



---

## Metodología para el diseño de una red de monitoreo para la calidad del aire. Aplicación para la ciudad de Piura

### Methodology for designing an air quality monitoring network. Application for the city of Piura

JHICENIA RIVERA MINAYA<sup>1\*</sup>, ODÓN SANCHEZ CCOYLLO<sup>1</sup> & ERIC CONCEPCIÓN GAMARRA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), Casilla 1308, Lima 11, Perú

<sup>2</sup> Ministerio del Ambiente (MINAM), Av. Javier Prado Oeste 1440, Lima 27, Perú

\*[jriveram@senamhi.gob.pe](mailto:jriveram@senamhi.gob.pe)

---

#### RESUMEN

En este estudio se presenta la metodología para el diseño de un sistema de vigilancia de la calidad del aire, compuesto por una red de monitoreo en la ciudad de Piura.

Dicha metodología considera los parámetros establecidos en el método ECO/OPS así como los factores propios de la zona como accesibilidad, seguridad y servicios. También se aplicó el modelo químico WRF-Chem para la simulación de los contaminantes (material particulado PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>). Asimismo, se realizó un diagnóstico de la calidad del aire utilizando métodos activos de los contaminantes de partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>, los cuales excedieron a su correspondiente estándar de calidad ambiental para el aire (ECA). En base a los resultados obtenidos se propone la implementación de tres estaciones automáticas para el monitoreo de la calidad del aire y tres estaciones meteorológicas automáticas: dos estaciones en el distrito de Piura y una estación en el distrito de Castilla. Con esta implementación del sistema de vigilancia, las autoridades podrán contar con información sobre el deterioro de la calidad del aire urbano y poder planificar las acciones necesarias para prevenir o disminuir las consecuencias de dicho deterioro.

**Palabras Claves:** Contaminación atmosférica, área urbana, red de monitoreo, áreas de influencia, ciudad de Piura.

#### ABSTRACT

This study presents the methodology for designing a system for air quality monitoring, made for a monitoring network in the city of Piura. This methodology considers the parameters established by the ECO/PAHO method, as well as the specific factors of the area, such as accessibility, security and services. Also, we applied the WRF-Chem chemical model for the simulation of pollutants (particulate matter PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>). In addition, a diagnosis of the air quality was made using active methods of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> particulate pollutants, which exceeded their corresponding environmental air quality standards (EQS). Based on these results we propose the implementation of three automatic stations for monitoring air quality and three automatic weather stations: two stations in Piura district and one station in Castilla district. With this implementation of the surveillance system, authorities will have information available on the deterioration of urban air quality and they would be able to plan the necessary actions to prevent or lessen the consequences of such deterioration.

**Keywords:** Air pollution, urban area, monitoring network, catchment area, Piura city.

## INTRODUCCIÓN

Debido al alto grado de contaminación atmosférica en muchos centros urbanos, resulta necesario implementar acciones para mejorar la calidad del aire y proteger la salud de la población. Para ello se necesita monitorear la calidad del aire. El monitoreo atmosférico recurre a un conjunto de metodologías para la toma de muestras del aire para analizarlas y procesarlas de forma permanente con el fin de conseguir la información necesaria sobre las concentraciones de los “contaminantes criterio” (Korc 1999 & UNEP/WHO 1994).

La población de Piura está experimentando los efectos de una creciente contaminación del aire, especialmente en la capital y alrededores donde se concentran la mayor parte de la población y también del parque automotor; por lo que la cuenca atmosférica es receptora de altos niveles de contaminantes gaseosos, metales tóxicos, entre otros. Su ubicación en pleno desierto costero hace que gran parte de las partículas suspendidas por acción de los vientos sean transportadas a las zonas suburbanas creando núcleos de contaminación (SENAMHI PERÚ 2006).

