

RED CIUDADANA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE DE LA ZONA METROPOLITANA DEL SUR DE TAMAULIPAS

Citizen network for air quality monitoring in the southern metropolitan area of Tamaulipas

ERIKA ALARCÓN RUIZ¹, FELIPE CABALLERO BRIONES²,
MARCO ANTONIO MERINO TREVIÑO³, FRANCISCO LÓPEZ HUERTA⁴
Y DAVID ALBERTO RIVAS CAMARGO⁵

Recibido: 1 de agosto 2023 • Aceptado: 18 de diciembre 2023

Cómo citar: Alarcón Ruiz, E.; Caballero Briones, F.; Merino Treviño, M. A.; López Huerta, F., Rivas Camargo, D. A. (2023). Red ciudadana de monitoreo de la calidad del aire de la zona metropolitana del sur de Tamaulipas. *Ciencia, Ambiente y Clima*, 6(2), 133-155. <https://doi.org/10.22206/cac.2023.v6i2.2915>

Resumen

La Zona Metropolitana del Sur de Tamaulipas tiene características particulares para el estudio de la contaminación atmosférica: en su extremo sureste está instalada una refinería; al norte se encuentran un corredor industrial petroquímico, una termoeléctrica y el puerto industrial de Altamira; al oeste se encuentra una empresa minera y un amplio sistema lagunario; y al este,

¹ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Cuerpo Académico Prospectiva Ambiental, México. ORCID: 0000-0003-1375-3442

Correo-e: erika.ar@cdmadero.tecnm.mx

² Instituto Politécnico Nacional, Materiales y Tecnologías para Energía, Salud y Medio Ambiente (GESMAT), CICATA Altamira, México. ORCID: 0000-0003-4340-1050

Correo-e: fcaballero@ipn.mx

³ Instituto Politécnico Nacional, Materiales y Tecnologías para Energía, Salud y Medio Ambiente (GESMAT), CICATA Altamira, México. ORCID: 0000-0001-8901-5054

Correo-e: mmerino@ipn.mx

⁴ Universidad Veracruzana, México. ORCID: 0000-0003-3332-846X

Correo-e: frlopez@uv.mx

⁵ Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), México. ORCID: 0000-0002-7855-4797

Correo-e: drivas@cicese.mx



el Golfo de México. Ante la falta de una red de monitoreo de la calidad del aire, en este trabajo se presenta la Red Ciudadana de Monitoreo de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana Altamira-Tampico-Cd. Madero que tiene instaladas estaciones meteorológicas en varias ubicaciones de la ciudad generando datos de viento, precipitación, temperatura y humedad, que permitirán generar un patrón local de vientos para la simulación de la dispersión de la contaminación. Los datos están siendo recopilados en una base de datos y están accesibles al público a través de la página web de la Red. La página permite la interacción con la ciudadanía para incluir sus estaciones meteorológicas, subir fotografías georreferenciadas de fuentes de emisión, compartir rutas para la estimación de emisiones, participar en encuestas de percepción de calidad del aire y estar informados sobre los resultados del análisis de datos.

Palabras clave: calidad del aire; monitoreo; ciudadanía; gestión ambiental.

Abstract

The Metropolitan Area of Southern Tamaulipas has characteristics for the study of air pollution: at its Southeastern end there is a refinery; at the Northern side there is a petrochemical industrial corridor, a thermoelectric plant and the industrial port of Altamira; at the Western side there is a mining company and a large lagoon system; and at the Eastern side, the Gulf of Mexico. In the absence of an air quality monitoring network, this paper presents the Citizen Air Quality Monitoring Network in the Altamira-Tampico-Cd. Madero Metropolitan Area which has installed meteorological stations in several locations in the city generating wind, precipitation, temperature, and humidity data, which will generate a local wind pattern for the simulation of the dispersion of pollution. The data are being compiled into a database and are accessible to the public through the Network's website. The page allows interaction with citizens to include their weather stations, upload georeferenced photographs of emission sources, share routes for emissions estimation, participate in air quality perception surveys and be informed about the results of data analysis.

Keywords: Air Quality; Monitoring; Citizenship; Environmental Management.

Introducción

Más del 90% de la población mundial respira niveles de contaminación mayores a los considerados seguros (Schmitz, 2018) por lo que, en 2021, la Organización Mundial de la Salud (OMS) actualizó los umbrales de contaminación del aire publicando las nuevas Guías de Calidad del Aire (GCA), con valores más restrictivos que los de 2005 (Hossain, 2015). Diversos estudios señalan que la contaminación del aire exterior es dañina para el ser humano y que la materia particulada presente en el aire contaminado está estrechamente relacionada con la creciente incidencia del cáncer, en especial el cáncer de pulmón. También se ha observado una relación entre la contaminación del aire exterior y el aumento del cáncer de vías urinarias y vejiga (Cori, 2020). Por otro lado, existen estudios que coinciden al señalar que hay una correlación entre la contaminación del aire y las muertes por COVID-19 señalando que la exposición de largo plazo al aire contaminado incrementa la vulnerabilidad de las personas y las hace más propensas a sufrir las peores consecuencias de la COVID-19 (PMOT Altamira, 2010). El monitoreo de la calidad del aire (MCA) implica la caracterización y medición continua de la contaminación relacionada con la presencia de una mezcla de partículas sólidas y gases en el aire. Se conocen como contaminantes criterio a aquellos a los que en las normas se les ha establecido un límite máximo permisible de concentración en el aire ambiente (WHO, 2021), con la finalidad de proteger la salud humana y asegurar el bienestar de la población. Los compuestos criterio comprenden el dióxido de azufre (SO_2), el dióxido de nitrógeno (NO_2), el monóxido de carbono (CO), el ozono (O_3) y la materia particulada con diámetros de 10 (PM10) y 2.5 micrómetros (PM2.5). La generación de estos contaminantes proviene de varias fuentes emisoras, que van desde chimeneas en procesos de combustión, vehículos de transporte, y demás actividades cotidianas. Las fuentes de emisión más comunes para cada contaminante se denotan en la Tabla 1:

Zona de Estudio

En Tamaulipas, existen actualmente cuatro zonas metropolitanas según el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI): la Zona Metropolitana Tampico, al Sur del Estado; la de Reynosa-Río

Tabla 1
Fuentes de emisión

Contaminante	Fuente
PM 10 PM2.5	Suspensión de polvos, tierra, minería, agricultura, vehículos de gasolina y/ diesel, combustión en procesos industriales y generación de energía.
O ₃	Se forma en la atmósfera por reacciones entre óxidos de nitrógeno (NOx) y compuestos orgánicos volátiles (VOC) en presencia de calor o luz solar.
NO ₂	Combustión a altas temperaturas (empresas de producción eléctrica, calderas industriales y vehículos)
Pb	Vehículos de combustión interna, fuentes industriales, talleres de pintura.
CO	Producto de la combustión incompleta de gas natural, carbón y madera. También el tráfico vehicular representa una fuente importante de CO.
SO ₂	Generado principalmente por la quema de combustibles con alto contenido de azufre.

