



Congreso Nacional del Medio Ambiente
Cumbre del Desarrollo Sostenible

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Planes de acción locales para mejorar la calidad del aire y estudios de impacto ambiental apoyados en modelos de dispersión atmosférica

Autor: Allan Pierra Conde

Institución: Universidad de Burgos - Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba

E-mail: vtricio@ubu.es

Otros autores: Liban Montes de Oca (Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba); Roiki Rodríguez (Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba); Verónica Tricio (Universidad de Burgos); O. Cuesta (InsTEC e Instituto de Meteorología, Cuba)



RESUMEN:

En los últimos años se vienen utilizando diversas estrategias enfocadas a proyectos de Ciudades Saludables y en las Agendas 21 Locales, para enfrentar los problemas presentes y en parte derivados de la contaminación de las ciudades. En los países en vías de desarrollo los modelos de dispersión están siendo cada vez más usados y pueden ser muy útiles en evaluaciones de impacto ambiental, así como para apoyar la elaboración de planes de acción locales para mejorar la calidad del aire. Varias empresas privadas ofrecen versiones mejoradas de modelos gaussianos. Las mejoras incorporan interfaces amigables entre el ordenador y el usuario, facilitando la entrada y análisis de datos, el despliegue gráfico de los resultados y personalizando los resúmenes de resultados. Adicionalmente proporcionan apoyo técnico, e incluso algunas de estas empresas ofrecen entrenamiento en el uso de modelos. Algunos de los modelos (como ISC3 y AERMOD), son denominados como 'modelos preferidos' por la US EPA debido a que acreditan cumplir los criterios técnicos mínimos definidos por esa Agencia Ambiental, fueron probados en el terreno y extensamente revisados. En el presente trabajo se revisa del uso de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos en Estudios de Impacto Ambiental (EslA) como apoyo en los planes de acción locales para mejorar la calidad del aire en Cuba. Se expone la experiencia acumulada en dicho país en relación con estos estudios y se presentan resultados que sugieren la necesidad de revisar el procedimiento de los EslA y los planes de acción locales para mejorar la calidad del aire.



1. INTRODUCCIÓN.

En años recientes, en respuesta a las recomendaciones de la Agenda 21 de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, realizada en 1992 y los compromisos asumidos en la Cumbre de las Américas de 1994, la Organización Panamericana de la Salud junto con los esfuerzos de otros organismos multilaterales y bilaterales, ha promovido, coordinado y apoyado varias actividades relacionadas con la mejora de la calidad del aire, como por ejemplo, la eliminación del plomo en la gasolina. Los aspectos relacionados con la protección del medio ambiente atraen cada vez más la atención de investigadores en diferentes ramas e incluso de políticos, estos últimos comprometidos desde la Cumbre de Río a jugar un papel más protagónico desde su posición de decisores.

La solución a los actuales problemas medio ambientales constituye un paso fundamental para el desarrollo de la vida con sentido de sostenibilidad. La satisfacción de tal aspiración es condicionada en buena medida por la preservación de una atmósfera limpia dada la incidencia de este medio en la dinámica de la biosfera, resultando premisa indispensable el conocimiento de los mecanismos de incorporación de contaminantes al aire, sus tiempos de vida atmosférica, reacciones de combinación y vías de remoción entre otros aspectos, considerando que los enfoques del problema varían en dependencia del contexto espacial y temporal involucrado.

Aun cuando en los años 90 en países en vías de desarrollo se apreció una creciente preocupación por problemas asociados con la pérdida de calidad del aire, en la actualidad continúa siendo una realidad la escasez de conocimientos al respecto, sobre todo en lo referido a los procesos de remoción de contaminantes de la atmósfera y sus efectos en los ecosistemas, así como a los niveles de contaminación en centros urbanos, sus causas e incidencia en la calidad de vida.

En el caso específico de Cuba, en la actualidad se realizan esfuerzos para una paulatina modernización de la industria en general. No obstante, predominan los procesos basados en el uso de tecnologías atrasadas que representan importantes fuentes de contaminantes. Las actividades domésticas pueden constituir una causa importante de emisión para el SO_2 en áreas urbanas y otros asentamientos poblaciones donde se utiliza mayoritariamente combustibles fósiles como fuente de energía (Sánchez, P., *et al.* 2003). Otra fuente típica en el medio urbano es el transporte automotor, que se ha convertido en muchos países en causa principal de pérdida de la calidad del aire, aspecto ampliamente abordado en el Congreso Mundial sobre Contaminación del aire en Países en vías de desarrollo, celebrado en San José, Costa Rica (1996).

El crecimiento urbano y el desarrollo industrial han provocado serios problemas de contaminación atmosférica en los últimos decenios. La atmósfera de nuestras ciudades se ha convertido en un inmenso reactor químico en el que los gases contaminantes tales como compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno reaccionan en presencia de radiación solar para dar una gran variedad de nuevos productos contaminantes. Frecuentemente los contaminantes más perjudiciales no son únicamente los emitidos directamente por las fuentes que los originan (como el tráfico vehicular, por citar un ejemplo), sino los formados en la atmósfera por reacciones químicas entre las especies emitidas (más conocidas como



contaminantes primarios) y los componentes del aire, con ayuda de la radiación solar. Estas reacciones químicas dan origen a los denominados contaminantes secundarios entre los que podemos citar, por ejemplo el ácido nítrico o el ozono. En particular, la llamada niebla ácida o smog fotoquímico, los episodios de smog fotoquímico se han prologado en áreas densamente pobladas de todo el mundo.

En algunos casos las molestias típicas ocasionadas en la población (tales como irritación en los ojos o aumento de las enfermedades) se acompañan de una reducción sensible de la visibilidad.

Cuando se trata de estudiar la eficacia de los diversos medios de lucha contra la contaminación atmosférica, es importante conocer las relaciones que existen entre la emisión, transporte atmosférico y transformación de contaminantes. Y es aquí donde la modelación matemática de los procesos atmosféricos juega un papel importante al contribuir a cubrir el espacio que hay entre las observaciones de campo y la comprensión detallada de dichos fenómenos (Collazo, A., 2007).

2. TEORÍA SOBRE MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.

Las estimaciones de la calidad del aire, a escala local o regional, resultan necesarias para la implementación de normas regulatorias para el control de la contaminación atmosférica producidas por fuentes industriales. Estas estimaciones pueden efectuarse mediante el uso de diferentes tipos de modelos.

Para el cálculo de la dispersión de los contaminantes en la atmósfera existen tres sistemas teóricos fundamentales, a los cuales se han brindado múltiples soluciones numéricas para facilitar su aplicación práctica en estudios del impacto ambiental provocado por emisiones desde fuentes estacionarias. Estos sistemas son identificados en sus formas generales como: Modelo de la Similitud, (Monin, 1959), Modelo de Dispersión Gaussiano (Taylor, 1921), Modelo de Transporte–Gradiente o Modelo K, cada uno de los cuales presentan características que definen el principio de su campo de aplicación.

Uno de los parámetros más utilizados para estimar la estabilidad atmosférica es la *longitud de Monin-Obukhov*, la cual se define como la altura sobre el suelo a la que la producción de turbulencia por fuerzas mecánicas se iguala a la producción por las fuerzas de empuje (Seinfeld y Pandis, 1998). En los modelos de dispersión, la estabilidad se parametriza como funciones adimensionales (funciones de similitud) de la longitud de Monin-Obukhov. Se aplica en la capa superficial tanto para condiciones estables como inestables.

El Modelo Gaussiano de fuente puntual continua supone, como hipótesis de partida, que las concentraciones de contaminante en cualquier punto, considerado vientos abajo, están estabilizadas y no dependen del tiempo. Este modelo describe el comportamiento de los gases o vapores de fuerza ascensional neutra, dispersados en la dirección del viento y arrastrados a la misma velocidad.



