o susceptibilidad de las personas y el tipo de sustancia o de partícula

contaminante, cada uno de estos factores determinan la probabilidad de padecer el riesgo de sufrir enfermedades respiratorias, cardiovasculares y neurológicas (Baron, & Osorio, 2017).

Los efectos nocivos del material particulado en el cerebro están relacionados con la lesión de la barrera hematoencefálica, así como con el movimiento de partículas y citocinas generadas en los sistemas periféricos. Además, la toxicidad celular y los efectos neurotóxicos están asociados a los minerales, metales y elementos tanto carbonosos como orgánicos presentes en el PM (Cinvestav, 2021). En México, se estima que se habrían producido 666 muertes menos y una reducción de 150,771 años de vida ajustados por discapacidad si los niveles de PM2.5 se hubieran reducido a los estándares establecidos por la Organización Mundial de la Salud (Riojas, et al., 2021).

OBJETIVOS

Objetivo general

Comparar las funciones ejecutivas entre individuos expuestos y no expuestos a Material Particulado para identificar posibles efectos de la exposición ambiental en el desempeño cognitivo

Objetivos específicos

1. Describir las puntuaciones de funciones ejecutivas en el grupo expuesto y en el grupo no expuesto a Material Particulado PM
2. Comparar estadísticamente las puntuaciones de funciones ejecutivas entre los grupos expuesto y no expuesto a PM

Hipótesis

Hi: Existe una diferencia significativa en las puntuaciones de funciones ejecutivas entre los individuos expuestos y los no expuestos a Material Particulado.

H0: No existe una diferencia significativa en las puntuaciones de funciones ejecutivas entre los individuos expuestos y los no expuestos a Material Particulado.

MATERIAL Y MÉTODOS

Diseño del estudio

El presente estudio es de tipo observacional, transversal y comparativo, ya que tiene como objetivo comparar las funciones ejecutivas entre dos grupos de individuos —expuestos y no expuestos a Material Particulado— mediante la medición de sus puntuaciones en una batería de funciones ejecutivas en un solo momento.

Procedimiento:

Se realizó un mapeo ecológico, identificando las zonas de mayor y menor riesgo por exposición a material particulado en el estado de Hidalgo.

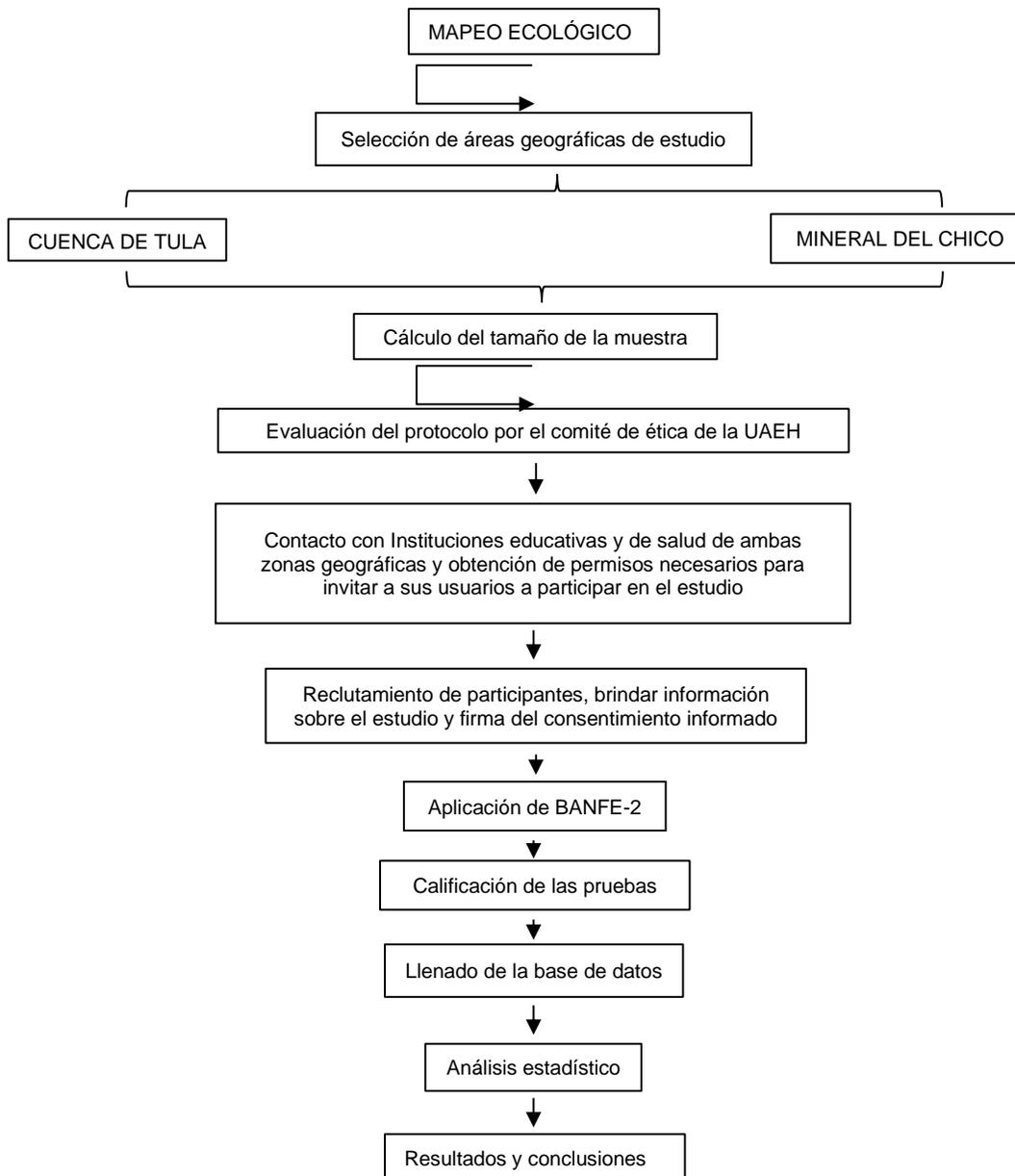
Un mapa ecológico permite contemplar de manera visual los recursos vegetales forestales que presenta un territorio, de uso principal para visualizar y resolver problemas ambientales de gran importancia para las naciones y el planeta entero (FAO, 2018).

Se seleccionó primero la zona con más alto índice de contaminación de la entidad, que es la cuenca de Tula. Se valoró posteriormente cuál es la zona del estado con menor índice de contaminación, y entre varios, se elige el municipio de Mineral del Chico debido a la oportunidad de obtener apoyo por parte del personal del Centro de Salud para contactar a los pobladores.

Los participantes seleccionados para el estudio fueron aquellos que habían experimentado exposición crónica a material particulado durante 10 años o más. Esta decisión se basó en los hallazgos de estudios como el realizado por Hu y He en 2023, que indican que solo la exposición prolongada a este contaminante del aire está asociada con varias enfermedades crónicas, mientras que los efectos perjudiciales para la salud pueden no ser evidentes en casos de exposición a corto plazo. La muestra se recopiló utilizando un enfoque de muestreo no probabilístico, centrándose en sujetos típicos que cumplieran los criterios necesarios, y el tamaño de la muestra se determinó en consecuencia. Las evaluaciones de cada participante del estudio se calificaron obteniendo primero las puntuaciones naturales de cada subprueba y luego, haciendo referencia a las tablas de edad y años de escolaridad, se derivaron las puntuaciones codificadas. Por último, se obtiene el perfil de ejecución de cada sujeto y mediante esta gráfica se obtienen las puntuaciones normalizadas.

El análisis de resultados se llevó a cabo mediante el programa estadístico SPSS 24.

Figura 9. Diagrama de flujo del procedimiento.



Fuente: (Elaboración propia, 2018)

Población de estudio

Población que cuente con antecedentes de exposición crónica a material particulado que acudan a atención a los servicios de salud del estado de Hidalgo.

Muestra

Tipo de muestreo

No probabilístico, por sujetos tipo (García, Márquez y Ávila, 2009).

Tamaño de la muestra

Se selecciona la muestra por método de muestreo no probabilístico con sujetos tipo y se calcula el tamaño de la muestra. Se realiza una búsqueda en artículos científicos y tesis disponibles en la biblioteca digital de la UNAM, donde se encuentra que en las publicaciones disponibles que utilizan como instrumento de evaluación BANFE-2 son muestras pequeñas (desde menos de una decena, hasta 30 o 40 sujetos), y al considerar que el mínimo para investigación en humanos es de 30 sujetos, se estableció la muestra de la siguiente manera:

- 30 sujetos en el grupo de estudio. Son los sujetos expuestos de forma crónica (10 años o más) a material particulado.
- 30 sujetos en el grupo control, no expuestos crónicamente a material particulado.

Lugar y tiempo

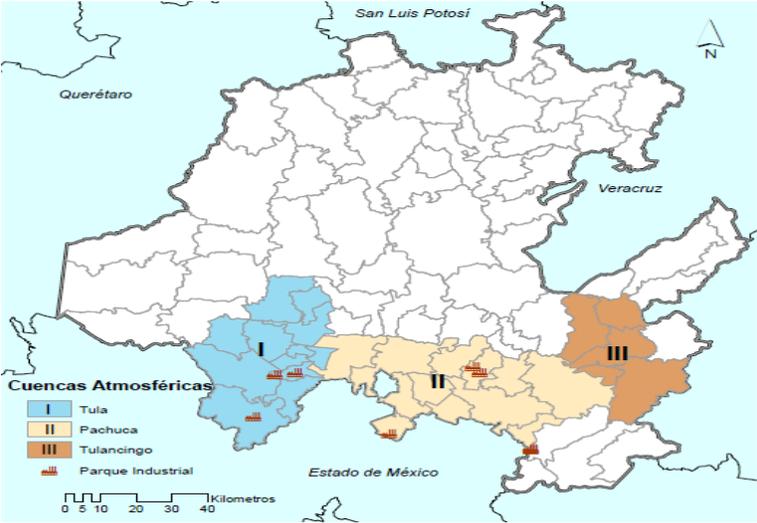
Las cuencas atmosféricas son establecidas de acuerdo, entre otros factores, a las zonas montañosas que pudieran delimitar el movimiento de los vientos, variables meteorológicas (como el clima), actividad industrial y densidad de población; y han sido establecidas para posibilitar estudiar de la mejor manera las emisiones hacia la atmósfera y los mecanismos de transporte aéreo de partículas entre las diferentes zonas del territorio. Las cuencas en el estado de Hidalgo son tres: Tula, Pachuca y Tulancingo.