Bravo; la de Matamoros, y la de Nuevo Laredo. En la Figura 1 se presenta el Estado de Tamaulipas ubicado en México y las cuatro zonas metropolitanas mencionadas.

Es importante hacer notar que las cuatro zonas se extienden fuera del Estado de Tamaulipas: las zonas metropolitanas de Nuevo Laredo, Reynosa y Matamoros abarcan las ciudades de Laredo, McAllen y Brownsville respectivamente, del lado norteamericano del Rio Bravo, mientras que la de Tampico-Madero-Altamira se extiende a los municipios de Pueblo Viejo y Pánuco en el vecino estado de Veracruz. La zona sur de Tamaulipas es un área compuesta por 3 núcleos urbanos principales: Tampico, Ciudad Madero y Altamira, así como de asentamientos rurales dispersos; y cuyo territorio en conjunto tiene diversos usos y funciones: urbanos, portuarios, comerciales, residenciales, turísticos y rurales como se puede observar en la Figura 2.

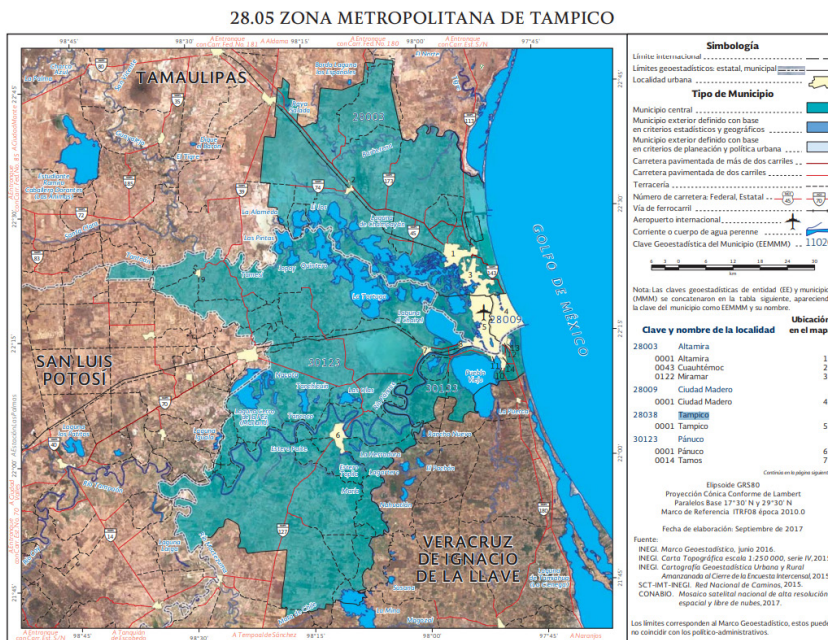
La Zona Metropolitana de Tampico generalmente abarca las ciudades de Tampico, Ciudad Madero y Altamira. Estas tres ciudades están ubicadas en la costa del Golfo de México y forman parte de la zona conurbada conocida como la "Zona Metropolitana de Tampico". Juntas, estas

Figura 1
Zonas Metropolitanas de México



Fuente: Elaboración Propia

Figura 2
Zona Metropolitana Tampico



Fuente: INEGI, Marco Geoestadístico Nacional actualizado a la Encuesta Intercensal 2015

Fuente: INEGI, Marco Geoestadístico Nacional actualizado 2015.

ciudades tienen una relevancia económica significativa debido a su puerto y actividades relacionadas con la industria petrolera. Al igual que otras áreas del Golfo de México, tiene un clima cálido y húmedo. Este tipo de clima se clasifica generalmente como un clima tropical. Las temperaturas tienden a ser elevadas durante todo el año. Los veranos son muy cálidos, con temperaturas diurnas que a menudo superan los 30 °C (86 °F) y, en ocasiones, alcanzan los 40 °C (104 °F). Los inviernos son suaves, con temperaturas diurnas que raramente bajan de los 20 °C (68 °F).

La humedad es alta, especialmente durante la temporada de lluvias. La misma suele ser de mayo a octubre, con una mayor probabilidad de precipitación en los meses de verano. La región experimenta una temporada de lluvias durante los meses de verano, con lluvias frecuentes y fuertes. La precipitación puede variar, pero julio y agosto suelen ser los meses más lluviosos. Dada su ubicación en el Golfo de México, la zona metropolitana de Tampico puede verse afectada por huracanes durante la temporada de huracanes, que generalmente va de junio a noviembre. Es importante señalar que estas son generalizaciones y las condiciones climáticas específicas pueden variar año tras año.

La zona cuenta con dos puertos importantes, el de Tampico sobre el río Pánuco, y el Puerto Industrial de Altamira, sobre el Golfo de México. Gracias a la presencia de estos dos puertos, de los ríos y las lagunas, la zona sur de Tamaulipas destaca por su vasta actividad pesquera y por su gran flota de mediana altura, principalmente camaronera, así como de pesca ribereña y de laguna. Adicionalmente, la Zona Metropolitana Tampico-Madero-Altamira es un polo regional en servicios de salud, educativos, turísticos y comerciales entre otros. Existen tres hospitales regionales y varios privados de primer y segundo nivel; un Campus de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, tres del Tecnológico Nacional de México (uno en Ciudad Madero y dos en Altamira); uno del Instituto Politécnico Nacional en Altamira, y varias universidades privadas; una gran oferta de hoteles y restaurantes, centros comerciales, servicios a la industria y el comercio, talleres artesanales e industriales, lo que junto con el parque vehicular y varios tiraderos de basura clandestinos en toda la zona, crean una gran cantidad de emisores de gases hacia la atmósfera. Por otro lado, dada las características de la región, por su cercanía al mar y sus zonas de laguna, presenta condiciones idóneas para el crecimiento de vegetación tular y haló-

fila que se extiende por todo el sistema lagunario. En la Figura 3 se puede observar una práctica común entre los pescadores de la laguna es la quema de tular en temporada de altas temperaturas para que el pescado salga de esos espacios donde generalmente se refugian; esta práctica, además de generar emisiones no cuantificadas de CO_2 a la atmósfera, ocasiona la caída de cenizas en la zona norte de Tampico y sur de Altamira. Cabe señalar que la porción de la zona metropolitana que se localiza en Tamaulipas presenta un alto riesgo y una contaminación ambiental perceptible, por el tipo de actividades que se llevan a cabo, como la extracción y refinación de petróleo, la industria petroquímica, y por los gasoductos, oleoductos y tuberías de vapor y gases industriales que recorren el subsuelo de la zona; además, por su ubicación en la costa del Golfo está sujeta a riesgos hidrometeorológicos constantes (Padilla, 2020).

