

Aplicaciones del modelo gaussiano de dispersión atmosférica AERMOD

Gaussian atmospheric dispersion model AERMOD applications

Darlén Mayelin Goiburo Cordero^{1,*}, Anel Hernández Garcés^{2,3}, Osvaldo Cuesta-Santos⁴

¹Empresa de Proyectos Hidráulicos Habana (EIPPH). Virtudes 680 esquina Belascoain. Habana. Cuba.

²Centro de Inmunoensayo (CIO). Calle 134 y ave 25. Marianao. La Habana, Cuba.

³Universidad Tecnológica de La Habana, CUJAE.

⁴Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET).Casablanca. La Habana, Cuba.

*Autor de correspondencia: darlen.goiburo@eiphh.giat.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 23 enero 2021 **Aceptado:** 3 marzo 2021 **Publicado:** 15 marzo 2021

Resumen

La modelación computacional se ha convertido en las últimas décadas en un instrumento necesario para la evaluación de la calidad del aire. Esta idea se fundamenta en el resultado de numerosos trabajos investigativos, los que resaltan el valor predictivo de estas herramientas para la comprensión de la contaminación en una región dada. El presente trabajo a través de una revisión bibliográfica analiza los resultados más significativos que presentan al modelo AERMOD como una útil herramienta de predicción. Como resultado de la revisión, se constató: el carácter predictor de tipo local al simular radios sanitarios por debajo de los 50 km, la variabilidad del entorno de las simulaciones sea terrestres o marinas, y las fuentes de emisión de tipo lineal, aérea o de volumen, condición que sitúa al modelo en un variado espectro de escenarios de trabajo, como son la industria minera, comunal, energética, así como la transportación marina. En cuanto a las desventajas solo se encontró la no inclusión de las interacciones químicas. Por otra parte, AERMOD demostró un buen ajuste en los estudios de validación con respecto a otros simuladores. Generalizar la aplicación del AERMOD debe constituir una premisa para el control de la contaminación atmosférica sobre la base de la carencia de estaciones de monitoreo de calidad del aire, un sistema que a pesar de la complejidad matemática que presenta y las incertidumbres asociadas, brinda una herramienta de planificación que contribuirá a la toma de decisiones.

Palabras clave: modelo, dispersión atmosférica, AERMOD, aplicaciones

Abstract

Computational modeling has become a necessary instrument for the evaluation of air quality in recent decades. This idea is based on the result of numerous research works, which highlight the predictive value of these tools for understanding pollution in a given region. The present work, through a bibliographic review, has compiled the most significant results that present the AERMOD model as a useful predictive tool. As a result it was found that the local predictive nature when simulating sanitary radio below 50 km, the variability of the simulations environment being terrestrial or marine, and the emission sources of the linear, aerial or marine type. Regarding the

disadvantages, only the non-inclusion of chemical interactions was found, the decay of pollution to the earth's surface is only taken into account through the mean lifetime of the pollutant in the atmosphere. AERMOD showed a good fit in the validation studies with respect to other simulators, only a slight difference was found between the samples observed in the field and the concentrations obtained from AERMOD, showing that the field measurements are slightly lower due to meteorological incidents when taking in situ measurements. Generalizing the application of AERMOD should be a premise for the control of air pollution based on the lack of air quality monitoring stations, a system that despite the mathematical complexity that it presents and the associated inaccuracies, provides a planning tool that will contribute to decision making.

Keywords: model, atmospheric dispersion, AERMOD, applications.

1. Introducción

En las últimas décadas, la utilización de los simuladores computacionales ha estado dirigida a la evaluación de la dispersión de contaminantes, ganando en reconocimiento y aceptación en la sociedad científica mundial [1]. Una amplia gama de estudios ratifica las bondades que ofrecen estos modelos, entre las que se encuentran el cálculo de las concentraciones de contaminantes (inmisiones) resultantes de las emisiones a la atmósfera por fuentes existentes, la elección de la localización más apropiada para futuros focos emisores [2], así como el establecimiento de legislaciones para el control de las emisiones de contaminantes atmosféricos, determinando los valores máximos permitidos para los caudales y concentraciones de emisión.

El Comité Regulatorio de Mejoramiento del Modelo de la Sociedad Meteorológica (AERMIC) de los Estados Unidos de América de conjunto a la Agencia de Protección Ambiental (EPA) estableció en el 2005 a AERMOD (American Meteorological Society-AMS/Environmental Protection Agency-EPA Regulatory Model), como modelo de dispersión de fuentes emisoras en sustitución del ISCST3 usado hasta el momento, basándose en la estructura de turbulencia de la capa límite planetaria, los conceptos de escala, tratamiento de fuentes superficiales o elevadas y terreno simple o complejo.

Ha sido demostrado y documentado, tanto por evidencias científicas como por estudios de validación que la formulación del AERMOD se encuentra a un alto nivel de aceptación entre los autores del campo [3].

En Cuba, existe una metodología donde se establece lo relacionado con la modelación de las afectaciones producidas en la calidad del aire a escala local por contaminantes atmosféricos emitidos desde fuentes fijas. Estas afectaciones se caracterizan por el incremento de las concentraciones de estos contaminantes en el aire y por la deposición de estas sustancias en el terreno [4].

La metodología consiste en un enfoque por niveles basado en el uso de diferentes modelos, simplificados y refinados, en dependencia de la situación a modelar. En el caso específico del modelo AERMOD, el mismo se encuentra dentro del Nivel 3, considerado en este sentido, para evaluaciones de calidad de aire que requieran un análisis de dispersión más refinado.

El objetivo del presente trabajo está orientado a mostrar, a partir de una búsqueda bibliográfica tanto de artículos de referencia en el tema como de otros de resultados, las aplicaciones del modelo AERMOD, como el modelo gaussiano de dispersión atmosférica en el área ambiental. Es por ello que se reportan los principales acoplamientos aplicados, el tamaño de la región de estudio y resolución, los períodos de simulación, la complejidad del entorno, la versatilidad de las aplicaciones

del modelo, los distintos tipos de especies y fuentes modeladas, a fin de contar con un documento actualizado del enfoque del modelo en la que se incluyen casos de estudios en Cuba.

2. Desarrollo

2.1. Generalidades de los modelos de dispersión atmosférica

La modelación de la dispersión de contaminantes es una metodología utilizada para calcular concentraciones de contaminantes (inmisiones) resultantes de emisiones a la atmósfera. Los modelos se comprenden de ecuaciones físico-matemáticas que permiten simular las condiciones reales del transporte y la dispersión de los contaminantes, como producto de la interacción de las condiciones meteorológicas y las propias de las fuentes de emisión. La información requerida para la simulación considera la ubicación geográfica de las fuentes, los flujos de los contaminantes emitidos y factores meteorológicos tales como la turbulencia atmosférica, velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica, entre otros [5]. Los modelos no describen con exactitud el problema de contaminación de una zona determinada, pero brindan una visión acertada del escenario en estudio que en algunos casos se respaldan por valores de medición reales *in situ*.