El presente proyecto, tiene como limitación espacial la información específica que se recolectó del impacto en la cuenca de estudio, que fue la cuenca de Tula, Hidalgo con la muestra a través de la recolección de datos.

La delimitación temporal está basada en los resultados de las comparaciones de las funciones ejecutivas entre individuos expuestos y no expuestos a contaminación del aire para identificar posibles efectos de la exposición ambiental en el desempeño cognitivo.

La recolección de datos tuvo una duración de un año, iniciando en 2018 y concluyendo en mayo del 2019.

Figura 10. Cuencas atmosféricas del estado de Hidalgo: I) Tula, II) Pachuca y III) Tulancingo.



Fuente: Imagen tomada de SEMARNAT 2016.

El escenario de estudio de esta investigación se centra en la cuenca de Tula, conformada por 12 municipios del estado de Hidalgo (Tabla 4).

Tabla 4. Municipios que conforman la cuenca atmosférica de Tula.

Municipios que conforman la Cuenca de Tula		
Atitalaquia	Progreso de Obregón	Tezontepec de Aldama
Atotonilco de Tula	Tepeji del Río de Ocampo	Tlahuelilpan
Chilcuautla	Tepetitlán	Tlaxcoapan
Mixquiahuala de Juárez	Tetepango	Tula de Allende

Fuente: Elaboración propia.

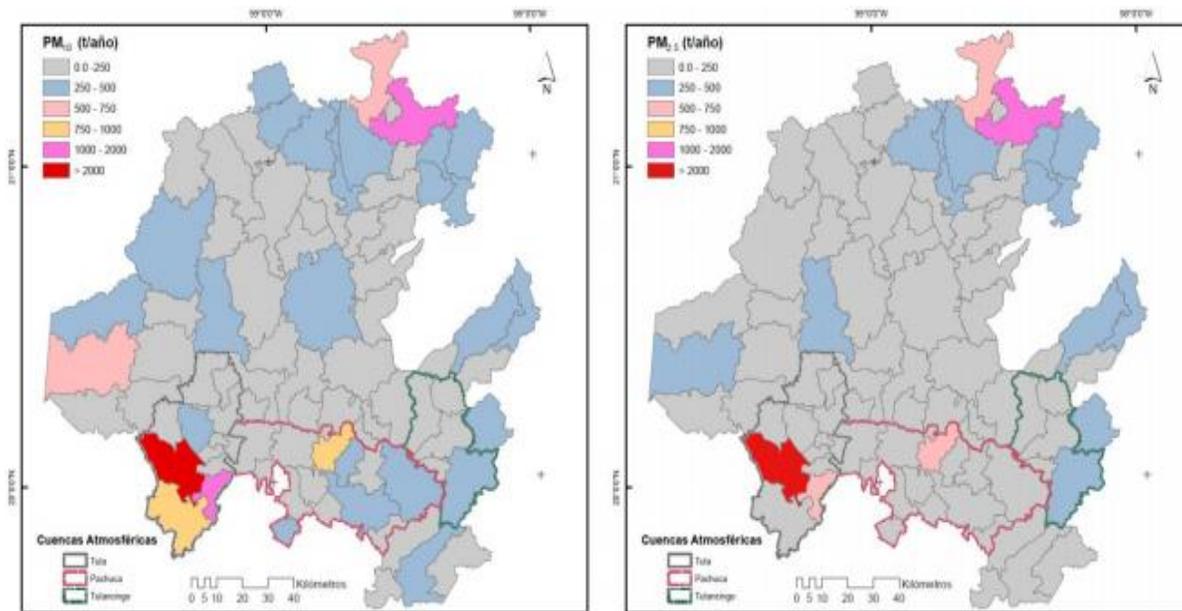
Se ubica en el Valle del Mezquital, al suroeste de la entidad. Tiene una superficie de 1,730 km² y alberga al 16.36% de la población estatal.

En esta cuenca se encuentra uno de los corredores industriales más importantes del país; hay industria química, metalúrgica, metal-mecánica y productoras de cemento y cal, entre otras. De las que más se destacan son la Refinería Miguel Hidalgo de Petróleos Mexicanos (PEMEX) y la Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos de la Comisión Federal de

Electricidad (CFE).

DIRECCIÓN Y VELOCIDAD DEL VIENTO: La cuenca atmosférica de Tula ha sido la más estudiada debido a las actividades industriales ahí desarrolladas y cómo el viento es capaz de transportar partículas contaminantes.

Figura 11. Distribución geográfica de las emisiones de PM₁₀ y PM₂₅ en el estado de Hidalgo.



Fuente: (SEMARNAT, 2016)

Criterios de elegibilidad

Criterios de inclusión

Criterios de inclusión expuestos:

- Antecedente de exposición crónica (10 años o más) a altos niveles de material particulado.
- Edad entre 45 y 65 años.
- Que el sujeto firme el consentimiento informado

Criterios de inclusión no expuestos:

- Historia de NO exposición crónica (10 años o más) a altos niveles de material particulado.
- Edad entre 45 y 65 años
- Que el sujeto firme el consentimiento informado.

Criterios de exclusión

- Historia de abuso o dependencia de drogas, alcohol o medicamentos psiquiátricos.
- Historia de alteración neurológica o psiquiátrica
- Antecedentes de traumatismo craneoencefálico severo o con pérdida del estado de alerta.
- Uso actual de medicamentos psicoactivos.
- Alteraciones visuales o auditivas no corregidas.

Criterios de eliminación

- El sujeto decide no participar en el estudio.
- El sujeto opte por interrumpir su participación durante el curso del estudio.

VARIABLES DE ESTUDIO

Unidad de Análisis: Las funciones ejecutivas

Técnica de recolección de datos: Batería Neuropsicológica de Funciones Ejecutivas y Lóbulos Frontales BANFE-2 (Flores, et. al, 2014).

Tabla 5. Variables de estudio

Tipo de Variable	Nombre	Definición conceptual	Definición operacional
Variable dependiente	<u>Funciones ejecutivas</u>	Las funciones ejecutivas son un conjunto de procesos cognitivos de alto nivel que permiten la planificación, el control y la autorregulación de la conducta dirigida a metas. Incluyen habilidades como la memoria de trabajo, la flexibilidad cognitiva, el control inhibitorio, la organización y la toma de decisiones. Estas funciones son fundamentales para la adaptación eficaz a situaciones nuevas o complejas, la resolución de problemas y la regulación de impulsos, y se asocian principalmente con la actividad del lóbulo prefrontal (Diamond, 2013; Lezak et al., 2012).	Batería Neuropsicológica de Evaluación de las Funciones Ejecutivas y Lóbulos Frontales BANFE-2, integrada por 14 subpruebas que evalúan las capacidades para: <ul style="list-style-type: none"> ● Inhibir respuesta automática ● Operar en una condición incierta ● Respetar límites ● Desarrollar una estrategia ● Mantener la memoria de trabajo ● Flexibilidad mental ● Planear acciones ● Realizar operaciones de cálculo simple ● Seleccionar y reproducir la mayor cantidad de verbos posibles ● Realizar predicciones ● Analizar de modo abstracto 3 posibles soluciones al sentido de una frase (Flores, Ostrosky, y Lozano, 2014).

Tipo de Variable	Nombre	Definición conceptual	Definición operacional
Independiente	<u>Material particulado</u>	<p>Definición conceptual:</p> <p>La exposición a la contaminación del aire se refiere a la presencia y contacto continuo o intermitente de un individuo con contaminantes atmosféricos, tales como partículas en suspensión (PM2.5, PM10), gases tóxicos (ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre) u otros compuestos químicos emitidos por fuentes naturales o antropogénicas. Esta exposición puede ser medida mediante indicadores ambientales, estimaciones de concentración en el entorno o categorización geográfica (por ejemplo, residencia en zonas con altos o bajos niveles de contaminación) Organización Mundial de la Salud, 2021; EPA, 2019).</p>	<p>Definición operacional:</p> <p>Tiempo de exposición a material particulado, al vivir en zonas con alta contaminación del aire o baja exposición.</p>

Instrumento

Prueba estandarizada. Batería Neuropsicológica Evaluación de las Funciones Ejecutivas y Lóbulos Frontales BANFE-2 (Flores, Ostrosky-Shejet & Lozano, 2014).

Las pruebas que integran la batería se seleccionaron y dividieron principalmente con base en el criterio anatomo-funcional: las que evalúan funciones complejas que dependen de la corteza orbitofrontal (COF), corteza prefrontal medial (CPFM), corteza prefrontal dorsolateral (CPF DL) y de la corteza prefrontal anterior (CPFA).

Las siguientes pruebas evalúan funciones que dependen principalmente de la COF y de la CPFM:

1. Efecto Stroop. Evalúa la capacidad de control inhibitorio.
2. Juego de cartas. Estima la capacidad para detectar y evitar selecciones de riesgo, así como para detectar y mantener selecciones de beneficio.
3. Laberintos. Calcula la capacidad para respetar límites y seguir reglas.

