

MODELACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y VALORACIÓN DE IMPACTOS EPIDEMIOLÓGICOS Y EXTERNALIDADES ASOCIADAS A INSTALACIONES ENERGÉTICAS E INDUSTRIALES

Autores principales: Leonor María Turtós Carbonell, Elieza Meneses Ruiz y Enrique Molina Esquivel

Otros autores: Ernesto Paz Ortega, José de Jesús Rivero Oliva, Madeleine Sánchez Gácita, Diosdado Alonso García, Yasser Fonseca Rodríguez, Miriam Martínez Varona, Osvaldo Cuesta Santos, Lourdes Álvarez Escudero, Saturnino Pire Rivas, Arturo Martínez Pulido y Jorge Alvarado Cartaya

Colaboradores: Norberto Díaz Rivero, Alina Roig Rassi, José Alejandro Rodríguez Zas, Laritza Curbelo Garea, Gil Capote Mastrapa, Arnoldo Bezanilla Morlot, Israel Borrajero Mojena, Arnaldo Collazo Aranda, Wenceslao Carrera Doral, Ileana López López, Luis Felipe Cuesta Sedeño

Entidad ejecutora principal: Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (Cubaenergía)

Otras entidades participantes: Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología, Instituto de Meteorología de Cuba y el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Ispjae)

Autor para la correspondencia:

Leonor María Turtós Carbonell
Calle 20 No 4111, e/ 18A y 47, Miramar, Playa, La Habana
Teléfono: 2062065. Fax: 2041188
Correo electrónico: leonort@cubaenergia.cu

Leonor María Turtós Carbonell (30%). Soluciones para la implementación de los modelos refinados para la escala local ISCST3 y AERMOD en Cuba. Desarrollo de los modelos PCRAMMET+ y AERMET+, que permiten el uso de ISCST3 y AERMOD respectivamente sin datos meteorológicos de aire superior. Desarrollo de los módulos de procesamiento de datos meteorológicos, dispersión, impactos y costos en el SEIA (Sistema de evaluación de impacto ambiental de instalaciones energéticas). Propuesta de Norma Cubana: Metodología para modelar las afectaciones de la calidad del aire a escala local debido a las emisiones de contaminantes atmosféricos desde fuentes fijas. Estudio de externalidades ambientales de las centrales térmicas y de otras tecnologías de generación de electricidad en Cuba, México y Costa Rica, usando metodologías simplificadas. Estudio de externalidades ambientales en las zonas críticas de Tula y Salamanca en México, resolviendo específicamente la dispersión local con AERMOD. Estudio de Moa Nickel SA. Validación del AERMOD, soluciones para la modelación del Río Cabañas como una fuente poligonal compleja. Estudio de la Refinería Camilo

Cienfuegos. Soluciones para la evaluación de antorchas y fuentes puntuales estacionarias. Evaluación de la dispersión de contaminantes con AERMOD y con CALPUFF en condiciones de emergencia. Evaluación de los modelos integrales de evaluación del Cambio Climático. Estudio y análisis de las normas y reglamentos relacionadas con el control de emisiones de contaminantes a la atmósfera y participación en la confección del anteproyecto de norma cubana de emisiones máximas admisibles de fuentes fijas para el sector de la energía. Implementación del modelo WRF para la modelación de la circulación atmosférica en Cuba, tanto para el uso de sus resultados en ISCST3 y AERMOD, a través de un convertidor propio desarrollado (WRF₂sl), en modelos 3D como CALPUFF y en modelos fotoquímicos como CHIMERE. Validación de sus resultados.

Elieza Meneses Ruiz (20%). Estimación de las externalidades ambientales de las principales CTE del país y de otras tecnologías de generación de electricidad utilizando metodologías simplificadas. Aportes metodológicos para los módulos de Impactos y Costos del SEIA (Sistema de evaluación de impacto ambiental de soluciones energéticas). Estudio de externalidades ambientales de las central es térmicas en México y Costa Rica usando metodologías simplificadas. Estudio de externalidades ambientales en las zonas críticas de Tula y Salamanca en México. Estudio de la Refinería Camilo Cienfuegos. Soluciones para la evaluación de antorchas y fuentes puntuales estacionarias. Selección y obtención de funciones exposición-respuesta para estudios de impacto en salud. Estudio de Moa Nickel SA, evaluación del impacto en Salud. Evaluación preliminar de las externalidades atmosféricas provocadas por el transporte automotor. Revisión de modelos integrados de valoración del Cambio Climático para su futura introducción en el país. Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero en instalaciones energéticas seleccionadas e identificación de opciones de mitigación.