El Modelo de transporte gradiente se basa en la hipótesis que la longitud de la mezcla y los flujos turbulentos de concentración y contaminantes se asumen proporcionales al gradiente medio de la concentración. La utilización de este modelo requiere una rigurosa evaluación de la turbulencia atmosférica en la capa superficial aspecto que ha sido abordado en Cuba por López (1984).

La importancia de los factores meteorológicos en el transporte y difusión de los contaminantes es bien conocida por los especialistas en la materia, y ha sido objeto de numerosas publicaciones en todo el mundo, especialmente en los países de más alto desarrollo tecnológico.

El control de la contaminación del aire requiere un monitoreo constante de la emisión los contaminantes primarios en las fuentes. Los controles incluyen, asimismo, conocer los cambios realizados o por realizar en los procesos industriales, así como en los tipos de combustibles, incluye también el control de los dispositivos que eliminan o disminuyen la salida hacia la atmósfera de materiales dañinos y otros.

En muchas ocasiones se le deja responsabilidad de la difusión a la propia atmósfera y sus mecanismos de auto purificación, a fin de que se reduzca el potencial de los efectos nocivos de las emisiones, sin embargo, en estos casos debe tenerse en cuenta que el poder difusivo de la atmósfera varía durante el ciclo diurno, cada día, de una estación a otra, e incluso, anualmente.

Según McCormick (1971), la evaluación de la concentración potencial a partir de una Fuente o grupo de fuentes es responsabilidad de los meteorólogos, y planteó las tareas principales que corresponde a los trabajadores de la meteorología en el problema de la contaminación atmosférica, entre las cuales podemos citar:

- 1) Evaluación de la efectividad de los controles para una fuente o grupo de fuentes.
- 2) Proveer la base analítica para el desarrollo de esquemas recontrol y estrategias relativas a alcanzar la razón costo-beneficio óptima cuando se relacionen con los procesos que ocurren en la atmósfera.
- 3) Pronosticar las distribuciones de la concentración de contaminantes en el aire para escalas temporales y espaciales significativas bajo condiciones normales de emisiones.
- 4) Interpretar las relaciones existentes entre las emisiones propuestas y/o reales con los valores admisibles en cuanto a la calidad del aire.

La atmósfera se encuentra en un constante movimiento turbulento, que bien puede ser la turbulencia mecánica debida al movimiento del aire y que es inducida cuando el aire pasa sobre o a través de edificios, árboles, carreteras accidentes del terreno, etc., y que se incrementa a medida que la rapidez del viento y la altura de los obstáculos aumenta, o bien la turbulencia térmica, que ocurre cuando el aire se mueve sobre la superficie es calentado desde abajo, o la combinación de ambos efectos, que es el caso más general. Es bueno recordar que incluso en presencia de un viento en calma en superficie, en otros niveles por



encima de la misma el viento sopla, y los procesos meteorológicos se encuentran en constante cambio.

De aquí que sea difícil confeccionar un conjunto complejo de ecuaciones que describan la atmosférica bajo todas las condiciones. Por otra parte no existe una expresión matemática de la turbulencia que sea aceptada universalmente, sin embargo utilizando conceptos estadísticos derivados de la dinámica de los fluidos, se han obtenido ecuaciones para uso general.

Existen muchos modelos teóricos y semiempíricos que trata de solucionar el problema del transporte y difusión de los contaminantes atmosféricos, entre los cuales podemos citar el llamado modelo gaussiano, que es el que ha tenido una divulgación más amplia. Otro modelo que ha sido ampliamente utilizado para realizar simulaciones del transporte de contaminantes atmosféricos considerando largas distancias es el llamado de bocanada (puff).

En la antigua Unión Soviética, se pudo instrumentar un reglamento de aplicación obligatoria (Berlyand, 1975) al proyecto de toda obra capaz de contaminar el ambiente. Esta metodología fue desarrollada en el Instituto Geofísico Principal de Leningrado por el profesor M. E. Berlyand y sus colaboradores, imponiendo para su aplicación la condición de terreno plano o superficie inclinada con pendiente tan suave que pueda considerarse plana.

En Cuba, como resultado del tema de investigación "Estudio de métodos de pronóstico a largo plazo de la contaminación producida por centros industriales", se obtuvieron metodologías para el pronóstico del polvo y gases (Álvarez, *et al.* 1978), siguiendo la metodología de Berlyand, que aportan las siguientes variantes:

1. Para partículas mayores que 0.5 micrones se obtuvo una fórmula integrando la ecuación de Stokes para calcular el alcance de las partículas, y se incluyeron métodos estadísticos para el cálculo de las concentraciones.
2. Para partículas menores de 0.5 micrones y gases se utiliza la fórmula del profesor Berlyand (1975) con la modificación que introduce una matriz de valores de frecuencia de vientos y que la convierte en una fórmula analítico-estadístico.

Estas fórmulas presentan ventajas para su aplicación en Cuba debido a que, trabajando con viento real procesado en frecuencias, representa más fidelidad para nuestras condiciones tropicales. Además, dan una representación más real de la verdadera distribución en un lugar dado (Álvarez, *et al.* 1978) permitiendo un empleo más racional de la superficie terrestre alrededor del centro industrial.

Sin embargo aún con estas modificaciones el modelo está solo limitado a regiones llanas o ligeramente onduladas, además de no tener en cuenta algunos parámetros típicos de la capa fronteriza planetaria.

Por su fundamento teórico el modelo de Berlyand no es capaz de considerar muchas variables que definen el comportamiento de la atmósfera y consecuentemente la dispersión



de los contaminantes. Las isólineas de concentración resultantes de este modelo son una réplica bastante aproximada de la rosa de los vientos (la dispersión de los contaminantes es determinada por la dirección y la velocidad del viento), utilizando también una constante de estratificación térmica que no refleja totalmente el comportamiento de la estabilidad atmosférica.

El uso del modelo de transporte gradiente K en la antigua Unión Soviética, a pesar de que requiere de una integración numérica compleja, pudo ser resuelto analíticamente con algunas simplificaciones (Curiel, 1990), lo cual permitió establecer los modelos de regulación en la antigua URSS y en Cuba, a partir de los cuales pueden hacerse estimados confiables (25-30% de error) de la dispersión de impurezas sin necesidad de estudios detallados de las construcciones urbanas (Berlyand 1975, Szepesi, 1989).

Los modelos de calidad del aire se dividen en dos tipos generales, a saber: fuentes-orientados, y receptor-orientados. Los del primer tipo tratan los contaminantes del aire a medida que se trasladaron desde la fuente hasta el receptor (Drake, *et al.* 1979). Existe una gran cantidad de modelos y clases de modelos. En general estos modelos aceptan como entrada las características de emisión de los contaminantes y producen estimados de las concentraciones en el aire o bien el material depositado sobre la superficie. Estos resultados sirven para analizar el impacto y los efectos de los contaminantes sobre los receptores, el tiempo y el clima (Szepesi, 1989).

La utilización de los modelos de simulación de la calidad del aire para estimar los costos sociales de las emisiones y realizar comparaciones con la disminución de los costos se ha acrecentado en los últimos tiempos, así como para la toma de decisiones por parte de organizaciones estatales o productivas (Szepesi, 1989).

Los modelos de simulación de la calidad del aire han sido categorizados de forma diferente por distintos autores, y dentro de cada uno de ellos podemos encontrar modelos que parten de hipótesis diversas con respecto al sistema de referencia a utilizar, de aquí que algunos se referían a sistemas de referencia Eulerianos, Lagrangianos, e incluso mezclados ambos tipos.

(Szepesi, 1989) los diferenció con fines prácticos en ocho clases de categorías: (a) determinativos simples; (b) estadísticos; (c) de penacho; (d) de caja y multicaja; (e) de diferencias finitas y redes; (f) de partículas, (g) físicos, y (h) regionales.