Pruebas que evalúan las funciones que dependen principalmente de la CPF DL

4. Señalamiento autodirigido. Evalúa la capacidad para utilizar la memoria de trabajo visoespacial para señalar de forma autodirigida una serie de figuras.
5. Memoria de trabajo visoespacial. Estima la capacidad para retener y reproducir activamente el orden secuencial visoespacial de una serie de figuras.
6. Ordenamiento alfabético de palabras. Calcula la capacidad para manipular y ordenar mentalmente la información verbal contenida en la memoria de trabajo.
7. Clasificación de cartas. Evalúa la capacidad para generar una hipótesis de clasificación, y sobre todo para cambiar de forma flexible (flexibilidad mental) el criterio de clasificación.
8. Laberintos. También permite evaluar la capacidad de anticipar de forma sistemática (planear) la conducta visoespacial.
9. Torre de Hanoi. Estima la capacidad para anticipar de forma secuenciada acciones tanto en orden progresivo como regresivo (planeación secuencial)
10. Suma y resta consecutiva. Evalúa la capacidad para desarrollar secuencias en orden inverso (secuenciación inversa).
11. Fluidez verbal. Estima la capacidad de producir de forma fluida y dentro de un margen

producido de tiempo la mayor cantidad de verbos.

Pruebas que evalúan funciones que dependen principalmente de las CPFA:

12. Clasificaciones semánticas. Evalúa la capacidad de productividad: producir la mayor cantidad de grupos semánticos, y la capacidad de actitud abstracta: el número de categorías abstractas espontáneamente producidas.
13. Selección de refranes. Estima la capacidad para comprender, comparar y seleccionar respuesta con sentido figurado.
14. Metamemoria. Evalúa la capacidad para desarrollar una estrategia de memoria (control metacognitivo), así como para realizar juicios de predicción de desempeño (juicios metacognitivos) y ajustes entre los juicios de desempeño y el desempeño real (monitoreo metacognitivo).

La aplicación de la prueba se basa en un análisis cuantitativo y cualitativo de los aciertos y de los errores en la prueba. El análisis cualitativo de la ejecución considera el concepto de sistema funcional postulado por Luria (1986), en el cual se menciona que el conjunto de funciones mentales superiores existe sólo gracias a la interacción de las estructuras cerebrales altamente diferenciadas y cada una de ellas desempeña una función que aporta al sistema dinámico. El daño en algún eslabón del sistema funcional ocasiona un tipo muy específico de trastorno en estos procesos conductuales complejos. Por lo tanto, según las características del trastorno en el sistema funcional, podemos precisar el área cortical del sistema que se ha afectado.

RESULTADOS

En ambos grupos, expuestos y no expuestos, la mayoría de los participantes fueron del del sexo femenino (Tabla 6).

Tabla 6. Porcentajes por sexo de expuestos y no expuestos

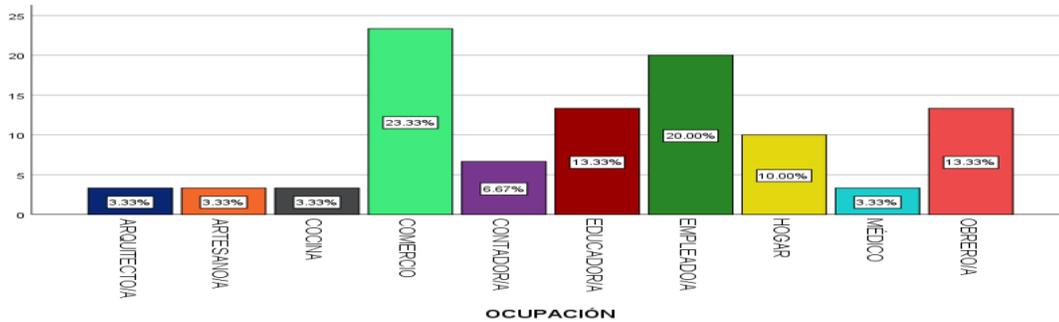
SEXO	EXPUESTOS	NO EXPUESTOS
HOMBRE	26.67%	33.33%
MUJER	73.33%	66.67%

Fuente: Elaboración Propia

Respecto a la edad, en el grupo de los expuestos el promedio fue de 57 años y la media de 65 años, mientras que, en el grupo de los no expuestos, la media de edad fue de 51 años y la moda de 49 años. Todos los sujetos se encontraban en el rango entre 44 y 65 años.

Con respecto a la ocupación, en el grupo de los expuestos, la que más frecuente se encontró fue la de “comerciante”, seguido por “empleado”, generalmente empleados de fábricas o industrias, lo que corresponde al hecho de que en la cuenca de Tula se encuentra una de las zonas industriales más importantes del país, cuyo principal giro es la industria cementera y calera, así como la industria petroquímica.

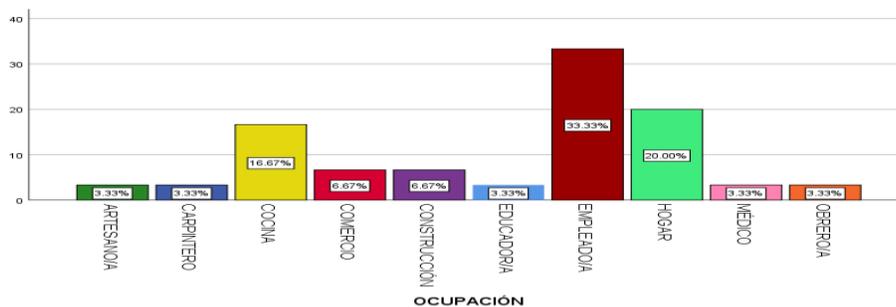
Figura 12. Ocupación de los participantes expuestos



Fuente: Elaboración propia.

En el grupo de los no expuestos, su ocupación más común fue “empleado” y después “hogar” y en tercer lugar de frecuencia, se dedicaban a cocinar alimentos para su venta; lo cual es acorde con las actividades económicas que se desarrollan en la zona ya que es un área de importante ecoturismo en el estado de Hidalgo.

Figura 13. Ocupación de los participantes no expuestos.



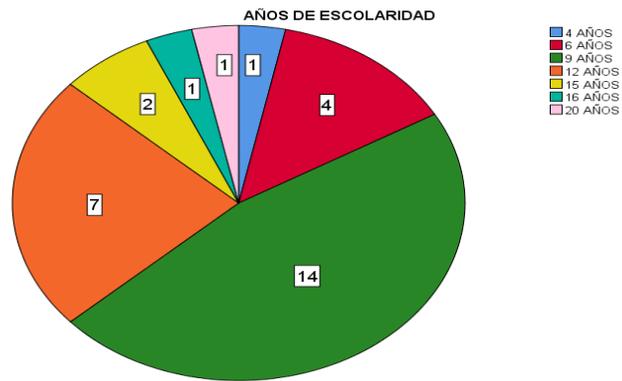
Fuente: Elaboración propia

Respecto a los años de escolaridad encontrados en los participantes de ambos grupos, para los expuestos el 56.7% tenían 12 o más años de escolaridad, en cambio en los no expuestos casi la mitad de los sujetos (el 46.7%) tenían sólo hasta la secundaria completa, y el 16.6% tenían sólo la primaria completa o incompleta. Esto corresponde con el factor asociado a la economía y grado accesibilidad a educación y servicios de la población, ya que en el área que habita la población de los no expuestos a contaminación aérea, al ser una zona rural, presentan menos accesibilidad a la educación y menor tendencia a continuar con la formación académica a nivel medio superior.

En cambio, en la población que habita la cuenca de Tula, derivado del propio desarrollo económico e industrial de la zona, presentan mayores oportunidades educativas

y mayor tendencia a la profesionalización y por lo tanto contar con más años de escolaridad en su historial.

Figura 14. Años de escolaridad de los participantes no expuestos



Fuente: Elaboración propia

Se realizaron pruebas para determinar si en los datos existía normalidad, aplicando los estadísticos de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk para los subtotales de la batería: “Orbitomedial”, “Prefrontal Anterior”, “Dorsolateral Memoria de Trabajo” y “Dorsolateral Funciones Ejecutivas”; encontrando que no existió normalidad en los datos.

Por lo anterior, se eligió la prueba de U de Mann-Whitney para muestras independientes, para comparar las puntuaciones en el desempeño de las Funciones Ejecutivas entre los sujetos del grupo de expuestos y los no expuestos al Material Particulado. Los resultados indicaron que no hubo diferencia significativa entre los grupos, $p = .261$. Tampoco se encontraron diferencias al realizar la misma prueba en cada uno de los subtotales de las 4 áreas diferentes de la corteza prefrontal que evalúa la BANFE.

Derivado de lo anterior, se procedió a calcular las medianas de ambos grupos, expuestos y no expuestos; para compararlas y determinar si existe algún grupo con mejor o peor desempeño.

Se calculó también la mediana de ambos grupos para cada uno de los 4 subtotales de las áreas prefrontales que evalúa la BANFE: Orbitomedial, Prefrontal Anterior, Dorsolateral Memoria de Trabajo y Dorsolateral Funciones Ejecutivas; tal como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Mediana de ambos grupos para cada uno de los 4 subtotales de las áreas prefrontales que evalúa la BANFE

	Mediana Grupo 1 Expuestos	Mediana Grupo 2 No Expuestos	Mediana Total de los Casos
Subtotal Orbitomedial	194.50	194.00	194.00
Subtotal Prefrontal Anterior	17.00	18.50	18.00

Subtotal	98.00	94.50	97.00
Dorsolateral Memoria de Trabajo			
Subtotal	77.00	86.00	83.00
Dorsolateral Funciones Ejecutivas			
Puntuación Total BANFE	385.50	397.00	389.00

Fuente: elaboración propia.