Enrique Molina Esquivel (10%). Selección y obtención de funciones exposición-respuesta para estudios de impacto en salud. Identificación de los principales grupos poblacionales en riesgo potencial como consecuencia de las emisiones contaminantes de tres plantas de generación eléctrica en Puerto Escondido, Boca de Jaruco y Santa Marta, Cárdenas. Diseño de la estrategia para el estudio de la calidad del aire, ubicación de estaciones de monitoreo. Evaluación *sanitaria* de los resultados, incluyendo la identificación de los grupos humanos con mayores niveles de exposición, posibles impactos en salud y recomendación de acciones de control. Recolección y análisis de datos demográficos e indicadores de morbimortalidad potencialmente vinculados a los contaminantes del aire emitidos por la industria Energas en Santa Marta, Cárdenas, disponibles en las instancias territoriales de atención primaria de salud correspondientes a los principales grupos poblaciones sometidos a diferentes niveles de exposición; identificación y fundamentación de insuficiencias para su utilización en un posible estudio ecológico analítico. Estudio de impacto ambiental de las emisiones a la atmósfera de la refinería Camilo Cienfuegos: selección de contaminantes a evaluar, indicadores de efectos sobre la salud y funciones exposición-respuesta para evaluar el impacto poblacional a nivel local, diseño del estudio, incluyendo estrategia de monitoreo, períodos de resolución para la evaluación, selección de la

red de estaciones, valoración sanitaria de los resultados. Asesoría y recomendaciones a los especialistas de Gestión Ambiental de la refinería acerca de los usos, las ventajas, limitaciones y especificaciones necesarias para la compra de equipos para el monitoreo de la calidad del aire en puestos de trabajo, diferentes zonas de esa industria y territorios aledaños a la misma. Procesamiento de la bases de datos de PM10, PM2.5 y fracción PM2.5 / PM10 de las tres estaciones de muestreo (INHEM, Cubaenergía e Ispjae) de la campaña de 2012, validación y procesamiento estadístico de los resultados.

Ernesto Paz Ortega (6%). Estudio de la Refinería Camilo Cienfuegos. Soluciones para la evaluación de actividades de carga y descarga de combustible y emisiones fugitivas. Desarrollo y ampliación constante de la metodología para estudios integrales de contaminación atmosférica en empresas del sector energético e industrial del país usando las herramientas de medición y modelación disponibles: emplazamiento de grupos electrógenos en La Habana, Cienfuegos, Santi Spiritus, Ciego de Ávila, Holguín, Central Térmica de Cienfuegos, Planta de Cemento de Mariel, ACINOX, Plantas de gas Jaruco, Varadero y Puerto Escondido. Estudio de externalidades ambientales del sector del transporte. Implementación del modelo CALQ3 para la dispersión de contaminantes de fuentes móviles. Aplicación a casos de estudio de La Habana. Estudio y análisis de las normas y reglamentos relacionadas con el control de emisiones de contaminantes a la atmósfera y participación en la confección del anteproyecto de norma cubana de emisiones máximas admisibles de fuentes fijas para el sector de la energía. Servicio de calibración de analizadores de gases de combustión.

José de Jesús Rivero Oliva (5%). Implementación del modelo CALPUFF y uso en casos de estudios de plantas térmicas cubanas. Soluciones numéricas para resolver la parametrización para la capa de mezcla en AERMET+. Desarrollo de los módulos del SEIA_CTE (Sistema de evaluación de impacto ambiental de centrales térmicas), en particular el de procesamiento de datos de emisiones en condiciones de tiempo real. Estudio de externalidades ambientales del sector del transporte. Implementación del modelo IVE para la estimación de emisiones, con el desarrollo de herramientas auxiliares de cálculo como los índices de conducción. Estimación de las velocidades de decaimiento de los contaminantes en la región de Centro América y el Caribe a partir de los resultados del CALPUFF.