Los modelos determinísticos simples, estadísticos y de diferencias finitas y redes utilizan el sistema de referencia Euleriano, mientras que los modelos físicos y de partícula utilizan sistemas de referencia mezclados. En el resto de las clases de modelos podemos encontrar sistemas de referencia de uno u otros tipos (Álvarez, O., 1991).

La norma cubana que trata el tema, en lo referente a los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos, no ha cambiado en los últimos 20 años y no refleja los últimos avances de la ciencia en la modelación de la dispersión (Turtós y Roque, 2006). La consideración de los modelos que hoy no son previstos en la norma cubana: el SCREEN3



(US EPA, 1995) para estudios de sondeo, el ISCST3 (Paine, R., *et al.* 1997), el ISC-PRIME (Paine, R., *et al.* 1997) y el AERMOD (Cimorelli, A.J., *et al.* 2002), para estudios locales detallados, entre otros; permitirán valoraciones más representativas que deben introducir en el país la aplicación de modelos que están al nivel del estado del arte internacional.

3. EXPERIENCIA CUBANA EN EL USO DE LA MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN EN ESTUDIOS LOCALES DE IMPACTO AMBIENTAL.

Los primeros trabajos realizados en Cuba sobre la modelación de contaminantes atmosféricos según la bibliografía estudiada comienzan en la década de los setenta y ochenta del siglo pasado, asociados a los planes de desarrollo industrial los cuales requerían de los estudios locales sobre la contaminación atmosférica producida por la industria minero metalúrgica y de perforación y explotación del petróleo. Posteriormente se han generalizados a otras industrias y se han extendido a la evaluación de la influencia sobre la salud humana y en el medio ambiente.

En Cuba se manifiestan problemas de contaminación atmosférica tanto en los niveles local y regional como global, que sin alcanzar la magnitud de los del agua y el suelo (perceptible a simple vista) requieren de las actividades de evaluación y control que permite la implantación de medidas (Curiel, 1990, Álvarez, O., 1991).

En el nivel local los problemas derivan, en lo fundamental, de ubicaciones relativas incorrectas entre las fuentes expulsoras de contaminantes y zonas de viviendas, motivos, entre otros aspectos, por la no ejecución de estudios locales de la meteorología del aire y la correspondiente preparación de pronóstico de los niveles de concentración y su control en estaciones de monitoreo (Curiel, 1990).

Entre los primeros autores que trabajan relacionados con la modelación de la dispersión de contaminantes en nuestro país tenemos a Álvarez, R. (1976), López, C. (1978), Bonito, I. (1992), Curiel, L. (1990), Álvarez, O., (1991). Más recientemente y relacionados con estudios de calidad del aire podemos citar a Collazo, A. (1999), Cuesta, O. (2000), Turtós, L. (2000), Wallo, A. (2003), Pierra, A. (2004), Govín, M. (2004), Sánchez, A. (2005), Rodríguez, D. (2007), Núñez, V. (2007) y Montes de Oca, L. (2008a, b) entre otros. Algunos de estos autores han realizados trabajos aplicados a los estudios locales de impacto ambiental y también sobre aspectos teóricos y prácticos para mejorar la modelación y por último también se ha trabajado sobre las transformaciones químicas que los contaminantes pueden tener en nuestras condiciones tropicales (Collazo, A., 2007).

En Cuba, se ha trabajado en diversos proyectos de investigación vinculados a la contaminación atmosférica, así lo muestran los resultados hallados en años recientes que muestran datos experimentales y de utilización de técnicas de modelación de la dispersión de los contaminantes, con el fin de evaluar la calidad del aire (Cuesta, O., *et al.* 2000 y 2001).

Otros resultados a destacar son el comportamiento de diferentes contaminantes como los compuestos del azufre y el nitrógeno, tanto a nivel nacional como en la Ciudad de

La Habana, a través de su análisis cualitativo (Wallo, A., *et al.* 2002). Con más profundidad se ha logrado caracterizar este comportamiento en las zonas aledañas a la Bahía de La Habana a través del uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en los siguientes trabajos: (Wallo, A., *et al.* 2003, 2004a, b) y (Sánchez, P. *et al.* 2004a, b).

En el ámbito provincial corresponde a la tesis presentada en opción al Título Académico de Master en Ciencias Meteorológicas. (Sánchez, A. 2005) con el estudio correspondiente al comportamiento de las Infecciones Respiratorias Agudas (IRA) y Asma Bronquial (AB), su relación con el tiempo, clima y contaminación atmosférica en el municipio de Pinar del Río, se analizaron los datos climáticos y los mapas meteorológicos de superficie correspondientes al mismo período, por otro lado, se estudió el efecto de la contaminación atmosférica apoyados con el uso de modelos de dispersión atmosférica Rodríguez, D. (2007). También se destacan los trabajos realizados por Núñez, V. (2007) y colaboradores en la región central de Cuba. En el oriente cubano los trabajos realizados por Pierra, A. (2004) y colaboradores, también están orientados a los estudios locales de impacto ambiental.

4. CASO DE ESTUDIO EN EL USO DE LA MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN ESTUDIOS LOCALES DE IMPACTO AMBIENTAL.

Estudios realizados para conocer la influencia de la contaminación atmosférica sobre la salud humana en el municipio Regla de la Ciudad de La Habana muestran que las crisis agudas de asma bronquial durante el período 1998-2005 (Figura 1) han presentado una disminución, presentando su valor más elevado en enero de 1998, es de significar que se mantienen los máximos en el período poco lluvioso del año y los mínimos en el lluvioso (Wallo, A., 2005; Wallo A. y Cuesta, O., 2006).

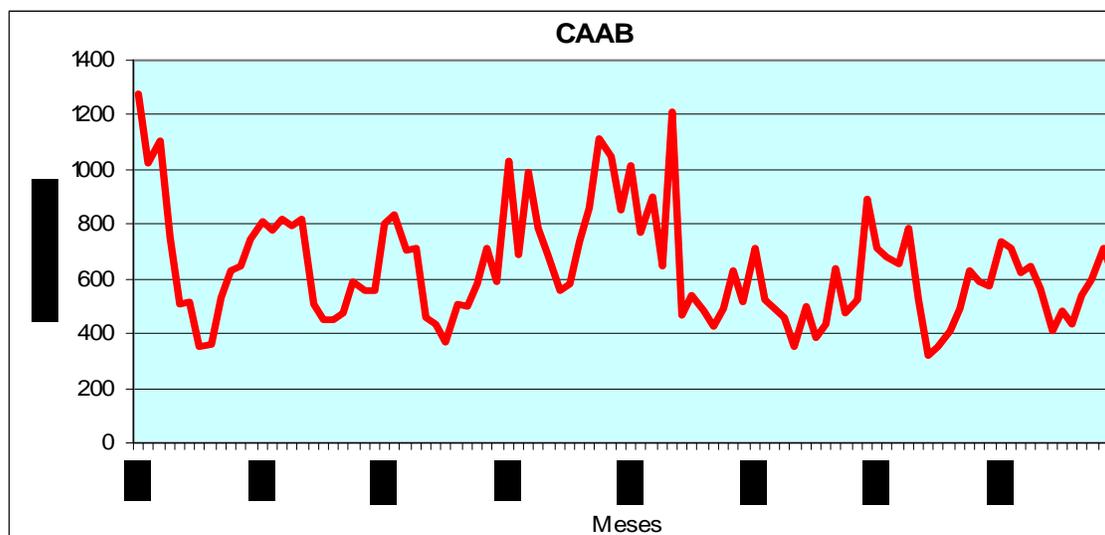


Figura 1. Crisis agudas de asma bronquial en el municipio Regla durante el período 1998-2005.