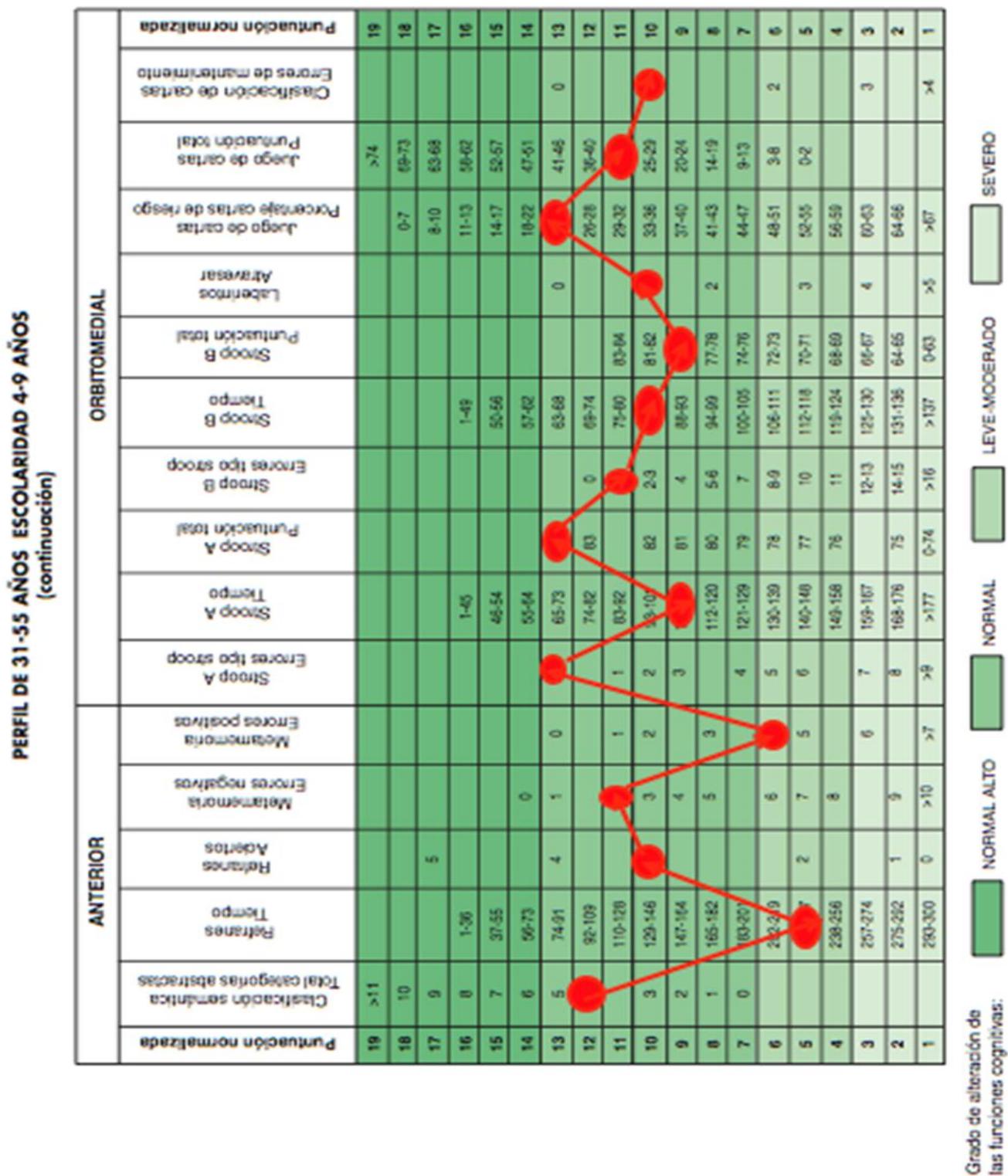
A pesar de que no se mostraron diferencias estadísticamente significativas, se debe observar las medianas de la puntuación total de la BANFE y de cada uno de los subtotales en donde resultan mejor puntuados los sujetos del grupo NO EXPUESTO de forma crónica a Material Particulado: Subtotal Prefrontal Anterior, Dorsolateral Funciones Ejecutivas; y Subtotal Orbitomedial (en donde las medianas son iguales entre ambos grupos), lo cual se traduce en que si bien las diferencias entre ambos grupos no se expresan claramente de forma estadística, pueden resultar clínicamente importantes para comprender a ambos grupos.

A continuación, se muestra el ejemplo de un perfil neuropsicológico de un sujeto del grupo de los NO EXPUESTOS (Tablas 8 y 9). El cual se divide de forma vertical en las 4 áreas de la corteza prefrontal que evalúa la BANFE, y cada área se divide en columnas, una por cada subprueba o tarea que realiza el sujeto. De manera horizontal en columnas, aparecen las puntuaciones normalizadas ordenadas de forma descendente, y para graficar el perfil neurológico del sujeto a prueba, se coloca un punto en donde coinciden la subprueba que se está evaluando con la puntuación normalizada que haya obtenido el sujeto.

De esta manera, al unir los puntos se dibuja la gráfica que nos permite saber visualmente en qué clasificación se encuentra el sujeto de acuerdo a la Batería Neuropsicológica de Funciones Ejecutivas y Lóbulos Frontales; ya que la tabla está separada de forma horizontal por 4 intensidades del color verde, representando de arriba hacia abajo: Normal Alto, Normal, Alteración Leve-Moderada, Alteración Severa.

Este ejemplo se trata de un sujeto femenino del grupo de los NO EXPUESTOS, de

Figura 16. Segunda parte del Perfil Neuropsicológico del sujeto ejemplo.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos del 2018

DISCUSIÓN

Durante el desarrollo de esta investigación ha resaltado el impacto que tiene el entorno circundante en el crecimiento de un individuo, incluso aquellos que se enfrentan a factores ambientales que pueden dañar el sistema nervioso llegando a mitigar estos efectos con estímulos adecuados. Un claro ejemplo de ello, es que los niños que viven en zonas muy contaminadas pueden beneficiarse de una educación escolar que fomente el desarrollo óptimo de las funciones ejecutivas, como lo demuestra el Modelo de Educación por Experiencia (Valencia, Padilla y González 2022).

El análisis de medianas de este proyecto de investigación, nos permitió observar que en tres de las cuatro áreas de la corteza prefrontal que la BANFE-2 evalúa, los sujetos del grupo NO EXPUESTO de forma crónica a altas concentraciones Material Particulado del aire, fueron quienes obtuvieron ligeramente puntajes superiores, igualmente esto se observa si se comparan las medianas de la puntuación Total de la batería entre ambos grupos; el grupo de los NO EXPUESTOS obtiene una puntuación mayor. Sin embargo, al encontrar sólo un área de evaluación en donde los sujetos expuestos se desempeñaron mejor, nos lleva a integrar este conocimiento con la literatura revisada en la que autores como Concha-Cisternas et al., (2022), con datos de 2005 en personas mayores chilenas en el que encontraron que aquellos con menor nivel educativo, son más propensos a desarrollar sospecha de deterioro cognitivo.

Lo anterior es similar a lo que encontraron científicos en un estudio transversal en China (Zhong et al., 2024), con 369 participantes mayores de 50 años de áreas urbanas que fueron evaluados con escalas neuropsicológicas e imagen cerebral; en donde el factor de la educación resultó ser un predictor importante de deterioro cognitivo, y finalizan resaltando la importancia de los logros académicos en la salud cognitiva de los sujetos.

En la investigación realizada por Abarca et al. en 2008, mencionan que el objetivo fue mostrar las consecuencias del envejecimiento en el deterioro cognitivo en 280 adultos mayores con diferentes grados de escolaridad, en donde se halló que los sujetos mostraban menor puntaje conforme tenían mayor edad, sin embargo, aquellos sujetos que tenían más años de escolaridad mostraron un mejor desempeño en la prueba Mini Mental.

Sin duda, los niños y adolescentes que crecen en zonas con una alta contaminación pueden tener afectación en sus funciones cerebrales, en especial las funciones ejecutivas,

sin embargo, pueden beneficiarse de ciertos factores protectores de la salud cognitiva. Algunos de ellos son, enfoques educativos basados en valores, que implican la colaboración activa de estudiantes, profesores y padres.

Este apoyo puede ayudar a los niños a alcanzar su máximo crecimiento intelectual y emocional, empoderándose en última instancia para convertirse en catalizadores del cambio en sus comunidades y en la sociedad en el futuro (Valencia, Padilla y González 2022).

De hecho, se ha visto que un alto nivel de actividad cognitiva conseguido por un alto nivel de escolaridad, procede como un factor protector independiente que previene el desarrollo de deterioro cognitivo.

Considerando que el deterioro cognitivo es uno de los síndromes geriátricos con alta incidencia en la población mayor, existe la necesidad de enfocarse en pautas para un tamizaje y diagnóstico temprano y que ayudan para la creación de futuras intervenciones preventivas de esta enfermedad (Stern, 2009).

Con la reserva cognitiva, las habilidades y destrezas que se suman antes del inicio del deterioro neuronal ayudan como protección contra la pérdida de función causada por la falla cerebral paulatina, o incluso, la suavizan activamente.