Madeleine Sánchez Gácita (5%). Implementación del modelo WMI y uso en casos de estudios de plantas térmicas cubanas. Desarrollo de los módulos de estimación de emisiones y de dispersión regional usando WMI en el SEIA (Sistema de evaluación de impacto ambiental de instalaciones energéticas). Estimación de las velocidades de decaimiento de los contaminantes en la región de Centro América y el Caribe a partir de los resultados del WMI. Estudio de externalidades ambientales en las zonas críticas de Tula y Salamanca en México, específicamente la dispersión regional con WMI. Estudio de Moa Nickel SA. Validación del AERMOD, soluciones para la modelación del río Cabañas como una fuente poligonal compleja. Desarrollo de la metodología para el uso de

Sistemas de Información geográfica en el procesamiento del uso de suelos para AERMOD. Implementación del MM5 como procesador meteorológico del modelo CALPUFF.

Diosdado Alonso García (4%). Estudio de la Refinería Camilo Cienfuegos. Soluciones para la evaluación de tanques e instalaciones de la planta de tratamiento de residuales. Desarrollo y ampliación constante de la metodología para estudios integrales de contaminación atmosférica en empresas del sector energético e industrial del país usando las herramientas de medición y modelación disponibles: emplazamiento de grupos electrógenos en La Habana, Cienfuegos, Santi Spiritus, Ciego de Ávila, Holguín, Central Térmica de Cienfuegos, Planta de Cemento de Mariel, ACINOX, Plantas de gas Jaruco, Varadero y Puerto Escondido. Campaña de monitoreo de partículas, PM10 y PM2.5 en el 2012 en La Habana. Servicio de calibración de analizadores de gases de combustión.

Yasser Fonseca Rodríguez (4%). Implementación del modelo CALPUFF y uso en casos de estudios de grupos electrógenos en La Habana. Estudio de la Refinería Camilo Cienfuegos. Evaluación de la dispersión de contaminantes con CALPUFF en condiciones normales y de emergencia. Desarrollo y ampliación constante de la metodología para estudios integrales de contaminación atmosférica en empresas del sector energético e industrial del país usando las herramientas de medición y modelación disponibles: emplazamiento de grupos electrógenos en La Habana, Cienfuegos, Santi Spiritus, Ciego de Ávila, Holguín, Central Térmica de Cienfuegos, Planta de Cemento de Mariel, ACINOX, Plantas de gas Jaruco, Varadero y Puerto Escondido. Participación en la evaluación del uso de los resultados del modelo WRF en los modelos locales ISCST3 y AERMOD.

Miriam Martínez Varona (3%). Estudios y servicios científico-técnicos en forma de campañas de monitoreo ambiental en el territorio aledaño a diversos tipos de instalaciones energéticas en el período 2010 – 2012. Descripción y evaluación sanitaria de la contaminación atmosférica por SO₂, NO₂, H₂S y partículas PM10 en asentamientos urbanos cercanos a tres plantas de generación eléctrica pertenecientes a la Unión Energas en las localidades de Puerto Escondido y Boca de Jaruco, en la provincia Mayabeque, y Cárdenas, en la provincia de Matanzas. Caracterización de la calidad del aire en áreas de especial interés en el territorio de de la Refinería Camilo Cienfuegos. Procesamiento de los filtros para las determinaciones gravimétricas de PM10 y PM2.5 de la campaña anual en tres estaciones de monitoreo en el 2012 y preparación de otras para el análisis PIXE por personal de Ceaden en Croacia y la evaluación por EAA para determinación de metales (total 310 filtros) y preparación de la base de datos del INHEM para la evaluación gravimétrica de PM10 y PM2.5 y participación en la preparación de una ponencia científica en un taller nacional.

Oswaldo Cuesta Santos (3%). Estudio y análisis de las normas y reglamentos relacionadas con el control de emisiones de contaminantes a la atmósfera y participación en la confección del anteproyecto de norma cubana de emisiones

máximas admisibles de fuentes fijas para el sector de la energía. Participación en la propuesta de NC: Metodología para modelar las afectaciones de la calidad del aire a escala local debido a las emisiones de contaminantes atmosféricos desde fuentes fijas. Revisión y aporte de soluciones en la implementación de los modelos de calidad del aire ISCST3, AERMOD, CALPUFF y CHIMERE.