Generalmente, se pueden encontrar cinco principales tipos de modelos los que de acuerdo a su complejidad y aplicación se encaminan a diferentes alcances de estudios.

El modelo de caja es uno de los más simples. Este asume que los contaminantes emitidos a la atmósfera se mezclan uniformemente y de manera inmediata con el aire disponible para la dilución en un volumen o caja de aire de dimensiones finitas, se considera que los contaminantes son químicamente estables y que permanecen en el aire. Aunque útil, este es muy limitado en la habilidad debido a que la suposición de distribución homogénea de contaminante es demasiado simple [4].

Por otra parte, los modelos numéricos tratan de establecer alguna formulación matemática que describa la influencia de los procesos atmosféricos en el transporte de contaminantes. Generalmente se usan para contaminantes reactivos que dan lugar a contaminantes secundarios y requieren de una base de datos extensa y compleja, por lo que no son muy utilizados.

Los modelos estadísticos son los que basados en técnicas estadísticas analizan tendencias, relaciones de calidad del aire, mediciones atmosféricas y predicción de la evolución de situaciones de contaminación a corto plazo, donde los procesos químicos y físicos no poseen una clara interpretación científica o en situaciones donde no se cuenta con una base de datos fiables.

Por otra parte, los modelos gaussianos son a menudo usados para predecir la dispersión continua de penachos con sobrelevación de la contaminación del aire originándose de fuentes a niveles del suelo o elevados. Este tipo de modelo asume que el contaminante de una fuente, es transportado continuamente en la dirección del vector de velocidad del viento, estando las concentraciones más altas en el centro del penacho y las más bajas en los extremos. En cada distancia a sotavento el penacho posee una distribución gaussiana o normal tanto en la dirección transversal como en la vertical. A medida que se aleja del penacho en la dirección del viento, después del punto de máximo impacto la concentración decae exponencialmente [2].

Los modelos de dispersión lagrangianos y eulerianos incluyen a todos los modelos en los que los penachos se encuentran segmentados, comúnmente conocidas como emisiones de puff o de partículas matemáticas. Es decir, cuando se trata de emisiones instantáneas no continuas ambos

modelos utilizan un cierto número de partículas ficticias o puff para simular la dinámica de un parámetro físico determinado [2]. Este tipo de modelo se ajusta muy bien a la realidad en condiciones convectivas. La diferencia más importante entre los dos modelos radica en que los eulerianos usan un dominio tridimensional fijo como sistema de referencia mientras que el lagrangiano emplea dos, uno fijo y otro en movimiento [4].

2.1.1 La solución gaussiana

La solución de difusión gaussiana relaciona los niveles de inmisión en un punto con la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera desde el foco emisor. La misma se describe por la ecuación de difusión turbulenta (1), como una ecuación diferencial parcial que se resuelve con la iteración de varios métodos numéricos [6, 7].

$$(xyz) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left(\exp\left(\frac{-(z+h)^2}{2\sigma_x^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z-h)^2}{2\sigma_x^2}\right) \right) \quad (1)$$

Donde

c = concentración en una posición dada

Q = flujo másico de la fuente

x = viento a favor

y = viento cruzado

z = dirección vertical

u = velocidad del viento a la altura

h = altura de la fuente de emisión

σ_y, σ_z = coeficientes de dispersión de la distribución de concentración lateral y vertical. Son función de la distancia a la fuente emisora y de la categoría de estabilidad atmosférica

u o u_s = velocidad del viento es ajustada del valor observado u_{ref} desde una altura de referencia z_{ref} hasta la altura de la chimenea o punto de descarga h_s según:

$$u_s = u_{ref} \left(\frac{h_s}{z_{ref}} \right)^p \quad (2)$$

Donde

u_{ref} = altura de referencia

z_{ref} = altura de la chimenea o punto de descarga

u_s = velocidad del viento en el punto de la chimenea

p = exponente de perfil del viento. Los valores pueden ser proporcionados como función de la clase de estabilidad y la clase de la velocidad del viento.

Estos coeficientes se suelen presentar en forma gráfica o calcularse según fórmulas empíricas. Zanetti [5] presentó dos métodos generales para la determinación de (σ_y y σ_z). El primer método, el más utilizado para los estudios de dispersión, se basa en el cálculo de funciones a campo abierto, aunque debe tenerse en cuenta que en condiciones inestables (A) y estables (F) se pueden cometer errores de varias dimensiones y hace uso directo de la intensidad de turbulencia. El segundo método se basa en cálculos semiempíricos en los que la atmósfera se clasifica en clases de estabilidad y se derivan funciones diferentes para cada clase.

Cimorelli [7], expone para el cálculo de los coeficientes de dispersión lateral y vertical por AERMOD las Ec. (3) y Ec. (4).

$$\sigma_y = \frac{\left(\frac{\sigma_v x}{u_s}\right)}{\left(1 + \frac{x/u_s}{2T_{Ly}}\right)^p} \quad (3)$$

Donde:

σ_v = coeficiente de dispersión lateral

$p=0,5$

u_s = velocidad del viento

σ_v = velocidad de turbulencia lateral

T_{Ly} =escala integral lagrangiano

x = distancia desde la fuente a favor del tiempo

El coeficiente de dispersión vertical σ_{zs} está compuesto por la contribución del componente elevado (z_{es}) y del componente cerca de la superficie (z_{gs}).

$$\sigma_{zs} = \left(1 - \frac{h_{es}}{z_i}\right) \sigma_{zgs} + \left(\frac{h_{es}}{z_i}\right) \sigma_{zes} \quad (4)$$

Donde:

h_{es} =turbulencia vertical por mezcla mecánica

x = distancia desde la fuente a favor del tiempo

z_i =escala integral lagrangiano.

σ_{zes} =componente elevado

σ_{zgs} = componente cerca de superficie.

2.2 Modelo AERMOD

AERMOD dentro de los modelos refinados que propone la EPA, se comporta como un modelo gaussiano de penacho, de tipo estacionario que simula la dispersión de los contaminantes en el aire. Para realizar sus cálculos tiene en cuenta las características del terreno y la presencia de edificios cercanos a la fuente de emisión, los cuales pueden afectar la dispersión del penacho [5] y constituye un avance significativo con respecto a sus antecesores, ya que evalúa: la dispersión tanto en la capa límite estable como convectiva; la flotabilidad y elevación de la pluma; la penetración de la pluma dentro de la inversión elevada; los perfiles verticales de viento, la temperatura, la turbulencia y el tratamiento de receptores en todo tipo de terrenos. El radio de análisis para AERMOD no excede los 50 km del centro de la fuente por lo que se considera una herramienta de análisis a escala local [7].

La principal limitación de AERMOD, encontrada es que AERMOD no incluye las interacciones químicas y el decaimiento por este concepto solo es tenido en cuenta a través de una constante de decaimiento o el tiempo de vida medio del contaminante en la atmósfera [6].