Figura 3

Quema de tular en el sistema lagunario Champayán-Chairél que ocasiona la caída de cenizas en la zona norte de Tampico y sur de Altamira



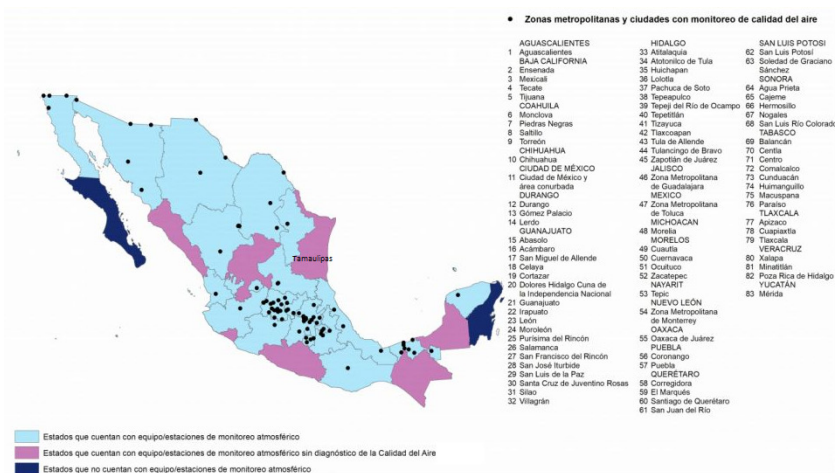
Situación actual del monitoreo de la calidad del aire en México y en la zona de estudio

La evaluación de la calidad del aire en México se lleva a cabo con estaciones de monitoreo distribuidas en diferentes ciudades y puntos del país que permiten evaluar y medir partículas suspendidas en el aire y gases contaminantes. A diciembre del año 2019 el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), tuvo registro de la existencia de 36 sistemas

de monitoreo de la calidad del aire (SMCA): 35 administrados por alguna autoridad gubernamental, ya fuera estatal o municipal y uno administrado por una institución académica (Instituto de Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez). Estos 36 SMCA estuvieron distribuidos en 30 entidades federativas. Quintana Roo y Baja California Sur continúan siendo las únicas entidades que no poseen un SMCA en su territorio. En su conjunto, estos SMCA agruparon un total de 241 estaciones de monitoreo/muestreo. Estas 241 estaciones de monitoreo estuvieron repartidas en un total de 102 ciudades y zonas metropolitanas como se muestra en la Figura 4. En el caso de Tamaulipas, el INECC reconoce la existencia de 8 estaciones de monitoreo que conforman el SMCA de Tamaulipas ubicados en los municipios de Altamira, Ciudad Madero, El Mante, Matamoros, Nuevo Laredo, Reynosa, Tampico y Victoria.

Figura 4

Ciudades y zonas metropolitanas con monitoreo de calidad del aire en México (2019)



Sin embargo, en el Informe Nacional de la Calidad del Aire México 2019 (INECC, 2020) solo incluyen el diagnóstico de la calidad del aire (CA) realizado en 24 SMCA distribuidos en 20 entidades federativas. Dichos SMCA incluyen un total de 185 estaciones de monitoreo/muestreo, distribuidas en 76 ciudades y zonas metropolitanas como se muestra en la Figura 4. De éstas, 140 estaciones de monitoreo contaron con infraestructura para la medición de ozono, 158 para partículas suspendidas PM10, 114 para partículas suspendidas PM2.5, 131 para SO₂, 125 para

NO₂ y 134 para CO. Las ciudades no incluidas, no respondieron la solicitud de información del INECC o entregaron información no válida o en formato no apropiado para su manejo. a pesar de contar con SMCA, dentro de las razones se encuentran que no respondieron la solicitud de información del INECC o entregaron información no válida o en formato no apropiado para su manejo.

Por otro lado, en el informe ProAire Tamaulipas 2018-2027 se hace referencia a la Red Estatal de Monitoreo Atmosférico del estado de Tamaulipas que inició operaciones en 1993. La red cuenta con equipos manuales de Partículas Suspendidas Totales (PST) y Partículas PM10 en los municipios de Matamoros, Nuevo Laredo, Reynosa y Tampico. Es importante señalar que aun estando en funcionamiento las estaciones presentes en la zona de estudio no serían suficientes para conocer la calidad del aire ya que no miden contaminantes como ozono, óxido de nitrógeno, óxido de azufre o monóxido de carbono como se observa en la Tabla 2 (INNEC, 2020). Más aun, al haber solo dos puntos de medición no se puede estudiar la dispersión de los contaminantes sobre la zona urbana, lo que es de primordial importancia para conocer posibles efectos en la salud ciudadana y al ambiente. Por otro lado, la dispersión de los contaminantes en las zonas urbanas es un tema de suma importancia, ya que la medición puntual de los contaminantes típicos es influida por los factores meteorológicos como la velocidad y dirección del viento, la humedad relativa, la temperatura ambiente y la presión atmosférica. Para medir y evaluar el impacto de la contaminación del aire en la población y los recursos naturales, es indispensable contar con sistemas, redes y programas adecuados de medición de la calidad del aire. La información es la principal herramienta para impulsar la participación ciudadana en la protección ambiental, por lo que es importante ponerla al alcance de todos, de tal manera que la información ambiental contribuya a propiciar la acción convergente de los diferentes actores a favor de una mejor calidad del aire.