Lourdes Álvarez Escudero (3%). Implementación del MM5 como procesador meteorológico del modelo CALPUFF. Adaptación del modelo WRF a las condiciones de la zona de estudio. Selección de las parametrizaciones físicas y de los datos meteorológicos globales más recomendables para el objetivo que se perseguía con la corrida del modelo.

Saturnino Pire Rivas (3%). Aplicación de modelo Berlyand, SCREEN3, ISCST3, ENVIMET para la evaluación del impacto de fuentes fijas y móviles sobre la calidad del aire el campus del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría. Desarrollo y ampliación constante de la metodología para estudios integrales de contaminación atmosférica en empresas del sector energético e industrial del país usando las herramientas de medición y modelación disponibles: CTE Habana, emplazamiento de grupos electrógenos Habana 220, tejas asfálticas de Camagüey, nuevas plantas de mezclas asfálticas de San José y Guanabacoa. Participación en el desarrollo de la propuesta de Norma Cubana: Metodología para modelar las afectaciones de la calidad del aire a escala local debido a las emisiones de contaminantes atmosféricos desde fuentes fijas. Revisión y crítica a la metodología para el empleo de modelo CALPUFF y AERMOD. Educación a estudiantes de posgrado de todo el país en cursos de maestría en Ingeniería ambiental y diplomados de Gestión energética en el conocimiento de las normas y aplicación de las metodologías desarrolladas para las evaluaciones de impacto sobre la calidad del aire empleando modelos.

Arturo Martínez Pulido (2%). Desarrollo y ampliación constante de la metodología para estudios integrales de contaminación atmosférica en empresas del sector energético e industrial del país usando las herramientas de medición y modelación disponibles: emplazamiento de grupos electrógenos en La Habana, Cienfuegos, Santi Spiritus, Ciego de Ávila, Holguín, Central Térmica de Cienfuegos, Planta de Cemento de Mariel, Acinox, Plantas de gas Jaruco, Varadero y Puerto Escondido. Campaña de monitoreo de partículas, PM10 y PM2.5 en el 2012 en La Habana. Servicio de calibración de analizadores de gases de combustión.

Jorge Alvarado Cartaya (2%). Desarrollo y ampliación constante de la metodología para estudios integrales de contaminación atmosférica en empresas del sector energético e industrial del país usando las herramientas de medición y modelación disponibles: emplazamiento de grupos electrógenos en La Habana, Cienfuegos, Santi Spiritus, Ciego de Ávila, Holguín, Central Térmica de Cienfuegos, Planta de Cemento de Mariel, ACINOX, Plantas de gas Jaruco, Varadero y Puerto Escondido. Servicio de calibración de analizadores de gases de combustión.

RESUMEN

La calidad del aire a escala local se encuentra comprometida en varias zonas del país. Las capacidades nacionales para su evaluación mediante mediciones son insuficientes. La modelación tampoco se explota adecuadamente, la regulación vigente establece un modelo simplificado, que no refleja los avances de la ciencia y no resuelve la mayoría de las situaciones que pueden presentarse.

El trabajo desarrolla soluciones robustas para la evaluación, control y mitigación de la contaminación atmosférica, integrando el uso de modelos de cálculos refinados adaptados a las condiciones del país, con mediciones tanto de emisiones como de calidad del aire, complementadas con estudios de impactos en salud y con la estimación de las externalidades ambientales.

Como resultado de este trabajo se ha logrado:

- Implementar en el país modelos de cálculo al nivel del estado del arte para estudiar la calidad del aire, los impactos en salud y las externalidades ambientales, los que permiten evaluaciones más precisas y decisiones más informadas.
- Aplicar la solución integradora modelación-medición a importantes fuentes contaminadoras del sector energético e industrial: centrales termoeléctricas, grupos electrógenos, refinerías, industrias del sector minero, entre otras; incluso en otros países de la región.
- Actualizar la regulación vigente en el país sobre modelación de la dispersión local de contaminantes atmosféricos y concentraciones máximas admisibles en aire ambiente y establecer la norma de emisiones en fuentes fijas puntuales de instalaciones generadoras de electricidad y vapor.