Sin embargo, este estudio presenta limitaciones, de temporalidad, por ejemplo; realizar una sola medición impide la identificación del deterioro cognitivo que podría observarse mediante un seguimiento longitudinal de los sujetos, como ocurriría en un estudio de cohorte. En su investigación de 2023, Hu y He revelan resultados sorprendentes al comparar los impactos en la salud de la exposición a PM 2,5 y temperaturas extremas entre las poblaciones rurales y urbanas, y encuentran que la población rural experimentó mayores daños a la salud. Atribuyen esta disparidad a la distribución desigual de la calidad del aire y los fenómenos meteorológicos extremos, junto con las diferencias en el acceso a los servicios de atención sanitaria, la vivienda y las condiciones de vida entre los dos tipos de población (Hu y He, 2023).

Un estudio reveló una correlación positiva entre la exposición a PM 2,5 y la incidencia de demencia, presentando un cociente de riesgo (HR) de 1,06 (IC del 95 %: 1,05-1,07) para cada aumento del rango intercuartil (RIC), después de tener en cuenta factores como la edad, el sexo y la región. Cuando se realizaron ajustes adicionales para covariables adicionales, incluidas las comorbilidades y el nivel socioeconómico (NSE), la asociación se debilitó ligeramente, lo que resultó en un HR de 1,04 (IC del 95 %: 1,03-1,05). Asimismo, la

exposición al NO₂ se relacionó con un aumento del 10 % en la incidencia de demencia (IC del 95 %: 1,08-1,12). Por el contrario, no se identificó una relación significativa para el O₃ (HR IQR = 0,98; IC del 95 %: 0,96-1,00). Estas asociaciones se mantuvieron estables incluso después de ajustes indirectos por factores como el tabaquismo, la obesidad, la actividad física y la educación (Chen, et al., 2017).

CONCLUSIONES

Una de las principales barreras para establecer la correlación entre la exposición a estos contaminantes del aire y el cambio en las funciones ejecutivas es la calidad de los datos presentados en los informes gubernamentales sobre la calidad del aire; como las mediciones no son consistentes a lo largo del tiempo, no se observan tendencias mensuales o anuales en esos documentos; los propios documentos dejan claro que esto se debe a la falta de datos adecuados o completos por falta de equipos funcionales en las estaciones de medición

Adicionalmente, respecto a los resultados, se encontró durante la obtención de ellos que el tamaño de la muestra nos permitió encontrar diferencias ligeras entre las medianas de los grupos expuesto y no expuesto, sin embargo, en una muestra mayor puede reflejarse esta diferencia de forma más significativa.

Por último, de acuerdo a los resultados que obtuvieron algunos sujetos del grupo de los expuestos de forma crónica al material particulado, quienes de acuerdo a la investigación en el marco teórico, se ha asociado de forma importante el vivir en lugares con altos índices de contaminación del aire al deterioro cognitivo; se entiende que aquellos que a pesar de esta condición obtuvieron puntajes elevados, son aquellos que poseen mayor nivel educativo, lo que pudo significar en ellos un factor protector ante el menoscabo de sus funciones ejecutivas cerebrales.

LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Este estudio presenta limitaciones:

De temporalidad: que al realizar solo una medición en el tiempo no se logren detectar signos de deterioro cognitivo que posiblemente se reflejarían al seguir a los sujetos en el tiempo, como en un estudio de cohorte.

MARCO LEGAL

En este trabajo de investigación se consultaron, para fines del marco legal, tres documentos relacionados con: la salud en general, la salud en materia de investigación y la salud mental de forma específica.

De acuerdo con la Ley General de Salud, Capítulo VII, Artículo 72, la prevención de las enfermedades mentales es de carácter prioritario.

El Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Investigación para la salud, se relaciona con esta investigación en su título primero, artículo 3º donde menciona que la investigación para la salud comprende acciones que contribuyan: fracción I: al conocimiento de los procesos biológicos y psicológicos en los seres humanos; II: Al conocimiento de los vínculos entre las causas de enfermedad, la práctica médica y la estructura social; III: A la prevención y control de los problemas de salud; IV: Al conocimiento y evaluación de los efectos nocivos del ambiente en la salud.

El artículo 7, fracción V, también es pertinente, pues especifica que la coordinación de investigación de la secretaría de salud tendrá varias responsabilidades, entre ellas, facilitar la colaboración entre instituciones de salud y educativas para fortalecer las actividades de investigación. Además, la fracción VIII aborda la promoción y estímulo de la participación comunitaria en la creación de programas de investigación. De acuerdo con la Ley General de Salud Mental del Distrito Federal de 2011, la salud mental se articula en el artículo 2 de la siguiente manera:

“La salud mental, se define como el bienestar psíquico que experimenta de manera consciente una persona como resultado de su buen funcionamiento en los aspectos cognoscitivos, afectivos y conductuales, que le permiten el despliegue óptimo de sus potencialidades individuales para la convivencia, el trabajo y la recreación, de manera que pueda contribuir a su comunidad.”

La misma ley, en su artículo 5º, fracción X, se refiere al fomento de la salud mental,

que son todas aquellas acciones encaminadas a mejorar la salud mental y eliminar la discriminación que sufren las personas con estos padecimientos. Adicionalmente, el artículo 6, fracción V, señala que las personas que utilizan servicios de salud mental tienen derecho a mantener la confidencialidad de su información personal y a permanecer anónimas como participantes de un estudio. Además, en la fracción XII del mismo artículo, se especifica que los usuarios de servicios de salud mental tienen derecho a otorgar o denegar su consentimiento informado.

De acuerdo con el artículo 8 de la ley antes mencionada, en su fracción X se señala que es una de las responsabilidades del Ministerio de Salud establecer estrategias coordinadas con los prestadores de servicios de salud mental de los sectores público, social y privado, con el fin de fomentar acuerdos y acciones de colaboración para la prevención, diagnóstico oportuno, tratamiento y rehabilitación. En su artículo 10 se aborda la prevención e identificación temprana de los trastornos mentales, dirigida a la población en general. Para lograr este objetivo, los prestadores de servicios de salud mental están obligados, como se señala en la fracción III, a promover y difundir información a través de diversos medios de comunicación sobre la importancia de la detección temprana de los trastornos mentales y las opciones de atención disponibles en los sectores público, social y privado.

En el Capítulo II, Artículo 13, Fracción IV de la Ley de Salud Mental del Distrito Federal, se establece el mandato de promover en la sociedad el conocimiento de los trastornos mentales y las diversas soluciones disponibles para atenderlos. En el Capítulo V, Artículo 39, se señala que una de las funciones del Sistema de Información, Vigilancia y Evaluación en Salud Mental, como se señala en la Fracción I, es crear e implementar métodos científicos para recabar información y realizar investigaciones sobre los trastornos mentales en el Distrito Federal y la Zona Metropolitana del Valle de México. Adicionalmente, la Fracción V especifica que otra de sus responsabilidades incluye la elaboración y difusión de encuestas, estudios, investigaciones, informes y otros trabajos relacionados con la salud mental.

El trabajo de investigación realizado estuvo, desde su concepción, profundamente inspirado en todas las acciones que las anteriores leyes y reglamentos pretenden regular con relación a la salud de la dimensión mental de los seres humanos. El resultado se obtuvo debido a la colaboración entre el sector académico, las instituciones de salud y la disposición de los habitantes de las comunidades estudiadas para participar en el estudio.

Los documentos legales analizados destacan la importancia de prevenir, diagnosticar y tratar oportunamente los trastornos cerebrales. Esta investigación se centra

en la conexión entre las personas y su entorno, en particular en cómo un ecosistema dañado por la contaminación afecta innegablemente a sus habitantes. Los conocimientos obtenidos de este estudio, junto con otros en el mismo ámbito, serán fundamentales para revisar las leyes actuales y crear nuevas regulaciones destinadas a mejorar la calidad de nuestro medio ambiente, lo que a su vez mejorará nuestra salud.

Recursos Materiales y financiamiento

La presente investigación se llevó a cabo con recursos materiales y financieros propios del investigador y del CONACyT. Este estudio no contó con otras fuentes de financiamiento externas.

CONSIDERACIONES ÉTICAS

La investigación para la salud es un factor determinante para mejorar las acciones encaminadas a proteger, promover y restaurar la salud del individuo y de la sociedad en general; para desarrollar innovación mexicana en los servicios de salud e incrementar su productividad, conforme a las bases establecidas en la Ley General de Salud en materia de investigación para la salud.

La investigación para la salud comprende el desarrollo de acciones que contribuyan: I. Al conocimiento de los procesos biológicos y psicológicos en los seres humanos; II. Al conocimiento de los vínculos entre las causas de enfermedad, la práctica médica y la estructura social; III. A la prevención y control de los problemas de salud; IV. Al conocimiento y evaluación de los efectos nocivos del ambiente en la salud; V. Al estudio de las técnicas y métodos que se recomienden o empleen para la prestación de servicios de salud, y VI. A la producción de insumos para la salud.

Esta investigación emplea un diseño no experimental y está categorizada como libre de riesgo según el Artículo 17. Abarca estudios que utilizan técnicas y métodos de investigación documental retrospectiva, así como aquellos que no implican ninguna intervención o alteración deliberada de las variables fisiológicas, psicológicas o sociales de los participantes. Esto incluye métodos como cuestionarios, entrevistas y el examen de historias clínicas, asegurando que no se identifiquen ni se aborden aspectos sensibles de su comportamiento.

De acuerdo con la Ley General de Salud en materia de investigación para la salud, específicamente en el Título Segundo, Capítulo I, Artículo 17, Fracción II, este estudio se clasifica como de riesgo mínimo. Se utilizará una evaluación neuropsicológica denominada Batería Neuropsicológica de Funciones Ejecutivas y Lóbulos Frontales (BANFE-2). Esta evaluación incluye diversas tareas como pruebas numéricas, láminas de dibujo y figuras, laberintos, evaluaciones de memoria visual y auditiva y juegos de cartas para evaluar al participante y determinar si existen signos de deterioro en las funciones ejecutivas.