De acuerdo a EPA-454/R-03-004 del 2005, el sistema AERMOD, cuenta con diferentes pre-procesadores: AERSURFACE, AERMINUTE, AERCORE AERPLOT, AERMET y AERMAP que brindan bondades al modelo convirtiéndolo en una versátil herramienta de predicción.

AERSURFACE explora las características de superficie o uso del suelo, incluyendo la proporción de albedo, relación de Bowen, y la longitud rugosa de la superficie para el aporte a AERMET. El pre-procesador AERSURFACE requiere del esquema de clasificación del uso de suelo (National Land Cover Data, NLCD92) para generar datos característicos de la superficie para el procesador

meteorológico AERMET. Autores como Perry [8] y Cohan [9] reportan el empleo de AERSURFACE en sus estudios.

Mientras, AERMINUTE reduce el número de calmas y los vientos perdidos en los datos de la superficie (vientos de 1 minuto) para las estaciones ASOS (Sistema Automatizado de Observación en Superficie) de la red primaria climatológica en los Estados Unidos, a fin de realizar cálculos de velocidad promedio y vientos horarios, que AERMOD actualmente no puede simular por sí solo.

Para el caso de Cuba donde muchas veces los parámetros necesarios para correr AERMOD no están disponibles, Cohan [9] propone una metodología alternativa para la obtención de los mismos. Por otro lado, AERPLOT es una herramienta que convierte la salida AERMOD.PLT (archivo de trazado AERMOD) a un formato kmz (Google Earth) para visualizar las isolíneas de concentración sobre imágenes satelitales.

EPA-454/B-18-002 en el 2018 detalló la información meteorológica necesaria para caracterizar la capa de límite planetaria (PBL Planetary Boundary Layer), la que proporcionada por AERMET, procesa los datos disponibles obtenidos en tres pasos: el primero de ellos consiste en extraer y analizar los datos horarios de superficie y en altura ingresados para períodos de 1 hasta 24 h. El segundo consiste en agrupar las salidas de estos datos en un sólo archivo merge.sdk. El tercer paso será la lectura de los datos meteorológicos unificados, exportándose en dos archivos de salida meteorológica para AERMOD: un primer archivo de estimaciones de parámetros meteorológicos en superficie, aermet.sfc y un segundo archivo de parámetros meteorológicos en altura, aermet.pfl.

Finalmente, el preprocesador AERMAP, caracteriza al terreno, y genera receptores a través de un modelo digital del terreno de la zona bajo estudio, calculando una altura representativa con respecto al nivel del mar para cada fuente y cada receptor evaluado según EPA-454/B-18-004 del 2018. A través de este enfoque, AERMOD maneja el cálculo del impacto de contaminantes en terrenos tanto planos como elevados dentro del mismo marco de la simulación, lo que permite diferenciar las formulaciones para terrenos simples y complejos.

Existen bases de datos libres en internet que se pueden utilizar para realizar los cálculos. GTOPO30: MDE con resolución de 30 arcos de segundo (~ 900 m), en proyección Latitud/Longitud WGS84. SRTM (Shuttle Radar Topography Mission): MDE con resolución de 3 arcos de segundo (~ 90 m), en proyección Latitud/Longitud. Cada archivo corresponde a un grado de latitud y longitud.

Los requerimientos de datos de los modelos refinados necesitan múltiples ficheros de entrada a partir de la exigencia de los preprocesadores vinculados al modelo. Parámetros tales como uso de suelo, definición del dominio de la modelación, caracterización del uso de suelo en el dominio, análisis de la perturbación de la pluma por efecto de obstáculos cercanos entre otros términos, a fin de identificar las características tanto topográficas como meteorológicas del área de estudio y traducirlo en la correcta elección de la información a ingresar en el modelo.

2.2.1 Uso de suelo en AERMOD

La clasificación de uso del suelo es necesaria para estimar el albedo, la tasa de Bowen y la rugosidad de la superficie en AERMET y para definir parámetros en los algoritmos de deposición seca de gases

en AERMOD. En este último se utiliza la categoría de uso de suelos más representativa en cada sector de 10 grados como dato de entrada directo, para definir parámetros en los algoritmos de deposición seca de gases [9]. En la Tabla 1 se muestran las categorías de uso del suelo a considerar en AERMET y en AERMOD.

Tabla 1. Categorías de uso de suelo para AERMET y AERMOD

AERMET	AERMOD
Cuerpo de agua	Zona urbana sin vegetación
Bosque caducifolio	Terreno agrícola
Bosque de coníferas	Terreno de pastizal
Pantano o humedal	Bosque
Terreno agrícola	Área sub-urbana cubierta de hierba
Pradera	Área sub-urbana boscosa
Zona urbana	Cuerpo de agua
Desierto	Terreno árido, principalmente desierto
	Humedal no boscoso

En la determinación de las características del suelo AERSURFACE, se necesita ficheros tipo NLCD92 (National Land Cover Data 1992) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), con resolución de 30 m, los cuales están disponibles de manera gratuita solamente para el territorio de Estados Unidos.

En Cuba, no existe información digital adecuada del uso de suelos, por lo que se utiliza el archivo de usos del suelo `nausgs2_01.img`, descargado de la Base de Datos (BD) internacional “North America land cover data base”, la cual forma parte de la BD “Global Land Cover Characteristics Data Base” del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), que incluye todos los continentes. Esto conlleva a utilizar una variante a partir de una capa de uso de suelo obtenida del USGS disponible: http://edc2.usgs.gov/glcc/tab Lambert_na.php con resolución de 1000 metros, como se muestra en la Figura 1. Inicialmente se procesa la capa de uso de suelo en un Sistema de Información Geográfica (SIG) disponible, interceptándola con otra capa que representa el dominio de modelación, para estimar el porcentaje de cada una de las categorías en cada sector [9,10].

Los datos están en una imagen *raster* de una sola banda y sin encabezado, en la cual para cada celda de 1000x1000 m existe un valor que corresponde a una clasificación de uso de la tierra en distribuidas en 24 categorías, las que se recogerán en 9 clasificaciones de uso de suelo en AERMET y 9 AERMOD, como muestra la Tabla 2.