El trabajo se avala con 80 publicaciones en revistas y memorias de eventos nacionales e internacionales, cinco de ellas en revistas internacionales de alto factor de impacto y dos en revistas nacionales indexadas. También se ha publicado como capítulos en dos libros de editoriales extranjeras reconocidas. Es de destacar la contribución de los autores a seis trabajos publicados por CEPAL en el tema. Cuatro software desarrollados han sido registrados en el país.

COMUNICACIÓN CORTA

Introducción

La Situación Ambiental Nacional reconoce que existen zonas en el país en la escala local donde la calidad del aire se encuentra seriamente comprometida, sin que existan en la actualidad posibilidades reales para su evaluación y control sistemático mediante mediciones, debido al estado de la red de monitoreo. La modelación, como otra de las vías para evaluar la contaminación atmosférica, tampoco es hoy un instrumento de gestión eficiente. La regulación vigente (NC

39:1999) establece un modelo simplificado, que no refleja los avances de la ciencia en el tema y no resuelve la mayoría de las situaciones que pueden presentarse.

Problema científico

Este trabajo resuelve el **problema** de la insuficiente capacidad de las herramientas implementadas en el país, tanto basadas en modelos como en mediciones, para evaluar, controlar y mitigar la contaminación atmosférica a escala local. La implementación de modelos refinados, integrados con mediciones, tanto de emisiones como de calidad del aire y complementadas con estudios de impactos en salud y costos ambientales, permite evaluaciones más precisas y decisiones más informadas.

Dentro de los modelos existentes para la escala local, se seleccionan los sistemas ISCST3, AERMOD y CALPUFF. Todos son programas de código libre. Esto ha contribuido a que se perfeccionen constantemente y además garantiza poder usarlos en el país sin costos adicionales, haciéndoles las adaptaciones necesarias.

Objetivos

Los objetivos del trabajo son:

- (a) Desarrollar y evaluar soluciones metodológicas y de cómputo para la implementación de la metodología Vías de impactos y los modelos refinados de dispersión local de contaminantes atmosféricos, ISCST3, AERMOD y CALPUFF.
- (b) Evaluar, controlar y mitigar la contaminación atmosférica asociada a empresas del sector energético e industrial mediante estudios integrales que apliquen las metodologías y herramientas de cálculo desarrolladas.
- (c) Actualizar la regulación vigente en el país sobre modelación de la dispersión local de contaminantes atmosféricos y concentraciones máximas admisibles y establecer la norma de emisiones de fuentes fijas puntuales de instalaciones generadoras de electricidad y vapor.

Aporte científico

El aporte científico del trabajo radica en las soluciones desarrolladas para adaptar la metodología, Vías de Impacto y los modelos refinados de dispersión de contaminantes atmosféricos a las condiciones geográficas y meteorológicas y a la disponibilidad y formatos de datos del país. Estas soluciones contemplan los algoritmos para calcular los datos requeridos no disponibles; los cuales fueron además programados y validados. Constituye un valioso aporte la obtención por primera vez en el país de una función exposición-respuesta, FER, para evaluar la mortalidad a corto plazo debido a PM_{10} , además del riguroso proceso de selección de otras FER para los estudios de impacto en salud.

Es novedoso que las soluciones metodológicas se complementaron con el desarrollo de herramientas de cálculo como el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental de instalaciones energéticas (SEIA) y con varias aplicaciones a

situaciones concretas de la realidad nacional e incluso a otros países de la región, como México y Costa Rica, que aportan opciones novedosas de mitigación a problemas concretos del sector energético e industrial. Las metodologías desarrolladas pueden aplicarse a cualquier tipo de fuente estacionaria, de forma que constituyen el soporte científico para la introducción de los modelos refinados en la propuesta para actualizar la regulación nacional sobre estudios de dispersión local de contaminantes. El desarrollo realizado puede aplicarse en otros países con condiciones similares a las de Cuba.

Materiales y métodos

El trabajo incluye la implementación de la metodología de Vías de Impacto (Ver Figura 1) para estudios de contaminación atmosférica en el país, combinando la modelación y la medición de emisiones y de calidad del aire. Es de destacar el desarrollo de la metodología para la introducción de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos al nivel del estado del arte, que contiene soluciones propias y las correspondientes herramientas de cómputo para su adaptación a las condiciones del país (Turtós y col., 2010a¹). Se destacan las soluciones para suplir las carencias de mediciones de aire superior en los modelos PCRAMMET⁺ y AERMET⁺, (pre-procesadores meteorológicos de ISCST3 y AERMOD, respectivamente), de capas digitales de uso de suelos y de otros datos requeridos por dichos modelos refinados.