Antes de iniciar la investigación, el protocolo fue evaluado y aprobado por el comité de ética de investigación del Instituto de Ciencias de la Salud de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Se preservó la confidencialidad de los sujetos involucrados y la información personal fue accesible únicamente al investigador principal del estudio y al comité evaluador de tesis. La identidad de los sujetos fue revelada únicamente con su consentimiento y con el propósito de brindar la atención médica necesaria.

REFERENCIAS

- Abarca, J., Chino, B., Llacho, ML, Gonzáles, K., Mucho, K., Vázquez, R., Cárdenas, C., Soto, M. (2008). Relación entre educación, envejecimiento y deterioro cognitivo en una muestra de adultos mayores de Arequipa. *Revista Chilena de Neuropsicología*, 3 (1), 7-14.
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América (2025). Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medio ambiente. <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
- Aponte, M., & Torres, P. (2008). Función ejecutiva y cociente intelectual en pacientes con diagnóstico de esquizofrenia. *Acta colombiana de psicología*, 11(1), 127-134
- Araujo-Pulido, G. T. (2010). Contaminación ambiental y sus efectos sobre la salud. *Viva Salud*, 2(6), 1–5. https://www.insp.mx/images/stories/INSP/Docs/cts/101208_cs1.pdf
- Ardila, A. (2008). On the evolutionary origins of executive functions. *Brain and Cognition*, 68(1), 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2008.03.003>
- Ardila, A., y Ostrosky-Solís, F. (2008). Desarrollo Histórico de las Funciones Ejecutivas. *Neuropsicología, Neuropsiquiatría y Neurociencias*, 8 (1), 1-21.
- Asamblea Legislativa del Distrito Federal. (2011). Ley de Salud Mental del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal. Última reforma publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal el 18 de diciembre de 2014.
- Bahena-Trujillo, R., Flores, G., & Arias-Montaña, J. A. (2000). Dopamina: síntesis, liberación y receptores en el Sistema Nervioso Central. *Revista biomédica*, 11(1), 39-60.
- Balcarce, E., & Berrios, V. (2009). Manual de procedimientos para determinación de material particulado. <https://www.minsal.cl/portal/url/item/696ceddf66c471fee04001011f01233b.pdf>.
- Banco Mundial (2020). Los avances en las políticas sobre energía sostenible, fundamentales para la recuperación tras la pandemia, más lentos que en el pasado. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2020/12/14/progress-on-sustainable-energy-policies-critical-to-post-pandemic-recovery-slower-than-in-the>

past

- Barkley, R. (2011). Las funciones ejecutivas y la autorregulación como fenotipo ampliado. Fundación Educación Activa-Fundación Mapfre. <https://www.aepap.org/sites/default/files/profesionales-cap-03.pdf>
- Baron Niño, O.F., Castaño Barrantes, D, J & Osorio Jiménez, Y. (2017). Efecto de la contaminación ambiental por Material Particulado PM2,5 en el desarrollo psicomotor en niños menores de 5 años en dos Jardines infantiles en Bogotá en el año 2017. [Protocolo de investigación]. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A. <https://core.ac.uk/download/pdf/326430189.pdf>
- Bausela Herreras, E. (2014). La atención selectiva modula el procesamiento de la información y la memoria implícita [Selective attention modulates information processing and implicit memory]. *Acción Psicológica*, 11(1), 21-34. <http://dx.doi.org/10.5944/ap.1.1.13789>
- Bettcher, B. M., Mungas, D., Patel, N., Eloffson, J., Dutt, S., Wynn, M., Watson, C. L., Stephens, M., Walsh, C. M., & Kramer, J. H. (2016). Neuroanatomical substrates of executive functions: Beyond prefrontal structures. *Neuropsychologia*, 85, 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2016.03.001>
- Block, M. L., Wu, X., Pei, Z., Li, G., Wang, T., Qin, L., Wilson, B., Yang, J., Hong, J. S., & Veronesi, B. (2004). Nanometer size diesel exhaust particles are selectively toxic to dopaminergic neurons: the role of microglia, phagocytosis, and NADPH oxidase. *FASEB journal: official publication of the Federation of American Societies for Experimental Biology*, 18(13), 1618–
- Bouza, E., Vargas, F., Alcázar, B., Álvarez, T., Asensio, A., Cruceta, G., Gracia, D., Guinea, J., Gil, M. A., Linares, C., Muñoz, P., Pastor, P., Pedro-Botet, M. L., Querol, X., Tovar, J., Urrutia, I., Villar, F., & Palomo, E. (2022). Air pollution and health prevention: A document of reflection. *Revista Española de Quimioterapia: Publicación Oficial de La Sociedad Española de Quimioterapia*, 35(4), 307–332. <https://doi.org/10.37201/req/171.2021>
- Calderón Garcidueñas, L., Reed, W., Maronpot, R.R., Henríquez-Roldán, C., Delgado Chavez, R., Calderón Garcidueñas, A., Dragustinovis, I., Franco-Lira, M., Aragón Flores, M., Solt, A.C., Altenburg, M., Torres-Jardón, R., Swenberg, J.A. (2004). Brain Inflammation and Alzheimer's-Like Pathology in Individuals Exposed to Severe Air Pollution. *Toxicologic Pathology*, 32, 650–658. DOI:

10.1080/01926230490520232

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (1984). Ley General de Salud, Diario Oficial de la Federación. Última Reforma DOF 19-02-2021. Recuperado el 25 de marzo 2021.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (1987). Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Investigación para la salud. Diario Oficial de la Federación. Última reforma publicada DOF 02-04-2014

Chen, H., Kwong, J. C., Copes, R., Tu, K., Villeneuve, P. J., Van Donkelaar, A., ... & Burnett, R. T. (2017). Living near major roads and the incidence of dementia, Parkinson's disease, and multiple sclerosis: a population-based cohort study. *The Lancet*, 389(10070), 718-726.

Chen, H., Kwong, J.C., Copes, R., Hystad, P., van Donkelaar, A., Tu, K., Brook, J.R., Goldberg, M.S., Martin, R.V., Murray, B.J., Wilton, A.S., Kopp, A., Burnett, R.T. (2017). Exposure to ambient air pollution and the incidence of dementia: A population-based cohort study. *Environment International*, 108, 271–277. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2017.08.020>

Chen, J., & Hoek, G. (2020). Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: a systematic review and meta-analysis. *Environment international*, 143, 105974. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412020319292>

Cinvestav. (2021). Contaminación ambiental, factor de enfermedades neurodegenerativas. Gobierno de México. <https://conexion.cinvestav.mx/Publicaciones/contaminacion-ambiental-factor-de-enfermedades-neurodegenerativas>

COFEPRIS. (2017). Efectos a la salud por la contaminación del aire ambiente. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/3-efectos-a-la-salud-por-la-contaminacion-del-aire-ambiente>

Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., ... & Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The lancet*, 389(10082), 1907-1918. [https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(17\)30505-6/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(17)30505-6/fulltext)

- Concha-Cisternas, Y., Castro-Piñero, J., Petermann-Rocha, F., Troncoso-Pantoja, C., Díaz, X., Cigarroa, I., Martorell, M., Martínez-Sanguinetti, MA, Nazar, G., Leiva-Ordoñez, AM, & Celis-Morales, C. (2022). Asociación entre nivel educativo y sospecha de deterioro cognitivo en adultos mayores chilenos. *Revista médica de Chile*, 150 (12), 1575–1584. <https://doi.org/10.4067/s0034-98872022001201575>
- Davidson, C.I., Phalen, R.F., y Solomon, P.A. (2005). Airborne Particulate Matter and Human Health: A Review. *Aerosol Science and Technology*, 39 (8), 737-749. <https://doi.org/10.1080/02786820500191348>
- Delgado Mejía ID, Etchepareborda MC. (2013). Trastornos de las funciones ejecutivas. Diagnóstico y tratamiento. *Revista de neurología*, 57(1), 95–103. <https://doi.org/10.33588/RN.57S01.2013236>
- Diamond A. (2013). Executive functions. *Annual review of psychology*, 64, 135–168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Diario Oficial de la Federación. (2019). Acuerdo por el que se hace del conocimiento del público en general los días del 2019, que serán considerados como inhábiles para efectos de los actos y procedimientos administrativos substanciados por la secretaría de medio ambiente y recursos naturales y sus órganos administrativos desconcentrados, Secretaría de Gobernación; Estados Unidos Mexicanos; DOF: 01/02/2019. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5549443&fecha=01/02/2019#gsc.tab=0
- Duncan, J. (1995) Atención, inteligencia y los lóbulos frontales. Gazzaniga, MS, Ed., *The New Cognitive Neurosciences*, MIT Press, Cambridge, 721-733.
- Echavarría, L. M. (2017). Modelos explicativos de las funciones ejecutivas. *Revista de Investigación en Psicología*, 20(1), 237–247. <https://doi.org/10.15381/rinvp.v20i1.13367>
- Environmental Protection Agency. (2018). Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés). <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>
- EPA. (2024). Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medio ambiente. <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>