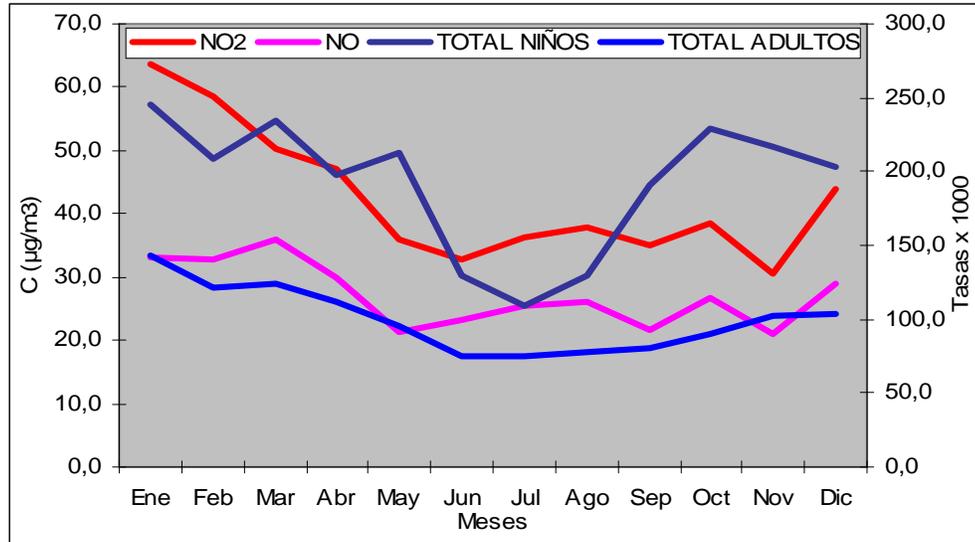


Figura 2. Compuestos de nitrógeno y crisis agudas de asma bronquial.

Al comparar los compuestos del nitrógeno (Figura 2) con las crisis de asma en niños y adultos se puede apreciar que las máximas concentraciones tanto del dióxido como del monóxido de nitrógeno ocurren durante el período poco lluvioso del año, al igual que la mayor cantidad de crisis agudas de asma bronquial (Cuesta *et al.* 2003; Wallo, 2005).

Las partículas suspendidas totales en Regla presentan las concentraciones más altas, al igual que en los compuestos gaseosos antes estudiados en el período poco lluvioso del año coincidiendo con la máxima ocurrencia de las crisis agudas de asma bronquial (Figura 3).

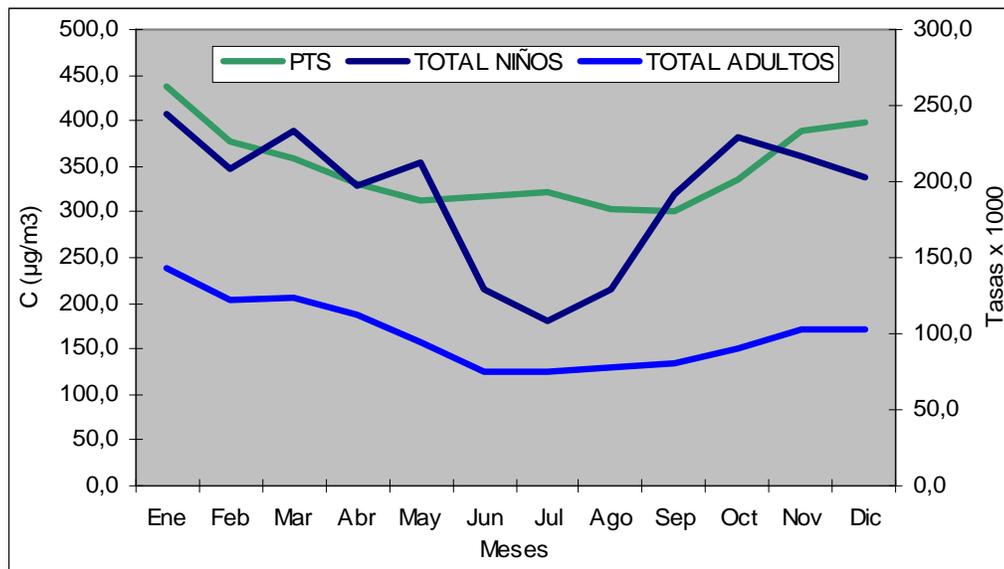


Figura 3. Partículas Totales Suspensas y crisis agudas de asma bronquial.

Aplicación del Índice de Calidad del Aire (ICA).

Al aplicar el ICA (NC 111: 2002) en el estudio del NO₂ de forma anual (Tabla 1) podemos ver que en la categoría de calidad del aire deficiente ocurrió la mayor cantidad de días en el período comprendido entre los años 1998 al 2000, ocurriendo el máximo durante 1998 con 277. Durante el 2002 comienzan a aparecer un mayor número de días en la categoría mala, ocurriendo la mayor cantidad de estos durante el 2003 con 89 además de 61 en la pésima y 27 en la crítica, los únicos que se registraron durante todo el período estudiado. En el total de todos los años la mayor ocurrencia se ubicó en el nivel deficiente con 1007. Por lo que durante este lapso de tiempo prevaleció la posibilidad general de la aparición de ligeros incrementos en los efectos adversos de la contaminación atmosférica sobre la población en general y en especial en la afectada por el asma. Es precisamente durante el último año donde pudieron darse las situaciones de alerta y emergencia ambiental (Cuesta *et al.* 2005).

Tabla 1. Días observados en las diferentes categorías del ICA para el NO₂ en Regla (Anual).

Índice	Categoría	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Total
0-79	Buena	14	45	19	131	100	101	410
80-99	Aceptable	71	120	91	127	153	11	573
100-199	Deficiente	277	198	254	104	98	76	1007
200-299	Mala	3	2	2	1	14	89	111
300-499	Pésima	0	0	0	2	0	61	63
>500	Crítica	0	0	0	0	0	27	27



Valores similares fueron obtenidos para las partículas totales en suspensión (PTS), que fue otro de los contaminantes muestreado en el Municipio Regla.

El uso de los SIG permitió la representación espacial de toda la información y el estudio de los riesgos a la salud asociados a la calidad del aire y las condiciones ambientales, primeramente se calcularon los mapas referentes a la prevalencia del asma bronquial, para los años 1998 y 2002. Para el año 1998 la prevalencia resultó más elevada en los consultorios de los médicos de la familia de la localidad de Regla fundamentalmente en su área central urbana alcanzando valores entre 12% y 16% y por encima de este último. En Casablanca (al norte) la prevalencia más elevada se sitúa entre 8% y 12%, en el centro de la localidad. Para el 2002 se mantiene la zona central urbana de Regla como la más afectada con valores entre 15% y 17.5%, existiendo una prolongación de estas áreas hacia la zona del anillo del puerto y la Vía Blanca, además del emboque de Regla. En Casablanca la zona de prevalencia más elevada se mantuvo al igual que durante el año 1998 en la zona central de la localidad entre 12.5% y 15%, aunque su extensión disminuyó con relación al año antes tratado. De forma general la máxima prevalencia se alcanzó en la zona urbana de Regla con valores entre 15% y 17.5%, durante el 2002, esto coincide con igual comportamiento en 1998. En este último año el rango más elevado estuvo entre 13% y 16%. En Casablanca la prevalencia siempre se comportó por debajo de la obtenida en Regla.

Al aplicar los modelos de dispersión de contaminantes y montar esta capa sobre la referente a la prevalencia del asma bronquial se observa que para el NO_2 calculado para el año 1998 existen concentraciones elevadas de este contaminante, su máximo se sitúa en los $320 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que coinciden con zonas de elevada prevalencia de asma bronquial en la zona central urbana de la localidad del Regla, por lo que estas poblaciones con alto % de asmáticos son más susceptibles a los efectos que puedan provocar altas concentraciones de contaminantes en esta zona (Figura 4).