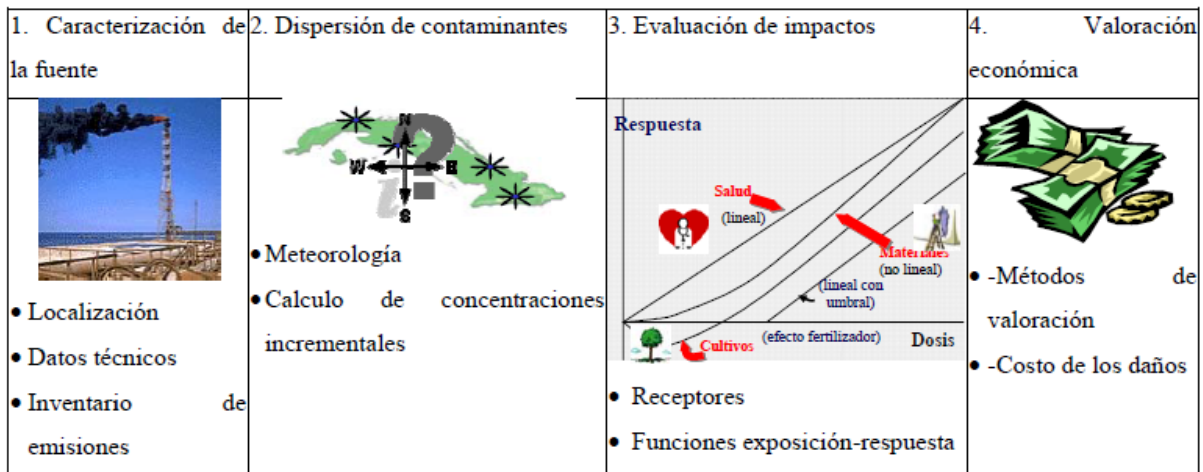


Figura 1. Etapas de la Metodología Vías de Impacto

El trabajo incluye también la implementación del modelo de pronóstico y diagnóstico meteorológico avanzado WRF (Weather Research and Forecasting) para la modelación de la circulación atmosférica en Cuba, tanto para el uso de sus resultados en ISCST3 y AERMOD, a través de un convertidor propio desarrollado (WRF→ fsl, Turtós y col., 20112), en modelos 3D como CALPUFF y en modelos fotoquímicos como CHIMERE (Turtós y col., 2013³).

Aunque enfocado a resolver los problemas de contaminación atmosférica local, el trabajo también incluye la escala regional y global. En la escala regional se

destaca la implementación del WMI (Gacita y col., 2005⁴) y CALPUFF (Fonseca y col., 2012⁵); y en la global, la evaluación de acciones de mitigación y adaptación al cambio climático en el sector energético (Turtós y col., 2010b⁶; Meneses y col., 2013⁷).

Evaluación de la implementación de los modelos refinados

La evaluación se realiza a través de dos estudios. El primero es un proceso de validación de los algoritmos incluidos en AERMET+; comparando sus resultados en el cálculo de altura de la capa de mezcla convectiva, Z_C (a partir solo de mediciones en superficie), con los obtenidos por AERMET (que emplea además los datos de aire superior) (Turtós y col., 2009⁸). Se obtuvieron resultados superiores a otras dos implementaciones similares, realizadas en Estados Unidos en el programa BREZEE y en Canadá por Lakes Environmental. En el segundo estudio, se validan los resultados de la modelación en la Empresa Pedro Soto Alba en Moa, con los valores medidos en dos estaciones de monitoreo continuo localizadas en el área de estudio.

Impactos de la contaminación atmosférica sobre la salud

El trabajo se enfocó a resolver la necesidad de contar con funciones exposición-respuesta relativas a los principales efectos sobre la salud de los contaminantes clásicos del aire (SO_2 , NO_2 y PM_{10}), adecuadas a las características de exposición, climáticas y socioeconómicas propias del país, de modo que permitan la realización a escala nacional de estudios de impacto en salud y de análisis de riesgo (Molina y col., 2003⁹). Se logró establecer los criterios para la selección de las funciones exposición-respuesta a usar en los estudios de externalidades nacionales y la región de América Central y el Caribe y determinar mediante un estudio de series temporales, la FER de mortalidad a corto plazo debido a PM_{10} .