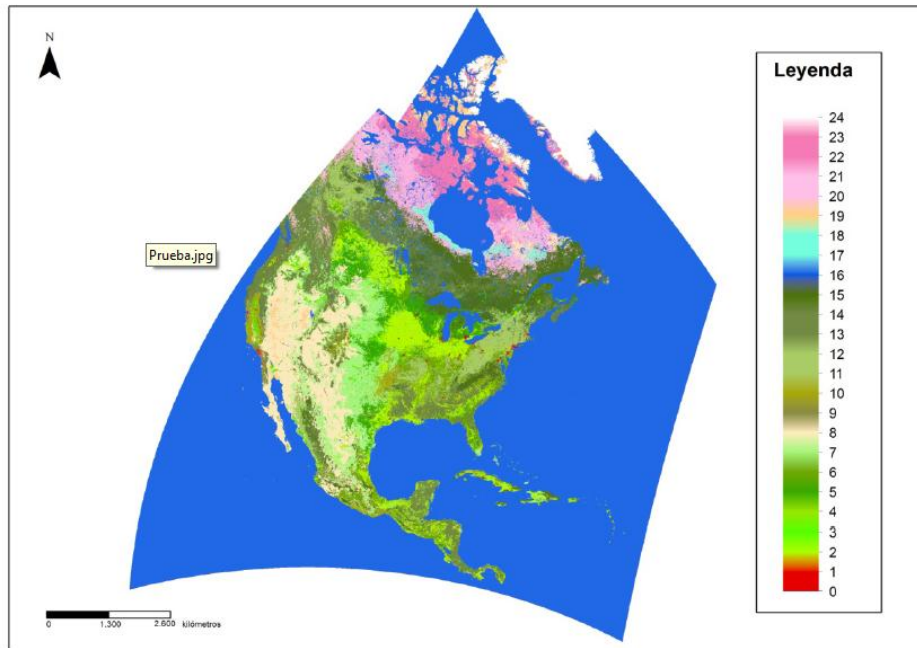


Fig.1 Capa de uso de suelo de Norte América obtenida del USGS con resolución de 1000 metros [10]

Tabla 2. Categorías de uso de suelo empleadas para AERMET y AERMOD a partir de rasterización elaborado USGS [10]

Categoría	USGS	AERMET	AERMOD
Zona urbana	1	7	1
Tierras de cultivos y pastos sin regadío	2	5	2
Tierras de cultivos y pastos irrigadas	3	5	2
Mezcla de tierras de cultivos y pastos sin regadío/irrigadas	4	5	2
Mosaico de cultivo y pastizales	5	5	3
Mosaico de cultivo y bosques	6	5	3
Pastizales	7	6	3
Arbustos	8	8	8
Mezcla de arbustos y pastizales	9	6	3
Sabana	10	6	3
Bosques caducifolios de hojas anchas	11	2	4
Bosques caducifolios de coníferas	12	2	4
Bosques perennes de hojas anchas	13	3	4
Bosques perennes de hojas finas	14	3	4
Bosques mixtos	15	3	4
Cuerpos de agua	16	1	7
Humedales herbáceos	17	4	9
Humedales boscosos	18	4	4
Terreno árido o de escasa vegetación	19	8	8
Tundra herbácea	20	-	-
Tundra boscosa	21	-	-
Tundra mixta	22	-	-
Tundra sin vegetación	23	-	-
Nieve o hielo	24	-	-

2.2.2 Penetración parcial del penacho sobre la capa de mezcla

Los penachos de chimeneas altas pueden interactuar con frecuencia con la capa de inversión en la parte superior de la capa de mezcla [10]. Para condiciones inestables con penetración del penacho parcial o total por encima de la altura de mezcla, el modelo AERMOD calcula por separado los coeficientes de dispersión relativa para la porción del penacho dominante que penetra. Para los casos con penetración parcial para el penacho dominante, AERMOD calcula dos volúmenes de penacho, uno basado en coeficientes de dispersión relativos para la fuente directa y otro en función de los coeficientes de dispersión relativos para la fuente penetrada. Dado que AERMOD utiliza los mismos coeficientes de dispersión para las fuentes directas e indirectas, no se necesitan valores diferentes para los coeficientes de dispersión relativa de la fuente indirecta según EPA-454/R-03-004 del 2005.

2.2.2 Flujo descendente tras obstáculos

El fenómeno de flujo descendente tras obstáculos o *building downwash* es común de zonas urbanas. Ocurre cuando la nube de contaminantes encuentra en su trayectoria edificaciones, las cuales perturban la flotabilidad de las partículas dentro de la nube, alterando los valores reales de concentración en el sitio [11]. AERMOD cuenta con un algoritmo de mejoras del penacho (PRIME) que proporciona una aproximación a los procesos de turbulencia mejorando los efectos que provoca en la flotabilidad de las partículas. Kumar [12] y Canepa [13] sugieren el empleo previo de PRIME como herramienta integrada para simular los efectos de flujo descendente tras obstáculos. Olesen [14] y Ma [15] trabajaron igualmente con PRIME en la dispersión de fuentes en zonas urbanas; Faulkner [16] comparó el empleo de PRIME en los modelos AERMOD e ISC resultando AERMOD-PRIME como el más sensible.

2.2.3 Deposición húmeda y seca

El proceso de deposición de las partículas contaminantes contenidas en la masa de aire ocurre por dos mecanismos: deposiciones secas y húmedas. El modelo AERMOD incluye algoritmos para manejar las deposiciones secas y húmedas tanto para partículas como en emisiones gaseosas. El primer método viene por defecto, desde el ISCST3 según EPA/OAQPS/AQAD/AQM en el 2018. Se emplea cuando más del 10% del total de las partículas presenta un diámetro igual o mayor que 10 μm . Este es utilizado cuando se tiene conocimiento del tamaño de las partículas. El segundo método es usado cuando el tamaño con que se distribuyen las partículas no es bien conocido y menos del 10% de las partículas tienen un diámetro igual o mayor que 10 μm . En este caso, la velocidad de deposición es calculada como el promedio pesado entre la velocidad de deposición de las partículas finas ($<2,5\mu\text{m}$) y la velocidad de deposición de las partículas gruesas ($2,5\mu\text{m} < x < 10\mu\text{m}$).

2.2.4 Transformación química

AERMOD considera la transformación química de elementos dentro de los mecanismos de dispersión al incorporar el método de relación molar de volumen de penachos (PVMRM), es decir se procede a simular el mecanismo químico primario en la conversión de NO en NO₂ dentro del penacho para la estimación real de la concentración ambiental [5, 17].

Algunos estudios fomentaron la adaptación del enfoque en el modelo de dispersión AERMOD. Schewe y Canepa [6, 13] evaluaron el sesgo que producía el algoritmo, concluyendo que sí ajustaba para la modelación con AERMOD en comparación con otros modelos con algoritmos más refinados.

2.2.5 Interacciones costeras y singularidades del transporte sobre masas de agua

De acuerdo a la posibilidad de modelar fenómenos de dispersión en zonas costeras y cercanos a cuerpos acuíferos terrestres, AERMOD cuenta desde el 2011 con el preprocesador AERCOARE que aplica el algoritmo de flujo aire-mar del modelo de respuesta a la atmósfera oceánica acoplada (COARE) procesando datos meteorológicos medidos sobre el agua. Lashgari y Wong [18, 19] argumentaron que el preprocesador meteorológico AERCOARE complementa con datos de energía de la superficie aire-agua, fumigación en la línea de costa al preprocesador AERMET y permite que AERMOD modele fuentes localizadas en estas áreas.

2.3 Acoplamiento y configuración del modelo AERMOD

Son variados los acoples que se han realizado al modelo AERMOD, logrando gran alcance y robustez en el análisis y predicción por parte del modelo ante diferentes escenarios de trabajos.