Red ciudadana de monitoreo de la calidad del aire en la zona metropolitana Altamira-Tampico-Madero (red MoCaALTAMA)

Las Tecnologías de Información y Comunicaciones (TICs) son el elemento clave para articular la comunicación entre la ciudadanía a través de los modelos de Smart Cities o ciudades inteligentes que fomentan el

desarrollo de ciudades que sean más amigables con sus ciudadanos y que sean sostenibles económica, social y medioambientalmente, para lo que es deseable una participación ciudadana activa. Bajo este enfoque se construye la red ciudadana MoCaALTAMA (Figura 5), un sistema de información interactivo que cuenta con equipo de monitoreo de calidad de aire en la zona metropolitana de los municipios de Tampico, Cd. Madero y Altamira y próximamente de estaciones de monitoreo de calidad del aire, que son custodiados por ciudadanos que tienen el interés por conocer la calidad del aire de su entorno y que actúan como nodos de adquisición de datos repartidos por todo el territorio a los que denominamos Smart Citizens o ciudadanos inteligentes.

Figura 5

Portal Web de la Red Ciudadana MoCaALTAMA (www.redmocaaltama.org)



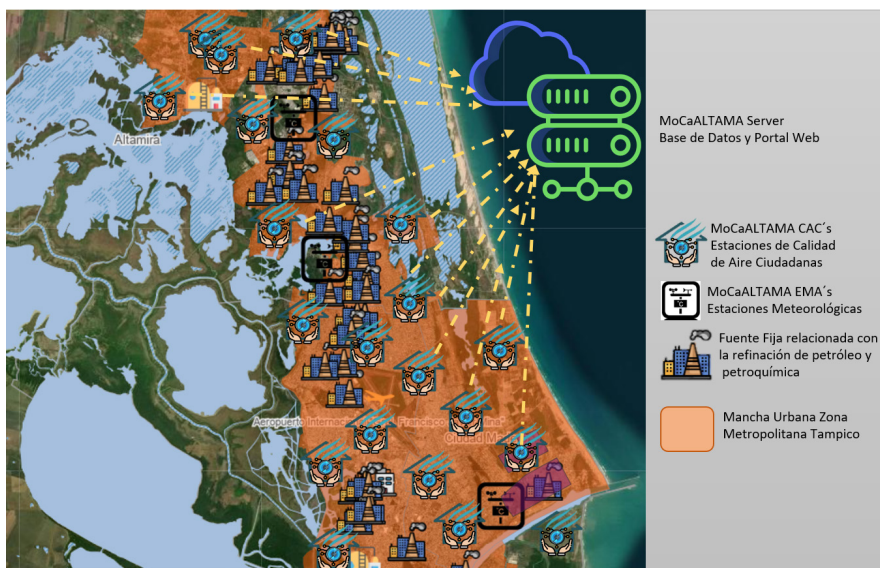
Materiales y métodos

La Red Ciudadana MoCaALTAMA está diseñada bajo la arquitectura cliente-servidor y se basa en los principios de Internet de las Cosas (IoT) ya que incorpora sensores, software y otras tecnologías con el fin de conectarse e intercambiar datos con otros dispositivos y sistemas a través de Internet y de permitir la interacción con la ciudadanía. En cuanto al desarrollo del backend del sitio web se ha desarrollado siguiendo la metodología de programación extrema (XP) principalmente, dada la naturaleza del proyecto. En el diseño del sistema web se consideró que fuera capaz de adaptarse a cualquier dispositivo dando la facilidad a

los usuarios de poder visualizarlo desde sus dispositivos móviles. En la Figura 6 se pueden observar los elementos principales, que en la sección de resultados se abordan con mayor detalle.

Figura 6

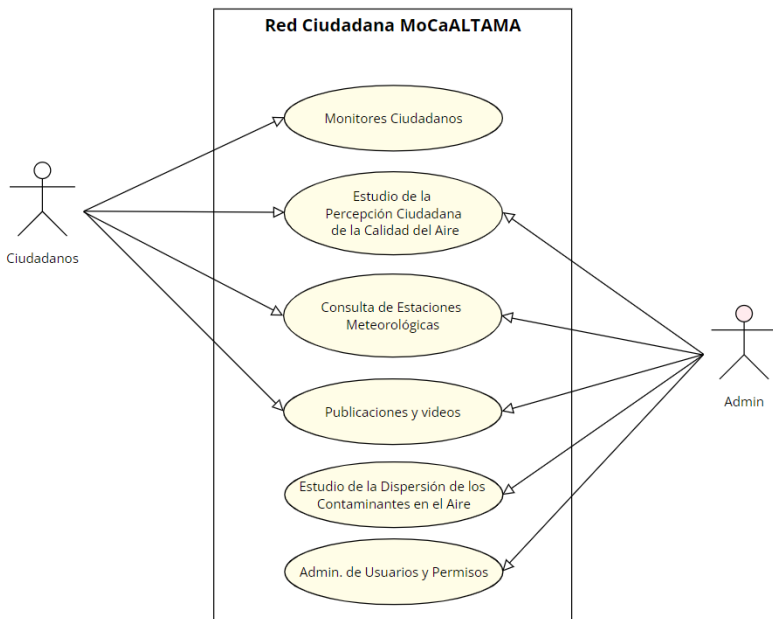
Arquitectura de la Red Ciudadana MoCaALTAMA (www.redmo-caaltama.org)



Para lograr una comunicación efectiva con los actores del sistema se implementó la metodología de investigación-acción participativa (IAP), que permite enfrentar el desafío de involucrar a la comunidad científica en la traducción del conocimiento de los ciudadanos a través de un proceso considerado de reflexión, diálogo y acción con otros (Wimpenny, 2016) y que permite a las comunidades la oportunidad de comprender más acerca de los problemas que la intervención temprana busca abordar. La IAP fomenta la participación de la comunidad y aumenta la probabilidad de que el enfoque de la investigación se adapte mejor a las circunstancias locales y genere una verdadera “apropiación” y “participación” de la comunidad. En la Red Ciudadana MocCaALTAMA se tiene como premisa que este sistema es una red de ciudadanos y para los ciudadanos, de tal forma que sólo se identifican a dos tipos de usuarios, *Ciudadano* y *Administrador*. El administrador es el encargado de asignar el rol y permisos para cada ciudadano en función de su grado de participación

como se observa en el diagrama de Casos de Uso en la Figura 7, es decir cualquier ciudadano puede participar activamente en el proyecto desde su área de interés, habilidades y tiempo. Dentro de la ciencia ciudadana (Li, 2020), trabajar de manera colaborativa permite generar conocimiento que tiende a ser más relevante para los contextos locales y en consecuencia permite identificar las acciones locales que es necesario implementar soportadas en los datos que la red genera. La población local participa activamente en todos los aspectos de la toma de decisiones en el proceso de investigación: identificar problemas, formular preguntas de investigación, contribuir al análisis de datos, diseñar soluciones, evaluarlas, difundir los resultados y tomar medidas. La Red Ciudadana MoCaALTAMA es el medio que procesa los datos del entorno a través de las estaciones y sus respectivos sensores generando un conocimiento contextual local que nos permita a través del análisis de datos la situación regional de la contaminación del aire.