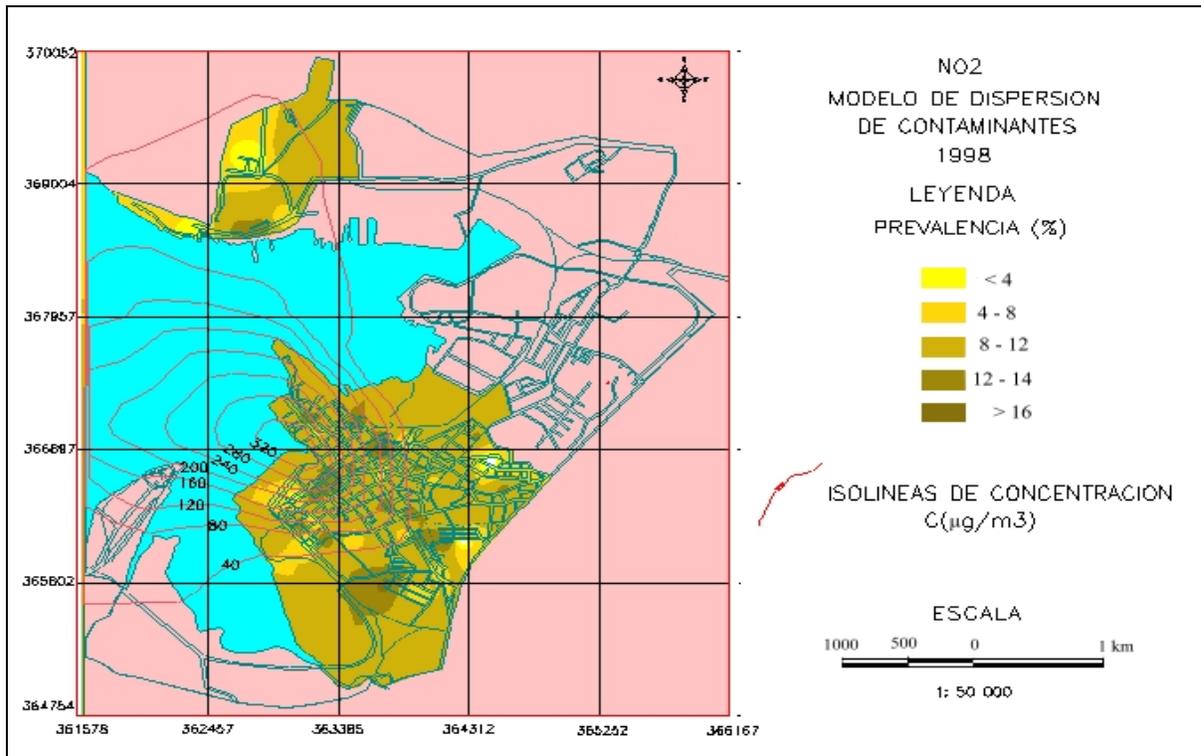


Figura 4. Relación de los niveles de NO₂ con la prevalencia de asma bronquial.

También se calculó el ICA para el polígono experimental a través de los datos obtenidos en los tres puntos de monitoreo, mediante el trazado de isolíneas, la localidad de Regla resulta la más afectada en cuanto a su calidad del aire, encontrándose en la zona central urbana de la misma valores del índice por encima de 100, o sea, por encima de la Concentración Máxima Admisible (Cma) y ubicándose dentro de la categoría de deficiente, pudiendo producirse un ligero aumento en la frecuencia y severidad de efectos adversos tanto agudos como crónicos en la población en general y personas de alta susceptibilidad. También hacia la zona periférica de este asentamiento existe otra zona con un valor del índice entre 80 y 100 comenzando el deterioro de la calidad del aire con la posible aparición de efectos leves en individuos o grupos de alta susceptibilidad, correspondiendo a la categoría de calidad del aire aceptable como se muestra la Figura 5 correspondiente al período poco lluvioso del año 2002; Casablanca se ubica completamente en la categoría buena con valores del índice por debajo de 40 (Figura 5).

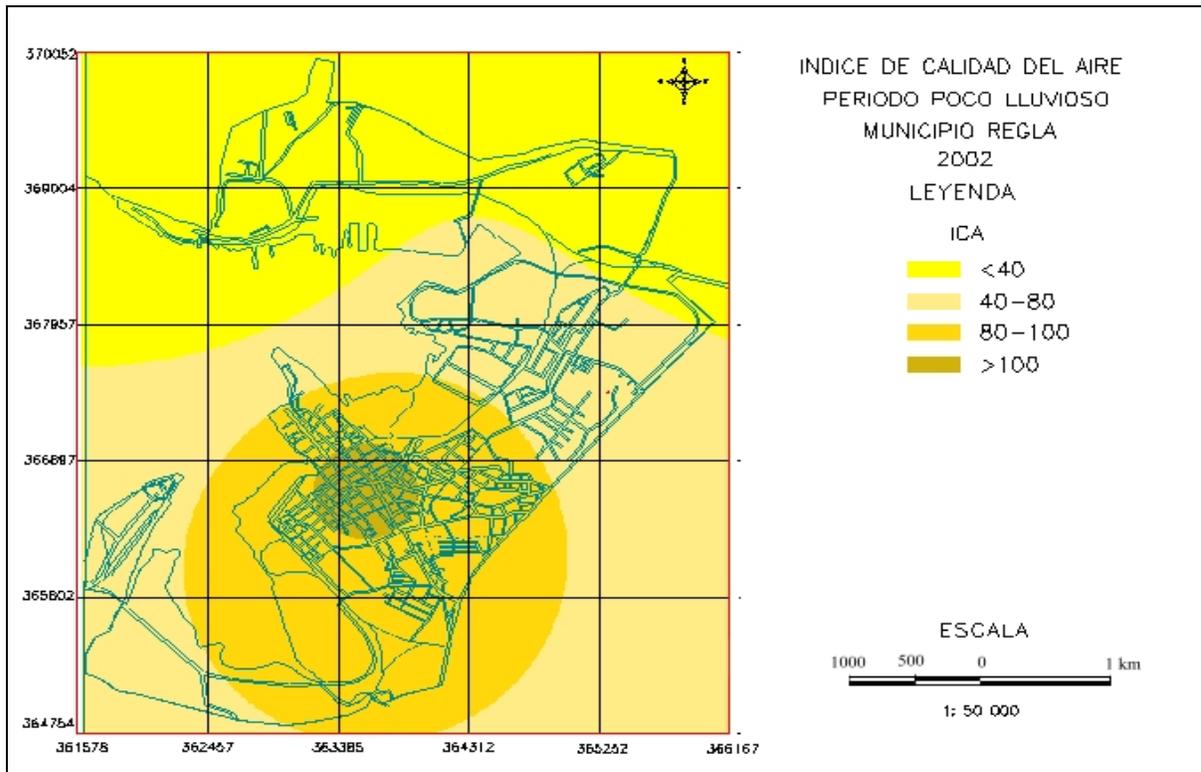


Figura 5 Cálculo del ICA para el período poco lluvioso (2002).

Al realizar el montaje de las capas del ICA y la prevalencia de asma mediante la aplicación de la técnica de Proceso Analítico Jerárquico (por sus siglas en inglés, AHP), se calcularon los mapas resultantes en el SIG, representándose las zonas en el polígono experimental donde existe la posibilidad de una mayor ocurrencia de crisis agudas de asma bronquial producto de la influencia de la contaminación atmosférica sobre los enfermos de esta patología, la región urbana central de Regla fue la que presentó el nivel de riesgo alto, localizándose el medio en el resto de esta localidad y hacia la periferia de la misma, este nivel también se observa en la zona central de Casablanca, el nivel bajo se observó en prácticamente toda Casablanca, excepto el área antes mencionadas y pequeñas zonas periféricas de Regla. Estas zonas de riesgo son las más propensas a que se produzcan crisis agudas de asma bronquial como resultado de la influencia de la calidad del aire sobre las personas que padecen de asma, en el caso de Casablanca puede haber una mayor influencia de las condiciones climáticas, como puede observarse en la Figura 6 perteneciente al período lluvioso del año 1998 (Wallo, 2005; Wallo y Cuesta, 2006).