La meteorología juega un papel importante dentro de los estudios de dispersión atmosférica. Wong [19] confirmó esto tras el estudio de sensibilidad de AERMET para diferentes condiciones meteorológicas extremas en el día, donde evidenció el buen resultado del preprocesador en el análisis durante las temperaturas más altas del periodo matutino. Simultáneamente Simpson [20] utilizó AERMET para comparar la altura de mezcla con las mediciones realizadas en el experimento Joint URBAN 2003 en la ciudad de Oklahoma.

Los resultados obtenidos por AERMET estuvieron de acuerdo con las mediciones del experimento. Por su parte, diversos autores como Ma [15], Faulkner [16] y Simpson [20] han usado AERMET para el análisis de dispersión de gases de combustión y material particulado obteniendo excelentes resultados. Con la mejora de los modelos de pronóstico meteorológico, disímiles autores se inclinaron por el acoplamiento MM5/AERMOD [15, 21-27].

Posteriormente se incluyeron estudios con el acople WRF/AERMOD mostrando la confiabilidad de este. Kesarkar [11] analizó la alta sensibilidad del modelo con diferentes configuraciones de WRF. Igualmente Kumar [29], Kumar [30], Rzeszutek [31] y Augusto [32] usaron este acoplamiento en la estimación de la dispersión de especies contaminantes.

2.4 Dimensión del dominio

La dimensión del dominio, depende de la ubicación geográfica de los receptores de interés a partir del alcance propuesto. AERMOD se ajusta eficazmente para estudios locales a distancias inferiores a los 50 km [5].

A partir de este resultado, diversos autores han aplicado el modelo en un intervalo de distancias que abarca desde los estudios en las cercanías de la fuente; Fileni [33] 10 x 10 m; Lilic [34] 1 x 1 km; Abayomi [21] 2 x 2 km evaluaron el modelo AERMOD obteniendo resultados ajustados; mientras que Doğruparmak [35] 4 km x 4 km halló una ligera diferencia entre las muestras observadas en el terreno y las concentraciones obtenida del AERMOD, demostrándose que las medidas de terreno son ligeramente inferiores debido a incidencias meteorológicas al realizar las mediciones *in situ*.

Otros autores como Jittra [26] y Bajoghli [36] 30 km x 30 km, Jafarigol [37] y Toamsi [38] 50 km x 50 km llegaron hasta los límites del corto alcance de los modelos locales. Jafarigol [37] observó en

el estudio que la actuación del modelo CALPUFF fue superior a los arrojados por AERMOD, lo cual puede ser provocado por la cercanía al valor crítico de radio sanitario expuesto para el modelo.

2.5 Resolución espacial

La resolución espacial del dominio aplicado a la simulación es un aspecto clave en la configuración del mismo, que depende de la resolución de las medidas o del modelo de pronóstico elegido, la topografía, las dimensiones del dominio de simulación y, por supuesto, las capacidades de cálculo disponibles [4].

Muchos autores han variado en la elección, desde alta resolución hasta baja. No obstante, se debe señalar que la resolución espacial, no discrimina la exactitud de los resultados, tan solo determina la cuantía de receptores dentro del dominio de trabajo que generaran valores de inmisión a la salida de la simulación. Se destacan Faulkner [16] con un trabajo de altísima resolución, 1 m x 1 m. También de alta resolución son los trabajos de Fileni [33] 10 m x 10 m; Tomas [38] 25 m x 25 m, Jafarigol [37] y Deligiorgi [39] 50 m x 50 m.

De baja resolución son los trabajos de Jittra [26] 4 km x 4 km y Vidal-Daza [40] 6 km x 6 km. El trabajo de más baja resolución reportado es de Augusto [32] quien selecciono 15 km x 15 km.

Otros investigadores eligen mallas rectangulares de diferente resolución para ubicar sus receptores. Saikomol [41] empleó 1 km x 1 km, 4 km x 4 km y 12 km x 12 km y Gibson [42] 1,25 km x 1,25 km, 2,5 km x 2,5 km y 2,3 km x 2,5 km.

2.6 Aplicaciones del modelo AERMOD

El modelo AERMOD tiene un carácter versátil e integrador dentro del análisis de escenarios de evaluación de la calidad del aire. Diversos estudios alrededor del mundo y la esfera nacional lo demuestran, incurriendo en diferentes sectores industriales. Algunos se muestran Tabla 3. Como se visualiza, AERMOD ha incurrido en variados sectores industriales, variando las especies modeladas y el tipo de fuente que las emite, resultado que se adjunta a los disímiles acoples que es sujeto, así como los variados preprocesadores con que cuenta. En Cuba, AERMOD ha sido usado en la modelación de la dispersión industrial. Algunos de los principales trabajos se resumen en la Tabla 4.

Como se puede apreciar, son escasos los estudios del uso de AERMOD dentro del sector industrial cubano, a pesar de formar parte como modelo refinado de la Metodología para modelar las afectaciones de la calidad del aire establecida en la NC 1054:2014. En este sentido, debe extenderse la aplicación del mismo en fuentes de alta emisión de contaminantes como sistemas de tratamiento, vertederos, incineradores, cementeras y entidades del sector petrolero, las que se ubican como altos contaminantes.

Tabla 3. Aplicaciones del AERMOD a nivel internacional

Especies	Período de modelación	Tipo de fuente	Fuente	Descripción
NO ₂ , SO ₂ , PST	24 h 1-8-12-24 h	puntual, lineal, aérea aérea	[12, 36]	Área industrial formada por refinerías petroquímica, plantas químicas siderúrgico y metalúrgicas
NO ₂ , PM _{2.5} y PM ₁₀	1h	puntual lineal aérea, lineal	[18, 29, 43, 44]	Cementeras
SO ₂ , NO ₂ y PST	24h	puntual	[45]	Caldera en empresa productora de papel
PM ₁₀ sustancias olorosas NH ₄ y H ₂ S PST	24h 1h 8h	aérea	[32, 33, 35]	Sistemas de tratamiento de residuales
COV	1-3-8-24h 24h	volumen	[40;45]	Tanques de almacenamiento de nafta, Jet A1, gasolina y diesel cercanas a bahías de los Estados Unidos
NO _x , CO _x	1h 8h-24h 1h	lineal	[43, 46, 47]	Emisión de gases de combustión por embarcaciones en zonas costeras
NH ₄ , PM ₁₀ , olor	24h 1h-24h 1h	área	[48, 49]	Ventilación en el sector avícola

2.7 Validación del modelo AERMOD

Existe en algunos casos incertidumbre en la utilización de modelos computacionales como herramienta de predicción. Varios autores han contribuido a la validación del modelo AERMOD, a continuación, se detallan algunos resultados.

Un grupo de autores se han enmarcado en el comportamiento estadístico entre las especies medidas y las modeladas. Ma [15] avogó por la utilización de AERMOD para la implementación de políticas de control de la contaminación nacional para luego comparar la desviación de las concentraciones del SO₂, NO_x y PM₁₀ generados por la actividad industrial. Por su parte, Lilic [34] evaluó el comportamiento de PM₁₀ a en áreas geomineras de la India, para evaluar el rendimiento del modelo con respecto a las mediciones *in situ* en cuatro receptores escogidos, observando para cada receptor una excelente correlación entre el valor medido y el modelado.