Figura 7
Diagrama de Casos de Uso de la Red Ciudadana MoCaALTAMA
(www.redmocaaltama.org)



Resultados y discusión

La Red Ciudadana MoCaALTAMA integra el conocimiento adquirido de la participación ciudadana y los datos obtenidos de los equipos de monitoreo, permitiendo ser a su vez el medio de retroalimentación con la ciudadanía respecto de las mediciones obtenidas y los avances de las diferentes etapas del proyecto que a continuación se describen en la Figura 8.

Figura 8

Etapas de implementación de la Red Ciudadana MoCaALTAMA
(www.redmocaaltama.org)

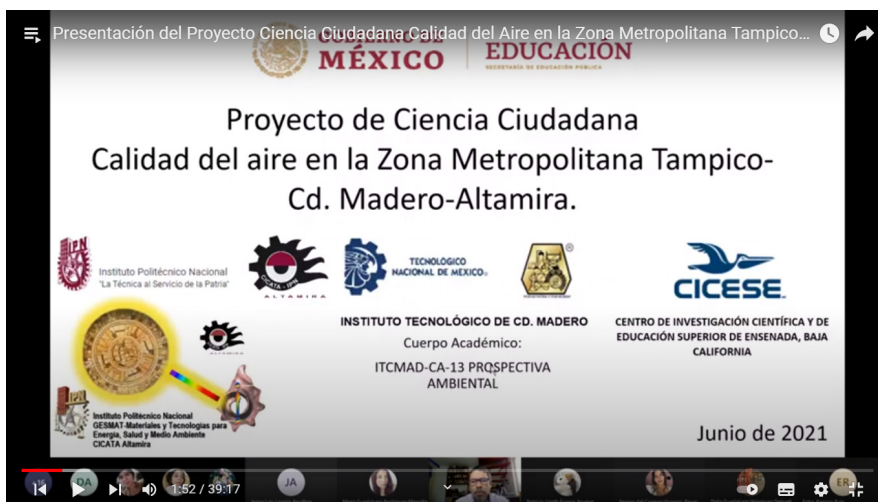


La Red MoCaALTAMA estudió la percepción de la calidad del aire bajo el enfoque de la metodología investigación acción participativa, el modelo incremental de la teoría de sistemas y los aspectos de la matriz de Leopold como método para identificar implicaciones nocivas para el medio ambiente. Se trabajó a través de instrumentos de recolección de datos como la encuesta y la entrevista para indagar y precisar las opiniones de la gente en torno a este importante problema y a su vez invitándolos a sumarse a la Red Ciudadana MoCaALTAMA y parti-

cipar de las siguientes etapas del proyecto. Debido al contexto de la pandemia generada por el virus SARS-CoV2 (COVID-19) en la cual se hizo énfasis en el distanciamiento social, se consideraron estrategias basadas en el uso de plataformas y herramientas digitales. El público objetivo de este estudio fueron las Instituciones de Educación Superior (IES) debido a que los estudiantes tienen la fortaleza de estar inmersos en la tecnología además de que se puede tener contacto con ellos a través de sus clases en línea. Como primera actividad se llevó a cabo una sesión informativa entre estudiantes de dos IES, el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Altamira (CICATA Altamira) y el Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Madero (TNM-ITCM) por ser donde los autores de este estudio imparten clases. La sesión realizada en la plataforma Microsoft Teams®, se grabó y se subió al canal de YouTube @cigmmad que recoge las colaboraciones realizadas y las actividades de la Red MoCaALTAMA en una lista de reproducción como se muestra en la Figura 9.

Figura 9

Sesiones con los estudiantes utilizando la plataforma Microsoft Teams®.



Fuente: <https://youtu.be/qbT9IMGfuMk?list=PL9d20U28c14yGnaOz4bqZ9h8oUPiYsGkY>

Posteriormente, se invita a los ciudadanos a contestar el instrumento “Percepción Ciudadana de la Calidad de Aire” que se encuentra en la página de la Red MoCaALTAMA (www.redmocaaltama.org), como se muestra en la Figura 10. La encuesta tiene como objetivo conocer la percepción que tiene la sociedad sobre la calidad del aire y la posible contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana Tampico-Madero-Altamira, en el estado de Tamaulipas y de esta forma identificar los puntos donde mayor cantidad de ciudadanos reconocen olores constantes desagradables, la intensidad y frecuencia entre otros aspectos, y con estos datos se alimenta el algoritmo de ubicación de estaciones de Calidad de Aire (MoCaALTAMA CACs) que considera el factor de la percepción ciudadana, la ubicación de las fuentes de emisión de gases contaminantes, el tipo de actividad de la fuente, entre otros aspectos que permiten seleccionar el número de sitios de medición y evaluar la ubicación de las estaciones de medición de calidad del aire.

Figura 10

Participación Ciudadana en la Encuesta de Percepción de la Calidad del Aire

Encuesta de Percepción de la Calidad del Aire v 1.1
ABIERTA No te quedes sin participar, click para contestar :)

Encuesta de Percepción de la Calidad del Aire v 1.0
CERRADA ---- Geoanálisis de Resultados ----

¿En qué colonia vive?
Cascajal

Marca temporal
28/06/2021 14:58:31

Rango de edad
c) 55-64 años

Nivel de ingresos mensuales en su hogar
b) 5000-15000

Indique el municipio donde vive
Tampico

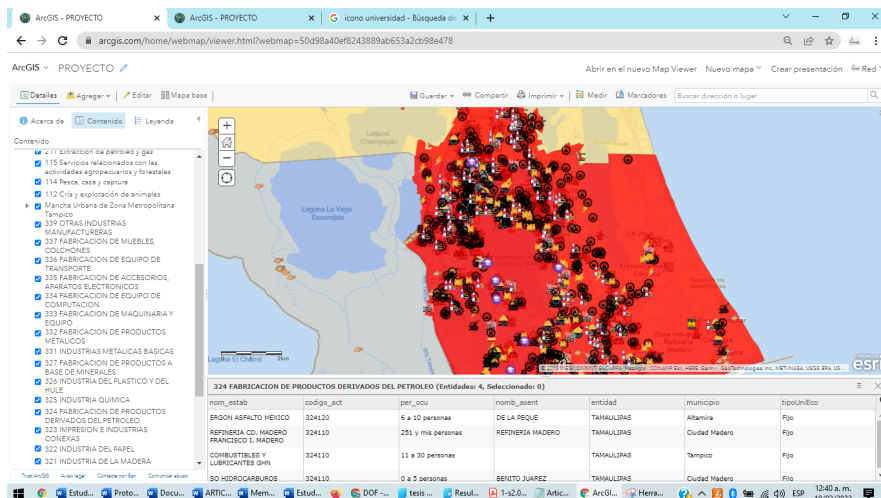
¿Cuántos años tiene viviendo en esa colonia?
12