Para diseñar una red de monitoreo de calidad del aire en una ciudad se pueden aplicar diferentes metodologías. Algunas son válidas para fuentes de emisión puntuales y otras para fuentes areales. Noll et al. (1977) han utilizado una metodología cuantitativa para determinar el número total y la ubicación de estaciones de monitoreo de calidad del aire basada en modelos de dispersión atmosférica, datos meteorológicos y métodos estadísticos. Noll & Mitsutomi (1983) han presentado una metodología de selección de lugares de muestreo de calidad de aire, ordenándolos de acuerdo con la capacidad de cada uno de ellos para evaluar el nivel de concentración originado por la exposición a contaminantes del aire cerca de las fuentes de emisión. Langstaff et al. (1987) han desarrollado un método objetivo de diseño de redes de monitoreo de calidad del aire y aplican esta metodología al diseño de una red de monitoreo destinada a evaluar la exposición horaria al benceno en aire en la región sudeste del valle del río Ohio (EE.UU.). Haas (1992) ha presentado una metodología de diseño de una red de monitoreo que optimiza la combinación de la minimización de errores de predicción, la minimización de costos, la estimación de la varianza y el aumento de la probabilidad de detección de violaciones de las normas de calidad del aire. Oehlert (1996) elabora una guía para optimizar la magnitud de una red de monitoreo de calidad del aire basada en consideraciones estadísticas. Esta metodología proporciona resultados cualicuantitativos de la información perdida por la inoperatividad temporal de diferentes muestreadores de una red de monitoreo. Wu & Chan (1997) presentaron un estudio comparativo de tres redes de monitoreo de SO<sub>2</sub> en aire en Hong Kong (China). También identificaron el efecto de algunos factores (condiciones meteorológicas, distancias a las fuentes, emisiones locales) en la variabilidad espacio-temporal de los datos de calidad del aire y presentaron algunas consideraciones sobre la futura racionalización de redes de muestreo. Mazzeo & Venegas (2000) desarrollaron un método objetivo destinado a determinar el número y la ubicación de muestreadores de calidad del aire que puedan detectar altas concentraciones medias horarias de un contaminante en aire en el entorno de una fuente puntual, utilizando un modelo de dispersión atmosférica. Tseng & Chang (2001) desarrollaron un método destinado a la reubicación de estaciones de monitoreo de calidad del aire en una ciudad localizada en el sur de Taiwán. Venegas & Mazzeo (2003b) desarrollaron un método basado en la aplicación de un modelo de dispersión atmosférica con el objeto de diseñar una red de monitoreo de calidad del aire en Copenhague (Dinamarca).

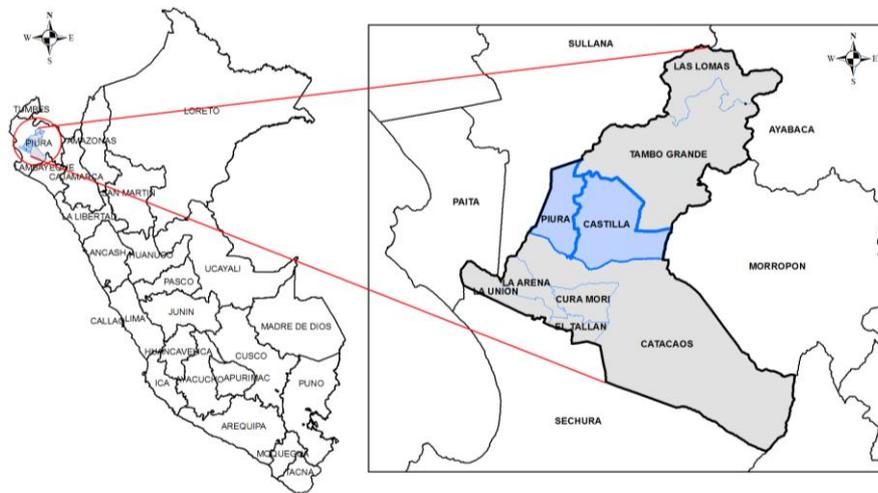
El monitoreo del aire es un medio importante para identificar y hacer frente a los problemas que impactan a la salud y al ambiente causados por la contaminación atmosférica. El monitoreo de la calidad del aire proporciona las bases científicas necesarias para desarrollar políticas y estrategias, establecer objetivos y planificar acciones de control de la contaminación. Su aplicación se mejora e incrementa como parte de un procedimiento destinado a gestionar la calidad del aire cuando se utiliza conjuntamente con modelos de calidad de aire e inventarios de emisiones.

El objetivo del presente estudio es establecer el diseño de una red de monitoreo de la calidad del aire en el departamento de Piura, específicamente en los distritos de Piura y Castilla, a través de una metodología adaptada para la zona de estudio y asimismo evaluar las variables que intervienen en dicha zona de acuerdo al método aplicado.