Casos de estudio

(a) Aplicación del SEIA al sector energético del país. SEIA es un programa basado en la metodología Vías de impacto, que integra la estimación de emisiones, el procesamiento de datos meteorológicos, la dispersión local y regional de contaminantes usando los modelos ISCST3 y WMI respectivamente y la estimación de los impactos en salud y los costos ambientales (Turtós y col., 2006, 2007¹⁰). SEIA tiene tres versiones. La versión 1.0 fue aplicada para evaluar la contaminación atmosférica producida por las principales centrales termoeléctricas, CTE (Turtós y col., 2007¹¹) y grupos electrógenos, GE del país. La versión SEIA_CTE, se instaló en el 2007 en nueve CTE y permite obtener un registro de las emisiones e inmisiones de cada instalación en tiempo real.

(b) Estudio de las zonas críticas de Tula y Salamanca en México: Este estudio fue realizado como parte del proyecto "Evaluación de externalidades del sector de energía en las zonas críticas de Tula y Salamanca" (CEPAL y SEMARNAT, 2007¹²). Sus resultados soportaron la toma de importantes medidas de mitigación. Estas zonas son consideradas "críticas" porque en ellas se localizan una refinería y una gran central térmica.

(c) Medidas operacionales para la mitigación de la contaminación atmosférica provocada por Grupos Electrógenos. En el trabajo se evalúan medidas operacionales, a partir del análisis de las condiciones meteorológicas, la altura efectiva de emisión, la potencia de la instalación y la modelación en tiempo real.

(d) Otros casos de estudio de interés: Fábrica de Cemento Mariel, Industria metalúrgica en Nicaro, Refinería de Cienfuegos, Plantas de gas de Jaruco, Puerto escondido y Varadero, Fábrica de Tejas Infinitas en Camagüey, Centrales Termoeléctricas de Cienfuegos y Nuevitas.

Actualización del marco regulatorio

Se elaboró la Norma de Emisiones en fuentes fijas puntuales de instalaciones generadoras de electricidad y vapor NC TS 803: 2010¹³. Está en proceso de aprobación la sustitución de la norma vigente NC 93-02-202/1987: Calidad del Aire. Requisitos higiénicos sanitarios: Concentraciones Máximas Admisibles, alturas mínimas de expulsión y zonas de protección sanitaria; por dos normas desarrolladas en el marco de este resultado: (1) Metodología para modelar las afectaciones de la calidad del aire a escala local debido a las emisiones de contaminantes atmosféricos desde fuentes fijas; (2) Contaminantes-Concentraciones Máximas Admisibles y valores guías en zonas habitables.

Los resultados alcanzados en la implementación de los modelos refinados, permiten actualizar la regulación vigente para modelar la dispersión local de contaminantes atmosféricos, con un enfoque por niveles, que determina los esfuerzos requeridos según el caso de estudio. El *Nivel 1* representa un análisis simplificado. El *Nivel 2* implica un estudio refinado con el modelo ISCST3 y el *Nivel 3* con AERMOD, cuando la zona de estudio tenga topografía compleja. Si propone la introducción de CALPUFF para situaciones de meteorología compleja aunque no con propósitos regulatorios por su alta complejidad.

Conclusiones

1. La implementación, evaluación y aplicación de tres modelos refinados (ISCST3, AERMOD y CALPUFF) confirman su capacidad para simular la dispersión local de contaminantes atmosféricos en el país y consecuentemente resolver las insuficiencias que presentan las herramientas de modelación hoy establecidas.
2. Los programas de cálculo, modificados o desarrollados que se presentan, están disponibles para su uso sin costo alguno: PCRAMMET⁺ y AERMET⁺, módulos ProMet (incluyendo a *Meteo*) y ProISC del SEIA, *UsodeSuelos.xls*, *SD_Aermet*, archivos de automatización de las corridas de PCRAMMET+&ISCST3 y AERMET+&AERMOD y WRF-fsl.
3. Los programas de cálculo en tiempo real, como el SEIA, son una alternativa económica a los sistemas de monitoreo continuo de emisiones y calidad del aire.
4. Los estudios realizados han propuestos medidas novedosas para reducir las afectaciones a la calidad del aire, disminuir los impactos en salud y los costos ambientales, muchas de ellas introducidas

5. Se estableció una norma de emisiones para el sector energético y se proponen actualizaciones de la norma vigente en cuanto a modelación de la dispersión local de contaminantes, CMA y GCA.