¿Donde usted vive, se perciben olores inusuales o molestos?
SI

Existen muchos tipos de actividades generadoras de contaminación en una zona de estudio. Sin embargo, para realizar una evaluación rápida se tienen que destacar las fuentes importantes como las plantas generadoras

de energía eléctrica, petroquímica, entre otras. De tal forma que es importante establecer una lista de las fuentes industriales y procesos que son considerados como los responsables de la mayor parte de la contaminación industrial. Como resultado de aplicar la técnica de Evaluación Rápida de Fuentes de Contaminación Ambiental (ERFCA) que permite construir inventarios de contaminantes, emitidos al aire, agua y suelo destacando fuentes emisoras y jerarquizando problemas y tomando como punto de partida la información del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) que incluye de los municipios de Altamira, Tampico y Cd. Madero se analizó que existen un total de 3002 establecimientos económicos relacionados con actividades como la Agricultura, Generación, Transmisión y Distribución de energía, Construcción e Industrias Manufactureras donde se incluye a la Industria Petroquímica y Refinación de Petróleo entre otras. Con la información recolectada, se elaboró una lista de industrias presentes en la zona de estudio las cuales se clasificaron con base en una lista de fuentes industriales emisoras y su relación con la emisión de contaminantes según la actividad que se realiza en los sectores de producción agrícola y ganadera; manufactura de productos y derivados de las industrias de alimentos, textiles, madera, papel, químicos, minerales no metálicos, minerales metálicos y metalmecánica. La lista de control quedó conformada por posibles fuentes contaminadoras clasificadas por municipio y por sector manufacturero, como se muestra en la Figura 11.

Por otro lado, en la zona metropolitana los vientos dominantes son del este-sureste y los reinantes del nor-noreste. Se reporta como vientos dominantes los provenientes del sureste, encontrándose variaciones en el año, como las registradas durante los meses de mayo a octubre cuando el viento es predominantemente de dirección sureste, con una frecuencia de 25%, y noreste con frecuencia del 17.5%. Para los meses de noviembre a abril, los vientos soplan del norte con una frecuencia del 10%, del este con una frecuencia del 25% y del sureste con una frecuencia del 30%. Además, se considera una zona susceptible de huracanes que pudieran presentar fuertes vientos mayores a 200 Km/hr, y precipitaciones cercanas a los 900 mm entre 24 y 48 horas. También se han presentado heladas y granizadas que son poco frecuentes en la región, y no guardan un patrón de comportamiento definido, pero generalmente se presentan durante

Figura 11*Generación del Inventario de Posibles Fuentes Emisoras (fuentes fijas y de área)*

las precipitaciones de tipo tempestuoso relacionados con el clima, alta humedad, su cercanía al Golfo de México y a la latitud.

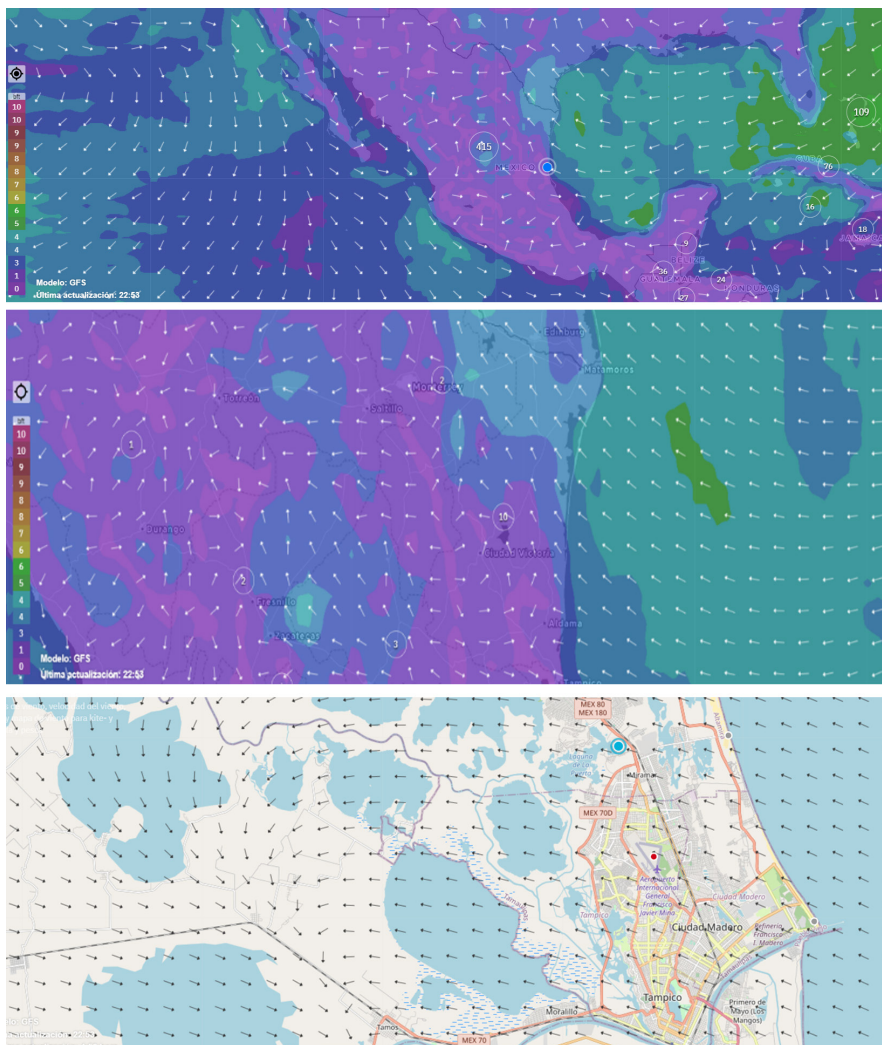
Respecto a la modelación de la dispersión de contaminantes usando sensores de bajo costo, es una cuestión en gran auge en diferentes países, aunada al auge también creciente de los proyectos de ciencia ciudadana que involucran como se mencionó antes, a los habitantes de las ciudades tanto en la toma de datos como en su interpretación. En el caso de la zona metropolitana, lo comúnmente aceptado es que, por estar junto al mar, los contaminantes se dispersan con mucha facilidad, lo que no tiene datos que lo sustenten y que se contradice con la percepción de la calidad del aire en diferentes puntos de la ciudad. Por ello, a través de las estaciones meteorológicas MoCaALTAMA EMAs se estudian los aspectos meteorológicos de la zona de estudio que permiten representar el campo de viento local, que es necesario para estudiar la dispersión de los contaminantes generados por las diferentes fuentes tanto fijas como de área como móviles, en contraste con los campos de viento con menor resolución como los que proporcionan los datos satelitales. Si las fuentes son elevadas (por ejemplo, chimeneas) y los contaminantes son emitidos