## AREA DE ESTUDIO

La ciudad de Piura se encuentra localizada en la costa noroeste del Perú y es la capital del departamento y provincia de Piura; abarca un área de 670 hectáreas. En la Figura 1 se muestra el mapa de localización del área de estudio. La cuenca atmosférica de Piura está comprendida por dos distritos: Piura y Castilla. Estos distritos tienen la mayor densidad poblacional de la provincia y alberga todo el movimiento comercial y social de Piura. La población del área de estudio alcanzó, según el último censo (2007), 450 363 habitantes y para el año 2010 se estima que dicha población haya alcanzado los 461 807 habitantes. La cuenca atmosférica de Piura posee una topografía poco variada con pocos accidentes geográficos. El territorio es predominantemente desértico por encontrarse influenciada por el anticiclón del océano Pacífico sureste. Asimismo, es atravesado por el valle del río Piura, principalmente. Al sur y al oeste la cuenca está limitada por el desierto de Sechura, que es el desierto más cálido y relativamente seco y el más extenso en el Perú. Al norte y noreste está limitada por tablazos, bosques secos y la terraza fluvial formada por el río Chira. Al este se encuentra limitada por los Andes, donde la cordillera presenta uno de sus puntos más bajos en todo el Perú. La altitud promedio del área de estudio de los dos distritos es de 27 msnm.

**Mapa de Localización de la Zona de Estudio**



**Fig. 1.** Área de estudio de la cuenca atmosférica de Piura (distritos de Piura y Castilla).

## MATERIALES Y MÉTODOS

De acuerdo al objetivo del estudio para el diseño de la ubicación de los sitios de monitoreo se ha aplicado la metodología del Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud ECO/OPS (1997). En el proceso de elección de los sitios de monitoreo se han considerado los siguientes aspectos: i) tipos y fuentes de emisiones (industriales, vehiculares, de área, etc.), ii) inventario de emisiones (fijas y vehiculares), iii) factores topográficos, iv) factores meteorológicos de circulación atmosférica (velocidad y dirección de los vientos superficiales y de altura), v) estudio de línea de base del monitoreo de los contaminantes, realizado por DIGESA/SENAMHI, vi) densidad poblacional, vii) actividad económica de la población y viii) aplicación y simulación del modelo químico WRF-Chem (Weather Research and Forecasting model) de la calidad del aire.

También fue importante considerar algunos criterios de ubicación para los sitios de monitoreo (ECO/OPS 1997): i) representatividad del área, posibilidad de comparar los datos con los demás puntos, utilidad durante el tiempo de estudio, permanente accesibilidad al sitio, ii) seguridad de los equipos contra robo y vandalismo, iii) disponibilidad de energía eléctrica (solo para monitoreos activos y automáticos), iv) disponibilidad del servicio de internet y v) disponibilidad de acondicionamiento (por ejemplo: aire acondicionado para estaciones de monitoreo automático) en condiciones extremas de temperatura.

Asimismo, para comparar los resultados de un monitoreo con las normas internacionales de calidad del aire, la distribución espacial y el número de sitios de monitoreo deben ser representativos para el área de estudio. Además, la ubicación geográfica de los sitios de monitoreo se deben definir en función de los objetivos planteados en el diseño de la red y acorde al área de estudio (ECO/OPS 1997).

## INVENTARIO DE EMISIONES

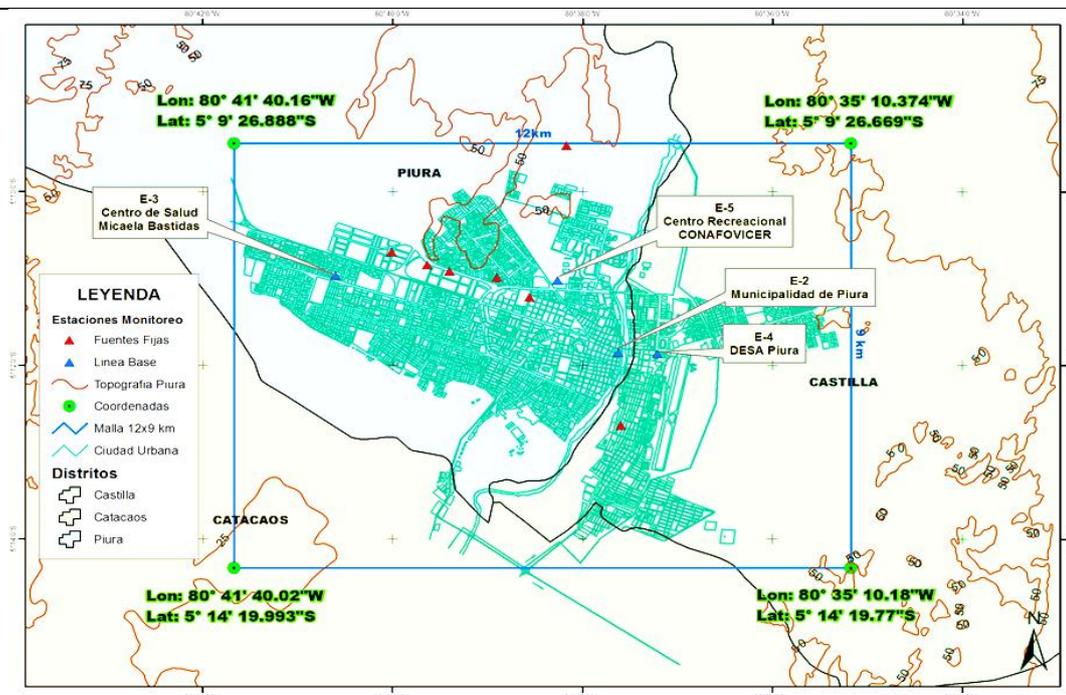
Las emisiones de contaminantes se dividen en fuentes antropogénicas, denominadas así porque provienen de las actividades realizadas por el hombre, y fuentes naturales, consecuencia de variados fenómenos que ocurren in situ.