Otros autores han seleccionado la intercomparación entre modelos. Jafarigol [37] evidenció un mejor ajuste del modelo AERMOD con respecto a CALPUFF en la simulación de SO₂ en refinerías de petróleo, mientras que Asadollahfardi [54] comparó las simulaciones de los modelos AERMOD y ISCST3 con mediciones *in situ* de H₂S recogidas por 12 estaciones de monitoreo. El estudio arrojó que la variabilidad entre las predicciones y medidas del campo no excedieron de 0,94 de error, indicando a AERMOD como el modelo que más cerca se comportó con respecto a los valores medidos. Por otra parte, el modelo ha sido estresado a fin de conocer las variables más sensibles. En

ese sentido, Zanetti [5], Faulkner [16] y Alizade [55] realizaron análisis de sensibilidad. En los estudios se mostró la variación que sufren las concentraciones obtenidas ante cambios en el índice de Albedo, rugosidad de superficie, velocidad del viento, temperatura y nubosidad, no afectándose para el radio de Bowen.

Tabla 4. Aplicaciones del AERMOD en Cuba

Especies	Período de modelación	Tipo de fuente	Fuente	Resultados	Descripción
NO ₂ SO ₂ PST	24h	puntual	[50]	Se evidencio el impacto ambiental que provoca la instalación en áreas poblacionales del municipio Regla	Pronóstico de dispersión de contaminantes atmosféricos en la refinería Níco López
NO _x , SO ₂ CO	1-24h	puntual	[51]	Se obtuvo el impacto a la calidad de aire provocado por los grupos electrógenos identificando al municipio Sancti Spiritus como el de mayor impacto.	Pronóstico de dispersión de contaminantes atmosféricos en grupos electrógenos en la provincia de Sancti Spíritus.
NO _x , SO ₂ PM ₁₀ , PM _{2.5} CO	24h	puntual	[52]	Se determinó la industria de mayor emisión, así como la zona poblacional afectada. Se caracterizaron las condiciones meteorológicas y el comportamiento de las variables con la utilización del modelo meteorológico WRF.	Se realizó un inventario de las fuentes fijas en la ciudad de Las Tunas
	1h	puntual		Con AERMOD se actualizó la calidad del aire de la provincia resaltando los municipios de mayor contaminación Habana Vieja y Regla.	Evaluación de la calidad el aire en la provincia Habana.

Un grupo de autores se han enmarcado en el comportamiento estadístico entre las especies medidas y las modeladas. Ma (2013) avogó por la utilización de AERMOD para la implementación de políticas de control de la contaminación nacional luego comparar la desviación de las concentraciones del SO₂, NO_x y PM₁₀ generados por la actividad industrial lo cual. Por su parte, Verma (2017) evaluó el comportamiento de PM₁₀ a en áreas geomineras de la India, para evaluar el rendimiento del modelo con respecto a las mediciones *in situ* en cuatro receptores escogidos, observando para cada receptor una excelente correlación entre el valor medido y el modelado.

Otros, han seleccionado la intercomparación entre modelos. Jafarigol et al. (2018) evidenciaron un mejor ajuste del modelo AERMOD con respecto a CALPUFF en la simulación de SO₂ en refinerías de petróleo. Mientras que, Asadollahfard et al. (2019) comparó las simulaciones de los modelos AERMOD y ISCST3 con mediciones *in situ* de H₂S recogidas por 12 estaciones de monitoreo. El estudio arrojó que la variabilidad entre las predicciones y medidas del campo que no excedieron de 0,94 de error, indicando a AERMOD como el modelo que más cerca se comportó con respecto a los valores medidos.

Por otra parte, el modelo ha sido estresado a fin de conocer las variables más sensibles. En ese sentido, Cimorelli et al., 2005, Faulkner (2017) y Alizadeh et al. (2018) realizaron análisis de sensibilidad. En los estudios se mostró la variación que sufren las concentraciones obtenidas ante cambios en el índice de Albedo, rugosidad de superficie, velocidad del viento, temperatura y nubosidad, no afectándose para el radio de Bowen.

3. Conclusiones

AERMOD dentro de los modelos refinados que propone la EPA, se comporta como un modelo gaussiano de penacho, de tipo estacionario que simula la dispersión de los contaminantes en el aire. El radio de análisis del mismo no excede los 50 km del centro de la fuente por lo que se considera una herramienta de análisis a escala local. Diversos estudios reflejan que ha sido acoplado a modelos meteorológicos de pronóstico tales como MM5 y WRF corroborándose la adaptación y fiabilidad del modelo ante la variabilidad de la fuente. Debido a que AERMOD tiene en cuenta los efectos del terreno y los flujos atmosféricos en zonas costeras, ha sido igualmente utilizado en dominios de terreno complejo y en zonas costeras. El modelo AERMOD ha sido ampliamente aplicado a nivel internacional en la evaluación de la calidad del aire en petroquímicas, plantas químicas, cementeras, sistema de tratamiento, calderas, entre otras, obteniéndose resultados que fundamentan la eficacia del mismo. En Cuba, aunque se reportan algunas investigaciones, la utilización del mismo debe extenderse hacia el sector industrial donde se ubican las fuentes más contaminantes del país. A pesar de ser un simulador de análisis de contaminación de alcance local, en la exactitud de sus resultados AERMOD ha mostrado ser una herramienta de alta sensibilidad demostrándose por algunos autores que la variabilidad entre las predicciones y medidas del campo no exceden el valor de 0,94 de error con respecto a otros modelos empleados.

Referencias

1. Ordoñez-Sanchez, Y.C., Reinos-Valladares, M., Hernández-Garcés, A., Canciano-Fernández, J. *Aplicación de modelos simplificados para la dispersión de contaminantes atmosféricos. Caso de estudio*. Revista Cubana de Química, 2018. **30**(1): p. 90-103.
2. Hernández-Garcés A., *Sistema de evaluación de la dispersión episódica de contaminantes atmosféricos*. Tesis de Doctorado. Universidad de Santiago de Compostela, 2016.
3. Seangkiatiyuth, K., Surapipith, V., Tantrakarnapa, K., Lothongkum, A.W. *Application of the*