con impulso vertical y empuje térmico, la condición atmosférica (velocidad del viento y estabilidad de la atmósfera) asociada a las mayores concentraciones de contaminantes en aire a nivel del suelo, solo puede ser determinada mediante la aplicación de modelos de dispersión atmosférica (Schmitz, 2018). Esto se debe, en parte, a que la velocidad del viento está involucrada en dos aspectos que tienen influencias contrapuestas sobre la concentración de contaminantes en aire a nivel del suelo. Por un lado, la velocidad del viento afecta la elevación de la pluma originada por una emisión de contaminantes con impulso vertical y empuje térmico. Cuando los vientos son débiles, la elevación de la pluma es mayor que para vientos fuertes. Por otro lado, vientos débiles generan una mínima dilución, mientras que vientos fuertes proporcionan considerable dispersión. Por otra parte, en condiciones atmosféricas marcadamente inestables (convectivas) la pluma de contaminantes puede ser transportada hacia la superficie, originando concentraciones relativamente elevadas a nivel del suelo cerca de la fuente. (Ho, 2019).

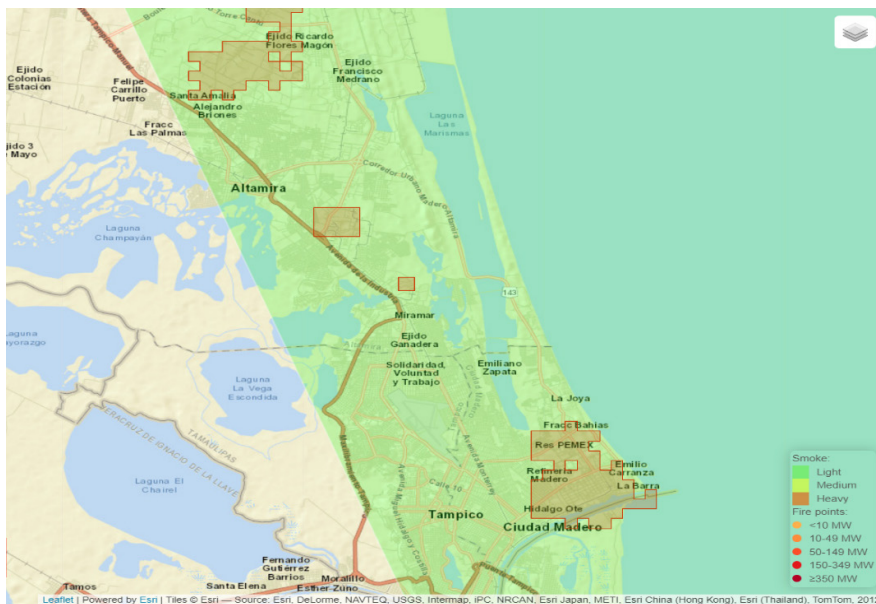
En la Figura 12 se presentan ejemplos de campos de viento con diferentes resoluciones espaciales. Para el campo de viento local es importante tener una red de EMAs como las desplegadas en la red.

Adicionalmente a las EMAs de la Red, el Hazard Mapping System (HMS) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) es un sistema de procesamiento interactivo que integra datos de algoritmos automatizados de detección de incendios utilizando Imágenes avanzadas de radiómetro de muy alta resolución (AVHRR) y espectro radiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS). El resultado es una visualización de calidad controlada de las ubicaciones de los incendios y las columnas de humo significativas detectadas por los satélites meteorológicos. Este instrumento es particularmente útil para detectar los incendios del tular, columnas de humo provenientes de la industria, etc.

Por otro lado, en la página web de la red MoCaALTAMA se ofrece a los ciudadanos la posibilidad de subir fotografías de fuentes de emisión fijas y móviles. El objetivo es poder disponer, aprovechando los metadatos de las imágenes, de un inventario de fotografías donde aparezcan plumas de emisión con las que se pueda modelar la dispersión de los contaminantes

Figura 12*Ejemplos de campo de viento Nacional, Regional y Local*

en la zona junto con los datos meteorológicos y las mediciones de contaminantes criterio. Entre los metadatos se encuentran la fecha y en algunos casos la localización. Adicionalmente, se está promoviendo en la página web el uso de una aplicación que genera directamente la geolocalización, con lo que será posible correlacionar la pluma adquirida y procesada mediante análisis avanzado de imagen, como se muestra en la Figura 13,