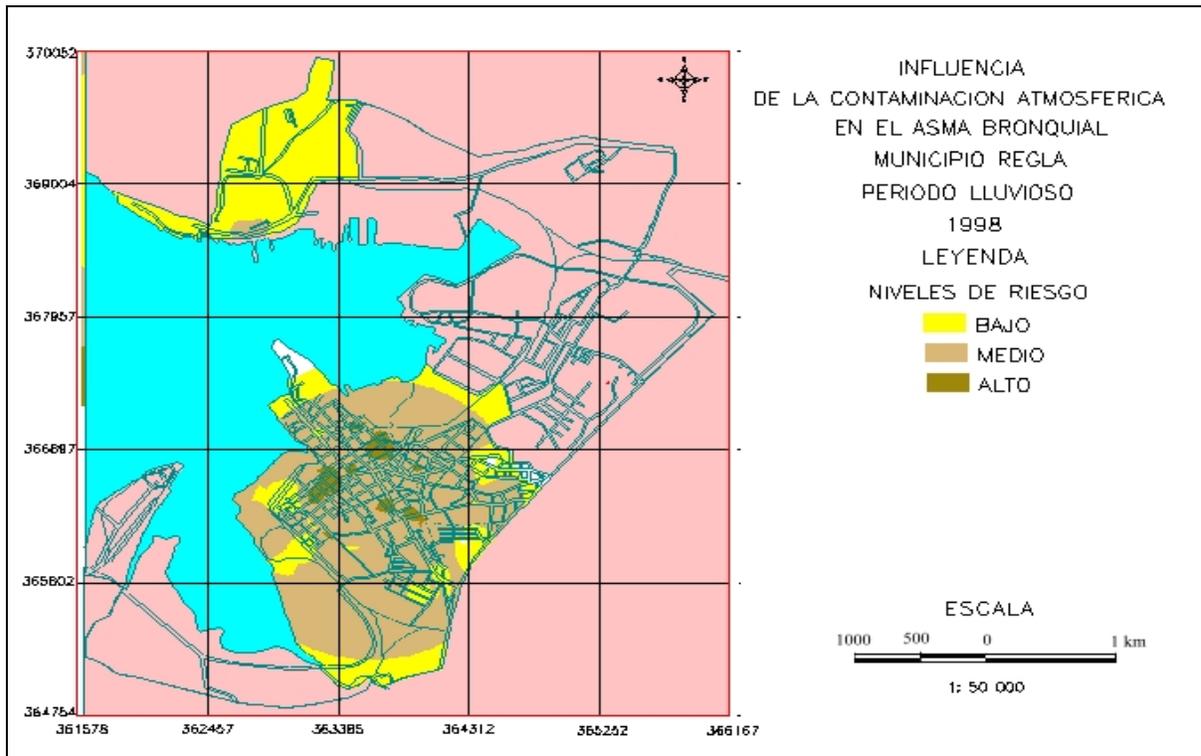


Figura 6. Estudio de riesgo asociado a la influencia de la calidad del aire sobre el asma bronquial, período lluvioso (1998).

El conocimiento detallado de la prevalencia del asma bronquial y de los índices de calidad del aire permitió establecer los niveles de riesgos asociados a la calidad del aire en el municipio Regla con el fin de establecer las medidas necesarias para mitigar los efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud humana. La modelación de la dispersión de contaminantes fue un aspecto importante para lograr estos resultados aplicados al riesgo de la contaminación del aire sobre la salud humana.

5. EXPERIENCIA ACUMULADA Y PROPUESTA DE GUÍA PARA USO DE MODELOS.

Debido a la importancia que tiene la modelación de la dispersión de contaminantes atmosféricos diversos especialistas cubanos encabezados por Leonor Turtós, del colectivo de Cubaenergía ha propuesto una Guía para la aplicación de estos modelos en nuestro país con el fin de lograr que los estudios locales de calidad del aire presenten mayor rigor y estén a la altura del estado del arte internacional.

La presente Guía tiene como objetivo proponer cuales metodologías y modelos deben ser usados en el país para la modelación de la dispersión de los contaminantes atmosféricos. La Guía resume las experiencias adquiridas durante la ejecución de los proyectos "Generalización de experiencias y ampliación de capacidades para la planificación



integral del desarrollo electroenergético” y “Externalidades ambientales atmosféricas de la generación eléctrica”, ambos desarrollados como parte del Programa Nacional de Desarrollo Energético Sostenible, por investigadores y especialistas de:

- Cubaenergía,
- Centros de Contaminación y Química Atmosférica y de Física de la Atmósfera del Instituto de Meteorología, INSMET,
- Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE),
- Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET),
- Unión Eléctrica (UNE) y la Empresa de Ingeniería para la Electricidad (INEL) del Ministerio de la Industria Básica,
- Instituto Nacional de Higiene y Epidemiología (INHEM),
- Dirección de Economía del MINSAP.

La consideración de modelos que hoy no son previstos en la Norma Cubana que trata el tema: el SCREEN3 para estudios de sondeo, el ISCST3, el ISC-PRIME y el AERMOD para estudios locales detallados, el CALPUFF para estudios regionales de corto alcance (entre 50 y 300 km), y el CALINE para fuentes lineales; entre otros; permitirán valoraciones más representativas que introducen en el país la aplicación de modelos que están al nivel del estado del arte internacional (Turtós, L. *et al.* 2004).

La Guía proporciona la visión necesaria en los enfoques de modelación recomendados y la consistencia en los métodos de modelación. También se propone aprovechar toda la experiencia adquirida en el país en el uso del modelo de Berlyand, tanto para estimar las concentraciones instantáneas como los promedios diarios, dándole su lugar en el esquema de evaluación por niveles, específicamente en los niveles de sondeo.

La Guía proporciona los detalles sobre como realizar un estudio de modelación exitoso incluyendo:

- Bases de los modelos y su aplicabilidad
- Selección de los modelos y enfoque del estudio
- Enfoque por niveles para la valoración del cumplimiento de las normas vigentes
- Requerimientos de Datos de Entrada para los modelos
- Información Geográfica
- Datos Meteorológicos requeridos y su adquisición
- Información a incluir en un estudio

Modelos recomendados o preferenciales

Los modelos recomendados son modelos estándares que se espera sean usados para los estudios de calidad del aire. La presente Guía recomienda de forma inmediata el uso de los modelos SCREEN3 y Berlyand para análisis de sondeo en dos niveles de análisis y el ISCST3 y el ISC-PRIME para estudios detallados a escala local, según el enfoque de análisis por niveles en la Figura 7 (Turtós, L. *et al.* 2004). Se considera imprescindible ejecutar los estudios detallados considerando la elevación real de los receptores, la deposición seca de contaminantes gaseosos y partículas y la deposición húmeda de partículas. Los estudios realizados demuestran el impacto de tener en cuenta estas opciones en la modelación.