Publicaciones y registros

- (1) Turtós L.; M. S. Gácita; J. Rivero; L. Curbelo; N. Díaz; E. Meneses Ruiz (2010a): Methodological guide for implementation of the AERMOD system with incomplete local data. Atmospheric Pollution Research 1 (2010) 102-111, ISSN: 1309-1042.
- (2) Turtós L.; G. Capote; Y. Fonseca, (2011): WRF-fsl: Post-Procesador de Salidas del WRF a formato fsl. CENDA, Registro 2757-2011.
- (3) Turtós L., G. Capote, Y. Fonseca, L. Álvarez, A. Bezanilla, I. Borrajero, M. S. Gácita, E. Meneses, S. Pire, 2013. Assessment of the WRF implementation in Cuba addressed to diagnostic air quality modeling. Atmospheric Pollution Research, 4(1), 64-74, ISSN: 1309-1042.
- (4) Sánchez Gácita M.; L. Turtós, J. Rivero Oliva (2005): Velocidades de decaimiento de contaminantes atmosféricos para mejorar la modelación simplificada de la dispersión regional, Nucleus, Vol 38, ISSN 0864 – 084X.
- (5) Fonseca Y., L. Turtós, G. Capote, E. Meneses, J. Rivero, (2012), Air quality study, comparison between the proposed and actual scenarios of generator sets in Havana, by using CALPUFF model, Air Pollution/Book 2, InTech. ISBN 979-953-307-592-0
- (6) Turtós L.; E. Meneses; W. Carrera; M. Zucchetti (2010b): Global warming vs local pollution. Challenges for a small island and developing countries. Fresenius Environmental Bulletin, FEB Vol.19. ISSN: 10184619
- (7) Meneses E.; L. Turtós; I. Berdellans; I. López; D. Pérez; M. Zucchetti; T. Alfstad (2013). Climate change and extreme events: vulnerability of energy systems in Cuba. Fresenius Environmental Bulletin, FEB/ Vol 22/ No 1/ 2013 – pages 74 – 80.
- (8) Turtós L.; J. Rivero; L. Curbelo; M. S. Gácita; E. Meneses; N. Díaz (2009): Method for the estimation of the convective mixing height aimed to atmospheric local dispersion modeling. Environmental Impact Assessments, ISBN: 978-1-60692-667-3, Nova Science Publishers, Inc.
- (9) Molina E., E. Meneses, 2003. Evaluación epidemiológica del impacto de los contaminantes del aire. Propuesta metodológica. Revista Cubana de Higiene y Epidemiología. 2003; 41(2-3) http://bvs.sld.cu/revistas/hie/vol41_2-3_03/hiesu2-3203.htm.
- (10) Turtós L.; M. S. Gácita; J. Rivero; N. Díaz; E. Meneses (2007): Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental de instalaciones energéticas, SEIA_CTE, SEIA 1.0., SEIA 2.0. CENDA, Registros 1-2006, 2-2006, 81-2007.
- (11) Turtós L.; E. Meneses; M. Sánchez; J. Rivero; N. Díaz (2007): Assessment of the impacts on health due to the emissions of Cuban power plants that use fossil fuel oils with high content of sulfur. Estimation of external costs. Atmospheric Environment 41 (2007) 2202–2213, ISBN 1352-2310
- (12) CEPAL y SEMARNAT (2007): Evaluación de externalidades ambientales del sector energía en las zonas críticas de Tula y Salamanca. CEPAL, LC/MEX/L.788/Rev.1.

(13) NC TS 803: 2010. Calidad del aire — Emisiones Máximas Admisibles de contaminantes a la atmosfera en fuentes fijas puntuales de instalaciones generadoras de electricidad y vapor.