- AERMOD modeling system for environmental impact assessment of NO₂ emissions from a cement complex.* Journal of Environmental Sciences, 2011. **23**(6): p. 931-940. DOI: [https://doi:10.1016/S1001-0742\(10\)60499-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60499-8).
4. Hernandez-Garces, A., Reynosa-Valladares, M., Hernandez-Bilbao, F., Canciano-Fernandez, J. Emisión de contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros santiagueros. *Tecnología Química*, 2019. **39**(2): p. 390-402.
 5. Zannetti, P. *Air pollution modeling: theories, computational methods, and available software.* Southampton: Computational Mechanics, 1990. ISBN 978-1-4757-4467-5.
 6. Schewe, G. J., Bhat, A., 2012. *Sensitivity of AERMOD to AERMINUTE-Generated Meteorology.* 10th Conference on Air Quality Modeling. Covington.
 7. Cimorelli, A. J., Perry, S.G., Venkatram, A., Weil, J.C., Paine, R.J., Wilson, R.B., Brode, R.W. *AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part I: General model formulation and boundary layer characterization.* Journal of applied meteorology, 2005. **44**(5): p. 682-693.
 8. Perry, S.G., Cimorelli, A.J., Paine, R.J., Brode, R.W., Weil, J.C., Venkatram, A., Peters, W.D. *AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part II: Model performance against 17 field study databases.* Journal of applied meteorology, 2005. **44**(5): p. 694-708.
 9. Cohan, A., Wu, J., Dabdub, D. *High-resolution pollutant transport in the San Pedro Bay of California.* Atmospheric Pollution Research, 2011. **2**(3): p. 237-246. DOI: <https://10.5094/APR.2011.030>.
 10. Turtos, L.M., Rivero, J.J., Curbelo, L., Diaz, N., Meneses, E. *Methodological guide for implementation of the AERMOD system with incomplete local data.* Atmospheric Pollution Research, 2010. p. 1102-1111.
 11. Kesarkar, A.P., Dalvi, M., Venkatram, A., Cimorelli, A., Kaginalkar, A., Ojha, A. *Coupling of WRF and AERMOD for Pollutant Dispersion Modeling.* Atmospheric Environment, 2007. **41**: p. 2255-2476. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.042>.
 12. Gulia, S., Kumar, A., Khare, M. *Performance evaluation of CALPUFF and AERMOD dispersion models for air quality assessment of an industrial complex.* Journal of Scientific Industrial Research, 2015. **7**: p. 302307.
 13. Canepa, E. *An overview about the study of downwash effects on dispersion of airborne pollutants.* Environmental Modelling & Software, 2004. **19**(12): p. 1077-1087 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.11.011>.
 14. Olesen, H.R., Berkowicz, R., Ketznel, M., Lefstrem, P. *Validation of OML, AERMOD/PRIME and MISCAM using the Thompson wind-tunnel dataset for simple stack-building configurations.* Boundary-layer meteorology, 2009. **131**(1): p. 73-83.
 15. Ma, J., Yi, H., Tang, X., Zhang, Y., Xiang, Y., Pu, L. *Application of AERMOD on near future air quality simulation under the latest national emission control policy of China: A case study on an industrial city.* Journal of Environmental Sciences, 2013. **25**(8): p. 1608-1617.
 16. Faulkner, W.B., Shaw, B.W., Grosch, T. *Sensitivity of two dispersion models (AERMOD and ISCST3) to input parameters for a rural ground-level area source.* Journal of the Air & Waste Management Association, 2008. **58**(10): p. 1288-1296. DOI: <https://doi.org/10.3155/1047-3289.58.10.1288>.
 17. Hendrick, E.M., Tino, V.R., Hanna, S.R., Egan, B.A. *Evaluation of NO₂ predictions by the plume volume molar ratio method (PVMRM) and ozone limiting method (OLM) in AERMOD using new*

- field observations*. Journal of the Air & Waste Management Association, 2013. **63**(7): p. 844-854.
18. Lashgari, A., Kecojevic, V. *Comparative analysis of dust emission of digging and loading equipment in surface coal mining*. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2016. **30**(3): p.181-196. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2015.1028516>.
 19. Wong, H., Elleman, R., Wolvovsky, E., Richmond, K., Paumier, J. *AERCOARE: An overwater meteorological preprocessor for AERMOD*. Journal of the Air & Waste Management Association, 2016. **66**(11):p. 121-1140.
 20. Simpson, M., Raman, S., Lundquist, J.K., Leach, M. *A study of the variation of urban mixed layer heights*. Atmospheric Environment Journal, 2007. **41**(33): p. 6923-6930. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.029>.
 21. Abayomi, T. *AERMOD modeling of air pollutant emissions from backup generator use in Lagos, Nigeria*. Tesis de Doctorado. University of Texas at Arlington, 2017.
 22. Malakan, W., Keawboonchu, J., Thepanondh, S. *Comparison of AERMOD Performance using Observed and Prognostic Meteorological Data*. Environment Asia, 2018. **11**(2): p. 38-52. DOI: <https://doi.org/10.14456/ea.2018.21>.
 23. Malakan, W., Keawboonchu, J., Thepanondh, S. *Comparison of AERMOD Performance using Observed and Prognostic Meteorological Data*. Environment Asia, 2018. **11**(2): p. 38-52. DOI: <https://doi.org/10.14456/ea.2018.21>.
 24. Shaikh, K., Imran, U., Shaikh, S. *Health risk assessment for emissions from Jamshoro thermal power station using AERMOD dispersion model*. Journal of Industrial Pollution Control, 2018. **34**(2): p. 2142-2151.
 25. Kulia, S., Kumar, A., Khare, M. *Performance evaluation of CALPUFF and AERMOD dispersion models for air quality assessment of an industrial complex*. Journal of Scientific Industrial Research, 2015. **7**: p. 302-307.
 26. Jittra, N., Pinthong, N., Thepanondh, S. *Performance evaluation of AERMOD and CALPUFF air dispersion models in industrial complex area*. Air, Soil and Water Research, 2015. **8**: p. 36-48.
 27. Jayadipraja, E., Daud, A., Assegaf, A., Maming, M. *The application of the AERMOD model in the environmental health to identify the dispersion area of total suspended particulate from cement industry stacks*. Journal of Research in Medical Sciences, 2016. p. 2044-2049.
 28. Dey, S., Gupta, S., Sibanda, P., Chakraborty, A. *Spatio-temporal variation and futuristic emission scenario of ambient nitrogen dioxide over an urban area of eastern India using GIS and coupled AERMOD-WRF model*. PloS one, 2017. **12**(1): p. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170928>.
 29. Kumar, A., Dikshit, A.K., Fatima, S., Patil, R.S. *Application of WRF model for vehicular pollution modelling using AERMOD*. Atmospheric and Climate Sciences, 2015. **5**(2): p. 57-62. DOI: <https://doi.org/10.4236/acs.2015.52004>.
 30. Kumar, A., Patil, R.S., Dikshit, A.K., Kumar, R. *Application of WRF model for air quality modelling and AERMOD-a survey*. Aerosol and Air Quality Research, 2017. **17**(7): p. 1925-1937. DOI: <https://doi.org/10.4236/acs.2015.52004>.
 31. Rzeszutek, M., Szulecka, A., Oleniacz, R., Bogacki, M. *Assessment of the AERMOD dispersion model over complex terrain with different types of meteorological data: Tracy Power Plant experiment*. E3S Web of Conferences, 2017. **22**: p. 149-155.
 32. Augusto, M.R., Campos, B., Carvalho, V.S.B., Calheiros, H.C. *Modeling of H₂S Dispersion in*