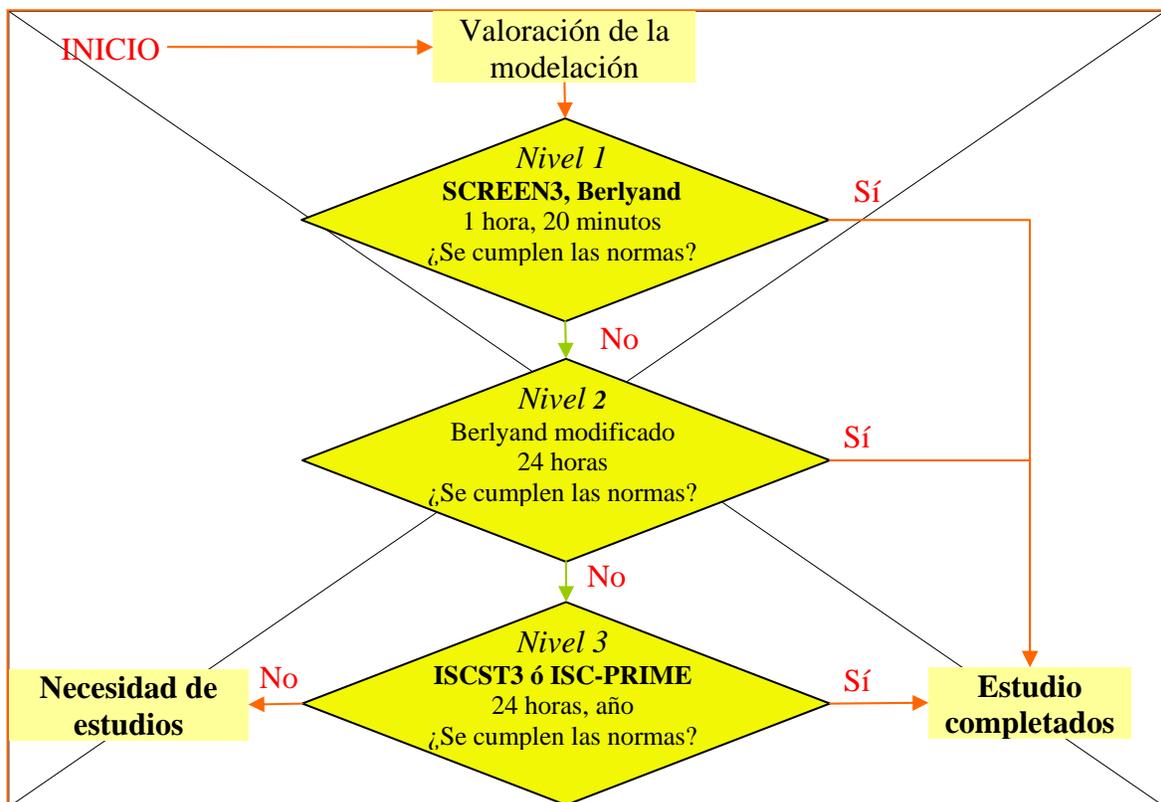


Figura 7. Enfoque por niveles.

Se recomienda se continúen los trabajos de asimilación y de preparación y/o modificación de programas auxiliares, con el objetivo de valorar el posible uso del AERMOD para los estudios detallados a escala local y el modelo CALPUFF para estudios regionales de corto alcance. La principal dificultad para el uso del AERMOD es que necesita datos de aire superior y actualmente en el país no se realizan estas mediciones y no se han desarrollado metodologías aproximadas que permitan su uso.



Se recomienda se continúen los trabajos para definir el modelo a usar para modelar fuentes lineales asociadas al transporte. El CALINE y el CAL3QHCR se recomiendan como de uso alternativo en tanto no se realicen estudios más profundos con ambos modelos.

A manera de conclusiones tenemos que por la importancia que tienen los trabajos relacionados con la dispersión de contaminantes en la atmósfera aplicados a los Estudios de Impacto Ambiental se debe continuar asimilando las características teóricas y prácticas de cada uno de los modelos más adecuados para su aplicación en base al objetivo requerido en cada estudio específico.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Agencia Española de Cooperación y Desarrollo (AECID) por la financiación parcial (Proyecto A/8114/07).

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

1. Álvarez, R., (1976): Estudio de la dispersión de contaminantes en la atmósfera de Cuba. Tesis en opción al Grado científico de: C.Dr. en Ciencias Físico- matemáticas, IFA, Moscú.
2. Álvarez, R. *et al.*, (1978): Diagnóstico de la contaminación del aire en la zona de Nicaro, (inédito) Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.
3. Álvarez, R., (1978): Estudio de las variaciones del polvo ambiente de acuerdo con los cambios en la humedad relativa como resultado de observaciones realizadas en Cuba. Informe Cient-técnico. Instituto de Meteorología, La Habana.
4. Álvarez, R. y colaboradores, (1980): Diagnóstico y pronóstico de la contaminación del aire en la zona industrial de Nicaro. Informe de resultado. Revista CEMACC. No. 5.
5. Álvarez, R. *et al.*, (1987): Método mejorado para el pronóstico de la contaminación por gases producida por un centro industrial en la atmósfera tropical. Memorias del Forum del Instituto de Planificación Física (IPF).
6. Álvarez, R. *et al.*, (1990): Diagnóstico y pronóstico de la contaminación del aire en la zona minero-metalúrgica de Moa. Informe de Resultado, Instituto de Meteorología, ACC, 200 p.
7. Álvarez, O., Sánchez R., y Alvares, R., (1989): Aplicación del método de Berlyand-Álvarez de transporte de contaminantes gaseosos en condiciones tropicales, II, Software de aplicación. Informe Científico técnico. Instituto de Meteorología. La Habana
8. Álvarez, O., (1991): Diagnóstico y Pronóstico de la contaminación del aire por SO₂ y H₂S en Moa. Modelación con consideraciones de terreno plano. Tesis de Doctorado, La Habana.
9. Berlyand, M. E., (1975): Problemas actuales de la difusión atmosférica y la contaminación de la atmósfera [en ruso]. Guidrometeoizdat, Leningrado, 448 pp.
10. Bonito LA., (1992): Modelos para el cálculo de monóxido de carbono en avenidas. En: Contaminación del aire y salud. Serie Salud Ambiental, No. 2. La Habana. Instituto



- Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología. México D.F. Ciencias Médicas. 1992, 79-91.
11. Cimorelli, A.J., S.G. Perry, A. Venkatram, J.C. Weil, R.J. Paine, R.B., Wilson, R.F. Lee, W.D. Peters, R.W. Brode, J.O. Paumier, (2002): AERMOD: Description of Model Formulation. U.S. EPA, EPA-454/R-02-002d.
 12. Collazo, A; y López, C., (1999): DISPERS Versión 2.0. La Habana.
 13. Collazo, A. (2007): Modelación de las transformaciones químicas a escala local del SO₂ a sulfato. Tesis en opción a Master en Ciencias Meteorológicas, La Habana, Cuba.
 14. Cuesta, O., et al., (2000): Caracterización del medio ambiente atmosférico en la ribera este de la bahía de La Habana. Informe Científico técnico, INSMET, pp. 226, La Habana.
 15. Cuesta, O., et al., (2001): Caracterización del medio ambiente atmosférico en la zona de la ribera este de la bahía de la Habana. Informe técnico. Instituto de Meteorología, pp 94.
 16. Cuesta, O., A. Wallo, A. Collazo, A. Arriba, M. González, R. Labrador, P. Sánchez y G. Ananías, P. Ortiz, A. León, V. Guevara, A. Campos y M. Sardiñas, R. Iglesias y E. Gattorno, (2003): Enfermedades respiratorias y calidad del aire en la zona de la ribera este de la Bahía de La Habana. Memorias publicadas en el Congreso Iberoamericano de Meteorología, 2003. La Habana. ISSN 959-270-014-1.
 17. Cuesta Santos, O.; Wallo, A.; Collazo, A. y Castellanos, P., (2005): Contaminación atmosférica en el Municipio Regla: Aplicación del Índice de Calidad del Aire (ICA). Revista Cubana de Meteorología, Vol 12, No. 1, 2005, pp 38 – 44.
 18. Curiel; L. D., (1990): Diagnóstico y pronóstico de la contaminación por SO₂ en la Ciudad de Matanzas. Tesis Doctor en Ciencias Técnicas. I.S.P. de Matanzas.
 19. Drake, R. L., D. J. McNaughton, y C. Huang, (1979): Available air quality models, Appendix D., EPRI – 1131, Electric Power research Institute, Palo Alto, CA., USA.
 20. GEOCIUDADES – LA HABANA, La Habana, 2005.
 21. Govín, M., (2004): Modelación de la dispersión de contaminantes de la refinería Níco López. Política de mitigación. Tesis en opción al título de “Master en Saneamiento Ambiental” en el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría, La Habana, Cuba.
 22. López, C. M., (1978): Factores meteorológicos en la propagación de contaminantes del aire en la Ciudad de la Habana, Informe Científico-Técnico No.46, INSMET, ACC.
 23. López, C. M., (1984): Factores meteorológicos de la contaminación regional en Cuba. Tesis de Doctor en Ciencias Geográficas. La Habana.
 24. López C., Álvarez R., Amaro L., Cuesta O., Sánchez P. y otros, (1988): Diagnóstico y pronóstico de la contaminación atmosférica en la zona de desarrollo petrolero de Varadero – Cárdenas. Informe final Científico Técnico. pp. 60, Instituto de Meteorología, La Habana.
 25. McCormick R. (1971): Air pollution in the locality of buildings. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond, A. 269, 515 – 526, 1971.
 26. Monin, A. S., (1959). The theory of locally isotropic turbulence. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 125:515-518.
 27. Montes de Oca, I., Rodríguez, R., Pierra, A., Cuesta, O., Tricio, V., (2008): Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la elaboración de planes de acción locales para mejorar la calidad del aire y estudios de impacto ambiental: estudio de caso. Congreso Conama9, Cumbre del Desarrollo Sostenible, Madrid, España.