- Flores, J.C., Ostrosky, F. y Lozano A. (2014). Bateria Neuropsicológica de Funciones Ejecutivas y Lóbulos Frontales-2. México, editorial El Manual Moderno.
- Funahashi, S. (2001). Neuronal mechanisms of executive control by the prefrontal cortex. *Neuroscience research*, 39(2), 147–165. [https://doi.org/10.1016/s0168-0102\(00\)00224-8](https://doi.org/10.1016/s0168-0102(00)00224-8)
- Fuster, J. (2008). *The Prefrontal Cortex* (4th ed.). London. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-373644-4.x0001-1>
- García, B., Márquez L., y Ávila, J. L. (2009). Planeación y desarrollo del proyecto de investigación. En *Manual de métodos de investigación para las ciencias sociales* (págs. 1-46). Manual Moderno.
- Gilbert, S.J., y Burgess, P.W. (2008). Executive function. *Current Biology*, 18, R110-114
- Gobierno del Estado de México (2024). Contaminación del Medio Ambiente. https://edomex.gob.mx/medio_ambiente_2021#:~:text=Se%20entiende%20por%20contaminaci%C3%B3n%20ambiental,concentraciones%20y%20en%20diferentes%20lugares
- Gutiérrez, A. L., & Ostrosky, F. (2011). Desarrollo de las Funciones Ejecutivas y de la Corteza Prefrontal. *Revista Neuropsicología, Neuropsiquiatría y Neurociencias*, 11(1), 158-172. <http://revistaneurociencias.com/index.php/RNNN/article/view/282/230>
- Hackman, D. A., & Farah, M. J. (2009). Socioeconomic status and the developing brain. *Trends in cognitive sciences*, 13(2), 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.11.003>
- Harris, M. H., Gold, D. R., Rifas-Shiman, S. L., Melly, S. J., Zanoletti, A., Coull, B. A., ... & Oken, E. (2015). Prenatal and childhood traffic-related pollution exposure and childhood cognition in the project viva cohort (Massachusetts, USA). *Environmental health perspectives*, 123(10), 1072-1078.
- Hernán Diario, E.L. (2015). Aunar esfuerzos técnicos, económicos y financieros para operar el modelo de simulación de calidad del aire, para fortalecer las funciones de autoridad ambiental y de movilidad. [Plan Operacional para Enfrentar Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica]. Universidad Pontificia Bolivariana. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Estudios-calidad-del-aire/Protocolo-plan-operacional-dic-2015.pdf>

- Hu, J., Yu, L., Yang, Z., Qiu, J., Li, J., Shen, P., Lin, H., Shui, L., Tang, M., Jin, M., Chen, K., & Wang, J. (2023). Long-Term Exposure to PM_{2.5} and Mortality: A Cohort Study in China. *Toxics*, 11(9), 727. <https://doi.org/10.3390/toxics11090727>
- Hu, K., & He, Q. (2023). Rural-Urban Disparities in Multimorbidity Associated with Climate Change and Air Pollution: A Longitudinal Analysis Among Chinese Adults Aged 45. *Innovation in Aging*, 7(6), igad060. <https://doi.org/10.1093/geroni/igad060>
- Huizar-Ríos, J.A., López-Castillo, J.C., Pérez-Álvarez, M., Mejía-Cañas, C.E., García-Hernández, R.I. y Orozco Moranchel, D. (2016). La Contaminación en el Medio Ambiente, Primordial Amenaza Para el Desarrollo Humano (Versión 1). Instituto de Estudios Legislativos. <http://www.inesle.gob.mx/Investigaciones/2016/30-16%20Contaminacion%20del%20Medio%20Ambiente.pdf>
- INEGI. (2014). Las Zonas metropolitanas en México. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ce/2014/doc/minimonografias/m_zmm_ce2014.pdf
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2018). Informe Nacional de Calidad del Aire 2017, México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Pag 157. <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2017.pdf>
- Katsouyanni, K., Touloumi, G., Samoli, E., Gryparis, A., Le Tertre, A., Monopolis, Y., Rossi, G., Zmirou, D., Ballester, F., Boumghar, A., Anderson, H. R., Wojtyniak, B., Paldy, A., Braunstein, R., Pekkanen, J., Schindler, C., & Schwartz, J. (2001). Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: results from 29 European cities within the APHEA2 project. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 12(5), 521–531. <https://doi.org/10.1097/00001648-200109000-00011>
- Kioumourtzoglou, M. A., Schwartz, J. D., Weiskopf, M. G., Melly, S. J., Wang, Y., Dominici, F., & Zanobetti, A. (2016). Long-term PM_{2.5} exposure and neurological hospital admissions in the northeastern United States. *Environmental health perspectives*, 124(1), 23-29.
- Lázaro, J. C. F., & Solís, F. O. (2008). Neuropsicología de lóbulos frontales, funciones ejecutivas y conducta humana. *Revista neuropsicología, neuropsiquiatría y neurociencias*, 8(1), 47-58. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3987468>
- Lezak, M. D. (1982). The problem of assessing executive functions. *International journal of*

Psychology, 17(1-4), 281-297.

Lin, C. C., Yang, S. K., Lin, K. C., Ho, W. C., Hsieh, W. S., Shu, B. C., & Chen, P. C. (2014). Multilevel analysis of air pollution and early childhood neurobehavioral development. *International journal of environmental research and public health*, 11(7), 6827-6841; doi:10.3390/ijerph110706827

Liu, C., Chen, R., Sera, F., Vicedo-Cabrera, A. M., Guo, Y., Tong, S., ... & Kan, H. (2019). Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities. *New England Journal of Medicine*, 381(8), 705-715.

Lozano, A. y Ostrosky F. (2011). Desarrollo de las funciones ejecutivas y la corteza prefrontal. *Revista Neuropsicología, Neuropsiquiatría y Neurociencias*, 11(1), 159–172. (<http://revistaneurociencias.com/index.php/RNNN/article/view/282/230>)

Lucendo, M. C. (2021). LIBRO Funciones_Ejecutivas y Lóbulo Frontal.pdf (S. Z. D. Luis Alberto Tuaza Castro (ed). UNACH. <https://doi.org/10.37135/u.editorial.05.45>

Maguey H. (2019). En México, 21 mil muertes al año asociadas con la mala calidad del aire. *Gaceta Digital UNAM*. https://repositorios.fca.unam.mx/fca_noticias/docs/2019/20190514_particulas.pdf

Miller, E. K. (1999). The prefrontal cortex: complex neural properties for complex behavior. *Neuron*, 22(1), 15-17.

Miller, E.K., y Cohen, J.D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annu. Rev. Neurosci.*, 24, 167–202. 0147-006X/01/0301-0167

Miyake, A., et al., (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex (frontal lobe" tasks: A latent variable analysis. *Rev Cognitive Psychology*, 41, 49-100.

Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "Frontal Lobe" tasks: a latent variable analysis. *Cognitive psychology*, 41(1), 49–100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>

Mora Rodríguez, A. (2020). Contaminación Atmosférica y su Relación con Enfermedades del Cerebro [Tesis de grado]. Universidad Cooperativa de Colombia. <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/9382819b-5140-4cba-8504-7d584c320f54/content>

National Geographic. (2022). ¿Cuáles son los principales tipos de contaminación

- ambiental? <https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2022/08/cuales-son-los-principales-tipos-de-contaminacion-ambiental>
- OMS. (2021). Guías Globales de calidad del aire. https://www.cooperacionsuiza.pe/wp-content/uploads/2021/11/Castillo_AQG_Spanish.pdf
- OMS. (2016). Calidad del aire Organización Mundial de la Salud. <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>
- OMS. (2014). 7 millones de muertes cada año debidas a la contaminación atmosférica. <https://www.who.int/es/news/item/25-03-2014-7-million-premature-deaths-annually-linked-to-air-pollution>
- OMS. (2018). Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado. <https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>
- OMS. (2021). Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: partículas en suspensión (PM2.5 y PM10), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono. Resumen. World Health Organization.
- OMS. (2023). Contaminación atmosférica. <https://www.who.int/es/health-topics/air-pollution>
- OPS. (2018). Contaminación del aire ambiental exterior y en la vivienda: Preguntas frecuentes. Organización Panamericana de la Salud <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire-salud/contaminacion-aire-ambiental-exterior-vivienda-preguntas-frecuentes>
- Ordóñez-Iriarte, J. M. (2020). Salud mental y salud ambiental. Una visión prospectiva. Informe SESPAS 2020. Gaceta sanitaria, 34, 68-75. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7367770/pdf/main.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Capítulo 47. Mapeo mundial. (2018). <https://www.fao.org/3/y1997s/y1997s1j.htm>
- Perera, F. P., Wang, S., Rauh, V., Zhou, H., Stigter, L., Camann, D., ... & Majewska, R. (2013). Prenatal exposure to air pollution, maternal psychological distress, and child behavior. *Pediatrics*, 132(5), e1284-e1294. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3813389/pdf/peds.2012-3844.pdf>
- Pope III, C. A. (2004). Air pollution and health—good news and bad. *New England journal of medicine*, 351(11), 1132-1134.