- Brazil with Aermod: Case Study of Water Resource Recovery Facility In South of Brazil*. Revista Brasileira de Meteorología, 2019. **34**(4): p. 497-504. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/0102-7786344063.2019>.
33. Fileni, L., Matteucci, G., Passerini, G., Rizza, U. *Analysis of air pollutant emissions in a wastewater treatment plant using dispersion models*. WIT Transactions on Ecology and Environment, Air Pollution, 2018. **230**: p. 219-230. DOI: <https://doi.10.2495/MT190181>.
 34. Lilic, N., Cvjetic, A., Knezevic, D., Milisavljevic, V., & Pantelic, U. (2018). *Dust and noise environmental impact assessment and control in Serbian mining practice*. Minerals, 8(2), 34
 35. Dođruparmak Ç., Demirarslan, K.O., Karademir, A.Y.K.A.N. *Evaluation of three pollutant dispersion models for the environmental assessment of a district in Kocaeli, Turkey*. Global Nest J, 2017. **19**(1): p. 37-48.
 36. Bajoghli, M., Abari, M. F., Radnezhad, H. *Dispersion Modeling of Total Suspended Particles (TSP) Emitted from a Steel Plant at Different Time Scales Using AERMOD View*. Journal of Earth, Environment and Health Sciences, 2016. **2**(2), 77-87.
 37. Jafarigol, F., Atabi, F., Moattar, F., Nouri, J. *Predicting ambient concentrations of NO₂ in a gas refinery located in South Pars Gas Complex*. International Journal of Environmental Science and Technology, 2016. **13**(3): p. 897-890.
 38. Tomasi E., G. Antonacci, L. Zardi, Ragazzi, M. Giovannini, W.I.T. *Atmospheric dispersion modelling with AERMOD for comparative impact assessment of different pollutant emission sources in an Alpine Valley*. D. Transactions on Ecology and the Environment, 2015. **198**: p. 1743-3541. DOI: <https://doi.10.2495/AIR150371>.
 39. Deligiorgi, D., Philippopoulos, K., Karvounis, G., Tzanakou, M. *Identification of pollution dispersion patterns in complex terrain using AERMOD modelling system*. International Journal of Energy and Environment, 2009. **3**(3): p. 143-150.
 40. Vidal-Daza, O.A., Perez-Vidal, A. *Estimación de la Dispersion de Contaminantes Atmosféricos Emitidos por una Industria Papelera Mediante el Modelo AERMOD*. Ingeniería, 2018. **23**(1): p. 31-47. DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.1226>.
 41. Saikomol, S., Sarawut, T., Wanna, L. *Emission losses and dispersion of volatile organic compounds from tank farm of petroleum refinery complex*. Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2019. **17**: p. 561-570. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40201-019-00370-1>.
 42. Gibson, M.D., Kundu, S., Satish, M. *Dispersion model evaluation of PM_{2.5}, NO_x and SO₂ from point and major line sources in Nova Scotia, Canada using AERMOD Gaussian plume air dispersion model*. Atmospheric Pollution Research, 2013. **4**(2): p. 157-167. DOI: <https://doi.10.5094/APR.2013.016>.
 43. Seangkiatiyuth, K. Vanisa, S., Kraichat, W. *Application of the AERMOD modeling system for environmental impact assessment of NO₂ emissions from a cement complex*. Journal of Environmental Sciences, 2011. **23**(6): p. 931-940. DOI: [https://doi.10.1016/S1001-0742\(10\)60499-8](https://doi.10.1016/S1001-0742(10)60499-8).
 44. Verma, T., Shrivastva, B.K., Sharma, S.K. *Performance evaluation of AERMOD for Indian Geo-mining conditions*. Research Journal of Mining Volume, 2017. **1**(2): p. 88-99.
 45. Ashrafi, K., Shafiepour, M., Salimian, M., Momeni, M.R. *Determination and Dispersion Modeling of VOC Emissions from Liquid Storage Tanks in Asalouyeh Zone*. Journal of Environmental Studies, 2012. **38**(3): p. 120-126.

46. Carruthers, D.J., Stocker, J.R., Ellis, A., Seaton, M.D., Smith, S.E. *Evaluation of an explicit NO_x chemistry method in AERMOD*. Journal of the Air & Waste Management Association, 2017. **67**(6): p. 702-712. DOI: <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1280096>.
47. Gulia, S., Shrivastava, A., Nema, A.K., Khare, M. *Assessment of urban air quality around a heritage site using AERMOD: a case study of Amritsar City, India*. Environmental Modeling & Assessment, 2015. **20**(6): p. 599-608.
48. Ying, M., Wang-Li, L., Stikeleather, L.F., Edwards, J. *Modeling plume-rise of air emissions from animal housing systems: inverse AERMOD*. Journal of Environmental Protection, 2017. **8**(11): p. 1254-1269.
49. Huang, D., & Guo, H. *Dispersion modeling of odour, gases, and respirable dust using AERMOD for poultry and dairy barns in the Canadian Prairies*. Science of the Total Environment, 2019. **690**: p. 620-628.
50. Collazo, A., Cuesta, O., Wallo, A. *Modelación de la dispersión de los contaminantes atmosféricos emitidos por la refinería Níco López y fuentes cercanas*. Revista Cubana de Meteorología, 2003. **10**(1): p. 30-34.
51. Contreras, H., Doral, W., Meneses, E., López, I. *Evaluación de la calidad del aire de la generación eléctrica de los grupos electrógenos en la provincia de Sancti Spíritus*. Revista Cubana de Meteorología, 2016. **22**(2): p.126-140.
52. Peña, J., Carracedo-Velázquez, J.N. *Estimación de las emisiones provenientes de fuentes fijas en la ciudad Las Tunas*. Revista Cubana de Meteorología, 2018. **24**: p. 374-385.
53. Cuesta-Santos, O., González-Jaime, Y., Sosa-Pérez, C. *La calidad del aire en La Habana. Actualidad*. Revista Cubana de Meteorología, 2019. **25**(3): p. 425-442.
54. Asadollahfardi, G., Mazinani, S., Asadi, M., Mirmohammadi, M. *Mathematical and experimental study of hydrogen sulfide concentrations in the Kahrizak landfill, Tehran, Iran*. Environmental Engineer Research, 2019. **24**(4): p. 572-581. DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2018.265>.
55. Alizadeh, Z., Hassanvand, M.S., Gholampour, A. *Developing A Method For Pollutant Emission Rate Caused By Fuel Consumption From Industrial Towns*. Journal of Air Pollution and Health, 2018. **3**(2): p. 83-94.

Conflicto de Intereses

El presente manuscrito no presenta conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Darlén Mayelin Goiburo Cordero. ORCID: 0000-0001-9386-6038.

Participó en la conceptualización, revisión e investigación de la bibliografía y la redacción del manuscrito.

Anel Hernández Garcés. ORCID: 0000-0002-3656-1746.

Participó en la conceptualización, supervisión del trabajo y revisión del manuscrito.

Oswaldo Cuesta Santos. ORCID: 0000-0001-9386-6038.

Participó en la conceptualización, supervisión del trabajo y revisión del manuscrito.