28. Montes de Oca, L., Pierra, A., Tricio, V., (2008). Emission inventory for sources of ozone precursors at local level: Case study Moa. Quadrennial Ozone Symposium, QOS2008. Tromso, Norway.
29. NC 111: 2002: Calidad del aire. Reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, 2003.
30. NC 93-02-202, 1987 (actual NC 39:1999, NORMA CUBANA, Sistema de Normas para la protección del Medio Ambiente, ATMÓSFERA, Requisitos higiénicos sanitarios: Concentraciones máximas admisibles, alturas mínimas de expulsión y zonas de protección sanitaria. Comité Estatal de Normalización.
31. Núñez Caraballo, V., A. Moya Álvarez, R. Rodríguez Rojas, R. Osés Rodríguez, Y. Castro, M. Purón Arbolaez, I. Martínez Pérez, I. Herrera Moya, (2007): Minimización de impactos ambientales a través de pronósticos de calidad del aire como método de control de emisión de MP10 de fuentes fijas. CD Memorias IV Congreso Cubano de Meteorología, La Habana.
32. Paine, R.J. and F. Lew, (1997): Results of the Independent Evaluation of ISCST3 and ISC-PRIME, EPRI Paper No. TR2460026, WO3527-02, Final Report, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA 94304.
33. Pierra, A., I. Casals y L. Montes de Oca, (2004): Modelación de emisiones de partículas debidas al transporte de mineral en minas a cielo abierto. En www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar17/HTML/articulo05.htm.
34. Rodríguez, D., (2007): Sistema Automatizado de Gestión de Información sobre Fuentes Contaminantes (SAGIFC). Tesis en opción al grado de master en nuevas tecnologías para la educación. Pinar del Río. Cuba.
35. Sánchez, A., (2005): Comportamiento de las Infecciones Respiratorias Agudas (IRA) y Asma Bronquial (AB), su relación con el tiempo, clima y contaminación atmosférica en el municipio de Pinar del Río. Cuba. Tesis presentada en opción al Título Académico de Master en Ciencias Meteorológicas.
36. Sánchez P, A. Wallo, A. Roque, I. Rivero, D. Pérez, O. Cuesta, A. Collazo y E. Echevarria, (2004a): Evaluación del medio ambiente atmosférico en el municipio Habana Vieja y su repercusión en la salud. Resultado Científico Técnico, Instituto de Meteorología.
37. Sánchez, P., A. Wallo, A. Roque, O. Cuesta, A. Collazo, E. Echeverría, (2004b): Condiciones meteorológicas y calidad del aire en el municipio Habana Vieja. Convención Trópico 2004, ISBN 959- 7167-02-6.
38. Seinfeld J. H. and S. N. Pandis, (1998): Atmospheric chemistry and Physics, from Air Pollution to Climate change, John Wiley, New York.
39. Situación Ambiental de Cuba 2004. La Habana, 2005.
40. Szepesi, D. J., (1989): Compendium of regulatory air quality simulation models. Akademiai Kiado. Budapest, Hungria.
41. USEPA, (1995): SCREEN3 Model User's Guide, EPA-454/B-95-004. Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC.
42. Taylor, G. I., (1921). Diffusion by Continuous Movements. Proc. London Math. Soc. 20:196.
43. Turtós L., Díaz Rivero N., (2003): Modelación de la dispersión local de contaminantes atmosféricos en terrenos complejos, Contribución a la Educación y la Protección



- Ambiental, Volumen 4, IX, Taller, 2003, ISBN 959-7136-20-1: 278- 285, Revista electrónica Ecosolar abril-junio 2003, ISBN 1028-6004.
44. Turtós L., Meneses R., Díaz Rivero N., Roque A., Álvarez L., (2004): Implementación de opciones complejas en la modelación de la dispersión local de contaminantes atmosféricos y su influencia en la estimación de las Externalidades, Memorias del IV Congreso Internacional Geomática.
 45. Turtós L., Meneses R., Díaz Rivero N., Roque A., Álvarez L., Soltura, R., Cuesta, O., Collazo, A. Álvarez, O. Pire, S. Martín, S. Molina, E. Padrón, A. y Rabelo, L. (2004): Propuesta de Guía para realizar los estudios de dispersión local de contaminantes gaseosos y partículas. Informe Técnico, Cubaenergía, La Habana, Cuba.
 46. Wallo, A., O. Cuesta, R. Manso, A. Collazo, P. Sánchez, (2002): Aplicación de un SIG en el análisis cualitativo de la contaminación atmosférica en las ciudades. Boletín Sometcuba, Septiembre 2002. Vol. 8 No 2, ISSN 1025-921X.
 47. Wallo, A., O. Cuesta, P. Sánchez, A. Collazo, (2003): Aplicación de un SIG en el estudio de la calidad del aire en la bahía de La Habana. Taller internacional "Informática y Geociencias". GEOINFO 2003, ISSN 1028-8961.
 48. Wallo, A., O. Cuesta, P. Sánchez, A. Collazo, (2004a): Uso de los sistemas de información geográfica para el estudio de la calidad del aire en la bahía de La Habana. Revista Cubana de Meteorología Vol. 11 No.1 2004.
 49. Wallo, A., O. Cuesta, P. Sánchez, A. Collazo. (2004b): Aplicación de un SIG en el estudio del comportamiento de los compuestos NO₂, NH₃ y SO₂ en la Bahía de La Habana. Convención Trópico 2004, ISBN 959- 7167-02-6.
 50. Wallo, A., (2005): Evaluación del medio ambiente atmosférico y su influencia en la salud humana mediante el uso de los sistemas de información geográfica. Tesis Doctor en Ciencias Meteorológicas, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.
 51. Wallo A. y Cuesta O., (2006): Análisis espacial de riesgo relacionado con la influencia de la calidad del aire sobre el asma bronquial en el municipio Regla, mediante la aplicación de SIG. Revista Cubana de Meteorología, Vol. 13, No 2, 2006.