<https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJMe048182>

Pope, C. A., 3rd, Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., & Thurston, G. D. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*, 287(9), 1132–1141. <https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>

Restrepo, F. L. (2008). Funciones ejecutivas: aspectos clínicos. *Revista Neuropsicología, Neuropsiquiatría y Neurociencias*, 8(1), 59-76. <http://revistaneurociencias.com/index.php/RNNN/article/view/222/176>

Rice, D., & Barone Jr, S. (2000). Critical periods of vulnerability for the developing nervous system: evidence from humans and animal models. *Environmental health perspectives*, 108(suppl 3), 511-533. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1637807/pdf/envhper00312-0143.pdf>

Riojas Rodríguez, H., Hurtado Díaz M., Texcalac Sangrador JL., Halbinger A.S, Cortez Lugo M., Rothenberg S.J, Cruz JC, Arellano F, Rangel Moreno KF, Luz A. de la Sierra, Luna Escobar L.A, Martínez Avilés J & Barrera Flores, M. (2021). Contaminación del aire en zonas urbanas y salud. https://insp.mx/assets/documents/webinars/2021/CISP_Contaminacion%20del%20aire.pdf

RISE. (2022). Regulatory Indicators for Sustainable Energy. <https://rise.esmap.org/>

Samet, J. M., Dominici, F., Currier, I. C., Coursac, I., & Zeger, S. L. (2000). Fine particulate air pollution and mortality in 20 U.S. cities, 1987-1994. *The New England journal of medicine*, 343(24), 1742–1749. <https://doi.org/10.1056/NEJM200012143432401>

Santos, N. V. D., Yariwake, V. Y., Marques, K. D. V., Veras, M. M., & Fajersztajn, L. (2021). Air Pollution: A Neglected Risk Factor for Dementia in Latin America and the Caribbean. *Frontiers in Neurology*, 12, 684524.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2019). NOM-172-SEMARNAT-2019: Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud. DOF - Diario Oficial de la Federación. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5579387&fecha=20/11/2019

SEDEMA. (2023). Presenta SEDEMA Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana

del Valle de México 2020. Secretaría del Medio Ambiente.
<https://www.sedema.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/presenta-sedema-inventario-de-emisiones-de-la-zona-metropolitana-del-valle-de-mexico-2020>

SEMARNAT. (2016). Programa de Gestión para mejorar la Calidad del Aire del Estado de Hidalgo https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/768951/ProAire_Hidalgo-2016-2024.pdf

SEMARNAT. (2017). Informe del Medio Ambiente. Dirección General de Estadística e Información Ambiental.
<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap5.html>

SEMARNAT. (2021). Partículas suspendidas PM10 y PM2.5 dañan salud y medio ambiente. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/particulas-suspendidas-pm10-y-pm2-5-danan-salud-y-medio-ambiente?idiom=es>

Shehab, M. A., y Pope, F. D. (2019). Effects of short-term exposure to particulate matter air pollution on cognitive performance. *Scientific Reports*, 9 (8237), 1-10.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-44561-0>

Snell, R. S. (2014). Neuroanatomía Clínica. Wolters Kluwer Health España, S. A. Lippincott Williams & Wilkins (7 ed.). Wolters Kluwer.
https://www.academia.edu/43658636/Neuroanatomia_Clinica_Snell_7a_Edicion_booksmedicos?email_work_card=view-paper

SNIARN. (2016). Atmósfera. Cumplimiento de la normatividad de calidad del aire en zonas metropolitanas o poblaciones en México.
<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap5.html>

Stuss, D.T., y Levine, B. (2002). Adult clinical neuropsychology: Lessons from studies of the frontal lobes. *Annual Review of Psychology*, 53, 401-433

Sunyer, J., Esnaola, M., Alvarez-Pedrerol, M., Fors, J., Rivas, I., López-Vicente, M., ... & Querol, X. (2015). Association between traffic-related air pollution in schools and cognitive development in primary school children: a prospective cohort study. *PLoS medicine*, 12(3), e1001792.

Tirapu Ustárroz, J., Muñoz Céspedes, J. M., Pelegrín Valero, C., & Albeniz Ferreras, Á. (2005). Propuesta de un protocolo para la evaluación de las funciones ejecutivas. *Revista de neurología*, 41(03), 177. <https://doi.org/10.33588/rn.4103.2005054>

Tirapu-Ustarroz, J., & Muñoz-Céspedes, J. M. (2005). Memoria y funciones ejecutivas.

- Revista de neurología, 41(8), 475-484.
https://www.uma.es/media/files/Memoria_y_funciones_ejecutivas.pdf
- UNAM. (2017). Ambiente. Portal Académico del CCH.
<https://e1.portalacademico.cch.unam.mx/alumno/biologia2/unidad2/ambienteDimension/ambiente>]
- UNICEF Ecuador. (2020). El aire que respiramos: Los efectos de la contaminación del aire y del cambio climático en la salud de la niñez en el Ecuador. Quito: UNICEF Ecuador.
- Valavanidis, A., Fiotakis, K., & Vlachogianni, T. (2008). Airborne particulate matter and human health: toxicological assessment and importance of size and composition of particles for oxidative damage and carcinogenic mechanisms. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 26(4), 339-362.
- Valencia Ortiz, A. I., Padilla López, A., & González Osornio, G. (2022). Efecto del Modelo de Educación por Experiencia en las funciones ejecutivas de niños y niñas adolescentes. *Electronic Journal of Research in Educational Psychology*, 20(57).
- Verdejo-García, A., & Bechara, A. (2010). Neuropsicología de las funciones ejecutivas. *Psicothema*, 227-235. <https://www.redalyc.org/pdf/727/72712496009.pdf>
- World Health Organization. (2024). Contaminación del aire. <https://www.who.int/data/gho/data/themes/theme-details/GHO/air-pollution>
- World Health Organization. (2018). First Global Conference on Air Pollution and Health. <https://www.who.int/news-room/events/detail/2018/10/30/default-calendar/air-pollution-conference>
- World Health Organization. (2023). Air pollution. <https://www.who.int/health-topics/air-pollution>
- Wilker, E. H., Preis, S. R., Beiser, A. S., Wolf, P. A., Au, R., Kloog, I., Li, W., Schwartz, J., Koutrakis, P., DeCarli, C., Seshadri, S., & Mittleman, M. A. (2015). Long-term exposure to fine particulate matter, residential proximity to major roads and measures of brain structure. *Stroke*, 46(5), 1161–1166. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.114.008348>
- Yun-Chun W., Yuan-Chien L., Hwa-Lung Y., Jen-Hau C., Ta-Fu C., Yu Sun, L. W., Ping-Keung, Y., Yi-Min, C., Yen-Ching, C. (2015). Association between air pollutants and dementia risk in the elderly. *Alzheimer's & Dementia: Diagnosis, Assessment &*

Disease Monitoring,1, 220-228. file:///C:/Users/User/Downloads/1-s2.0-S2352872915000457-main.pdf

Zhong, T., Li, S., Liu, P., Wang, Y., & Chen, L. (2024). The impact of education and occupation on cognitive impairment: a cross-sectional study in China. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 16, 1435626. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2024.1435626>

14. ANEXO. Consentimiento Informado



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
 Instituto de Ciencias de la Salud
 Área Académica de Medicina
 Maestría en Salud Pública



A SOCIALIZACIÓN ENTRE LAS FUNCIONES EJECUTIVAS Y EXPOSICIÓN CRÓNICA A MATERIAL PARTICULADO EN HABITANTES DE HIDALGO

Introducción/Objetivo:

El objetivo del estudio es determinar la relación entre las funciones ejecutivas con el antecedente de exposición crónica a material ~~particulado~~ en habitantes de Hidalgo. El estudio se está realizando en los municipios de Tula de Allende y Mineral del Monte, Hidalgo.

Procedimientos:

Si Usted acepta participar en el estudio, ocurrirá lo siguiente:

Señalé evaluado con la BATERIA NEUROPSICOLÓGICA EVALUACIÓN DE LAS FUNCIONES EJECUTIVAS Y LÓBULOS FRONTALES (SANFE-2), que agrupa varias pruebas para examinar las funciones de la parte frontal del cerebro y que además es altamente confiable.

La evaluación tendrá una duración aproximada de 1 hora. Es importante que usted esté informado que será aplicada por una persona capacitada para ello y toda la información proporcionada para el estudio será de carácter estrictamente confidencial, será utilizada únicamente por el equipo de investigación del proyecto y no estará disponible para ningún otro propósito. Usted quedará identificado(a) con un número y no con su nombre. Los resultados de este estudio serán publicados con fines científicos, pero se presentarán de tal manera que usted no podrá ser identificado(a).

Beneficios: Usted obtendrá al participar en esta evaluación se el de conocer su desempeño en tareas que evalúan la parte frontal de su cerebro, se le realizará una evaluación que de forma privada tiene un costo aproximado de 5,000 pesos mexicanos, sin embargo si usted decide participar en el estudio esta valoración no tendrá ningún costo para usted. La inversión será asumida por el equipo de investigación. Además, de manera indirecta usted tendrá la posibilidad de contribuir valiosamente con el avance científico, ya que al realizarse investigaciones como esta en la que podemos conocer cada vez mejor el impacto en la salud que tiene el medio ambiente en el que nos desarrollamos, podemos adoptar medidas a nivel personal, familiar, comunitario o incluso generar políticas de salud que eleven nuestro nivel de salud.

Compromisos por parte del investigador: En el caso de obtener como resultado una alteración que tenga implicaciones para la salud, el investigador lo contactará a usted para proporcionarle información sobre un plan de acción para la atención de dicha alteración.

Compromisos por parte del participante del estudio: Al aceptar participar en este estudio, usted se compromete a completar los pruebas que incluye la batería.

Participación Voluntaria/Retiro: La participación en este estudio es absolutamente voluntaria. Usted está en plena libertad de regresar a participar o de retirar su participación del mismo en cualquier momento.

De acuerdo con la Ley General de Salud en materia de investigación para la salud, Título Segundo, Capítulo I, Artículo 17, Fracción II, la presente se considera una investigación con riesgo mínimo.¹

Número a Contactar: Si usted tiene alguna pregunta, comentario o preocupación con respecto al proyecto, por favor comuníquese con el/la investigador/a responsable del proyecto, _____ al siguiente número de teléfono (???)...-... en un horario de 8 am a 8 pm.

Si usted acepta participar en el estudio, le entregaremos una copia de este documento que le pedimos sea llenar amablemente de firmar.

Nombre y firma del participante	Nombre y firma del testigo	Nombre y firma del investigador

Fecha:

¹ Este documento se basa en los principios establecidos en la Constitución de Hidalgo, en la Ley General de Salud en materia de investigación para la salud y en la Ley General de Salud Mental del Estado de Hidalgo 2011 y con el código ético del psicólogo.