Figura 13*Red de Estaciones Meteorológicas Ciudadanas*

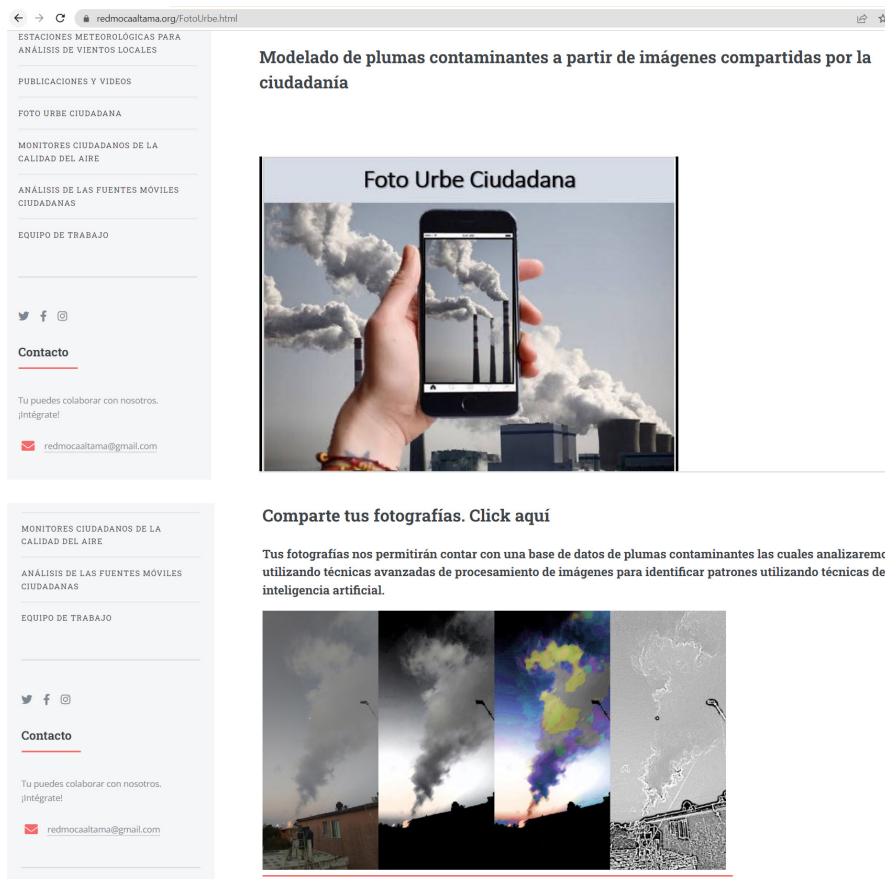
Fuente: <https://redmocaaltama.org/EMAs.html>

con las variables meteorológicas de las estaciones ciudadanas situadas en todos los puntos de la ciudad. Con estos datos se aportará al modelo de dispersión de la contaminación que entre otras salidas permitirá ofrecer información a nivel de barrio, de la calidad del aire y sus implicaciones en actividades como el ejercicio al aire libre, efectos potenciales a la salud en infantes y otros grupos vulnerables. En la Figura 14 se presentan ejemplos de las imágenes subidas por los ciudadanos y procesadas digitalmente.

Como parte indispensable de la razón de ser de la Red, las actividades se comunican a la ciudadanía por los canales digitales de mayor difusión como YouTube; también se organizan conferencias y pláticas en diferentes Instituciones de Educación Superior (<https://youtu.be/qbT9IMGfuMk>), así como en organismos de la sociedad civil organizada como la Federación de Colegios y Asociaciones Profesionales (FECAP) del Sur de Tamaulipas (<https://youtu.be/waojfOJlbXo>).

Figura 14

Procesamiento digital de las plumas de emisión enviadas por ciudadanos a través de la página web utilizando la aplicación de geolocalización



Fuente: <https://redmocaaltama.org/FotoUrbe.html>

Conclusiones

La contaminación atmosférica causa graves problemas a la salud humana y al medio ambiente por lo que es necesario vigilar atentamente la composición química del aire en el ambiente verificando que éstos no sobrepasen los límites permisibles marcados por las normativas legales aplicables. La actividad diaria en la zona metropolitana Tampico genera una gran cantidad de sustancias que modifican la composición natural

del aire que respiramos tanto en el exterior como en interiores. Conocer la calidad del aire en tiempo y en espacio, permite a las personas saber si es propicio llevar a cabo actividades en exteriores, o implementar medidas para respirar un aire más puro en interiores y prevenir enfermedades. La Red Ciudadana MoCaALTAMA tiene como finalidad apoyar a la sociedad para que sea consciente de sus derechos a la salud y de un medio ambiente saludable, fomentar en los ciudadanos el interés a través de materiales que permitan que se involucren en la generación y análisis de información ambiental coadyuvando con los sectores académico, industrial y gubernamental en la búsqueda de soluciones y de mejores opciones para vivir en una zona con una creciente calidad del aire y en un futuro, de agua, de energía y de servicios. A través del portal web de la Red Ciudadana MoCaALTAMA se establece una comunicación directa con los ciudadanos. Dentro de las perspectivas se encuentra el consolidar una red de monitoreo ciudadana de acceso libre para poner al alcance de la población y de los gobiernos municipales una herramienta complementaria a las estaciones oficiales, para informar y fomentar el interés en la mejora de la calidad del aire en la población.

Agradecimientos

Al Instituto Politécnico Nacional por el financiamiento recibido a través de los Proyecto SIP-IPN 2021-2048 y 2022-1092 y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por el financiamiento recibido a través del proyecto Infraestructura 2022-321595.

Referencias

- Cori L., Donzelli G., Gorini F., Bianchi F., Curzio O. (2020). Risk Perception of Air Pollution: A Systematic Review Focused on Particulate Matter Exposure. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 17, pp. 1-27. <https://doi.org/10.3390/ijerph17176424>.
- Ho, H.C.; Wong, M.S.; Man, H.Y.; Shi, Y.; Abbas, S. (2019). Neighborhood-based subjective environmental vulnerability index for community health assessment: Development, validation and

- evaluation. *Sci. Total Environ.*, 654, pp. 1082–1090. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.136>
- Hossain MZ, 2015. “*For a chapter in a book*”, Soil Mechics, 4th ed. Vol. 2, Sankeisha: Sakai, Ed. pp. 11–60.
- INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2020). *Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019, México*. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. Ciudad de México. 343 pp.
- Li, F.; Zhou, T. (2020). Effects of objective and subjective environmental pollution on well-being in urban China: A structural equation model approach. *Soc. Sci. Med.*, 249, 112859.
- Padilla, L., Vargas E. y De Sicilia R., (2020). *Atlas de vulnerabilidad urbana ante COVID-19 en las Zonas Metropolitanas de México*. Universidad Nacional Autónoma de México. http://www.igg.unam.mx/covid-19/Vista/archivos/atlas/ZM_tampico.pdf
- PMOT Altamira (2010). *Programa Metropolitano de Ordenamiento Territorial del Altamira-Ciudad Madero-Tampico*. <http://po.tamaulipas.gob.mx/wp-content/uploads/2018/10/cxxxv-144-021210F-ANEXO.pdf>
- Schmitz S., Weiland L., Becker S., Niehoff N., Schwartzbach F., Von Schneidemesser E., (2018). An assessment of perceptions of air quality surrounding the implementation of a traffic-reduction measure in a local urban environment, *Sustainable Cities and Society*, 41, pp. 525-537, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.011>.
- WHO, World Health Organization. (2021). *Ambient (outdoor) air pollution*. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)