En la ciudad de Piura se ha incrementado las emisiones de contaminantes antropogénicas por un incremento significativo de las actividades industriales, comerciales y del parque vehicular, entre otras, como consecuencia de la migración urbana y el crecimiento económico que impulsa el desarrollo de servicios asociados (transporte, vivienda, comercio).

Según los estudios realizados por el GESTA (2005) las mayores emisiones de origen antropogénicas de agentes contaminantes provienen de las fuentes móviles. En la Tabla 1 se presentan las emisiones estimadas, tanto de las fuentes fijas, como de las móviles.

**Tabla 1.** Inventarios de emisiones de contaminantes del aire en la ciudad de Piura (2005). GESTA (2005).

Fuentes	Emisiones (t.año <sup>-1</sup> )					
	PTS	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	COV	Pb
Fijas	548335	286 658	57 194	920 831	1 920 447	0
Móviles	428 318	2 109 822	4 710 514	22 728 494	5 203 710	12 150
<b>Total</b>	<b>976 653</b>	<b>2 396 480</b>	<b>4 767 708</b>	<b>23 649 325</b>	<b>7 124 157</b>	<b>12 150</b>



**Fig. 2.** Ubicación de las fuentes fijas y estaciones de monitoreo, ubicados en los distritos de Piura y Castilla, con la delimitación del el área de estudio y sus coordenadas geográficas.

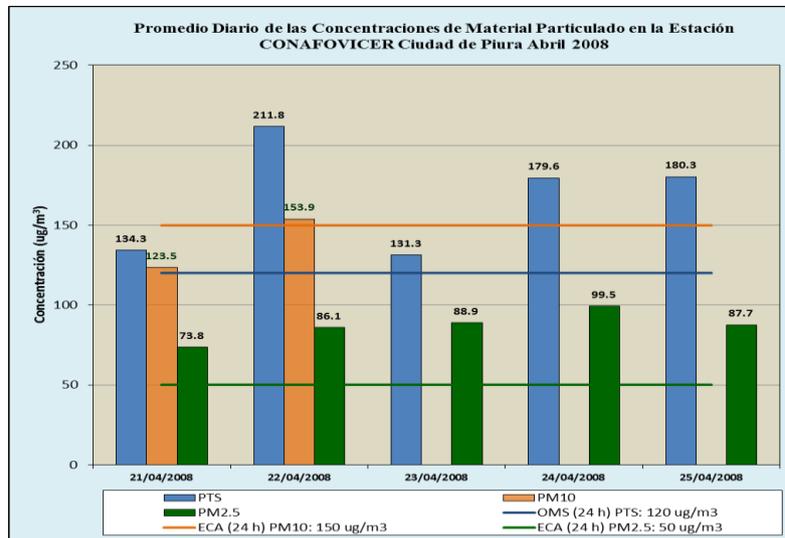
En la Figura 2 se presenta la ubicación de las fuentes industriales (fijas) y los 4 puntos de monitoreo de la calidad del aire, como línea de base para el estudio (establecidos en las campañas de monitoreo de calidad de aire realizado por DIGESA-SENAMHI, 2008, 2009 y 2010); se muestra también la topografía del lugar dentro de la zona de estudio (Piura y Castilla), su delimitación y sus coordenadas.

## MONITOREO DE LÍNEA BASE

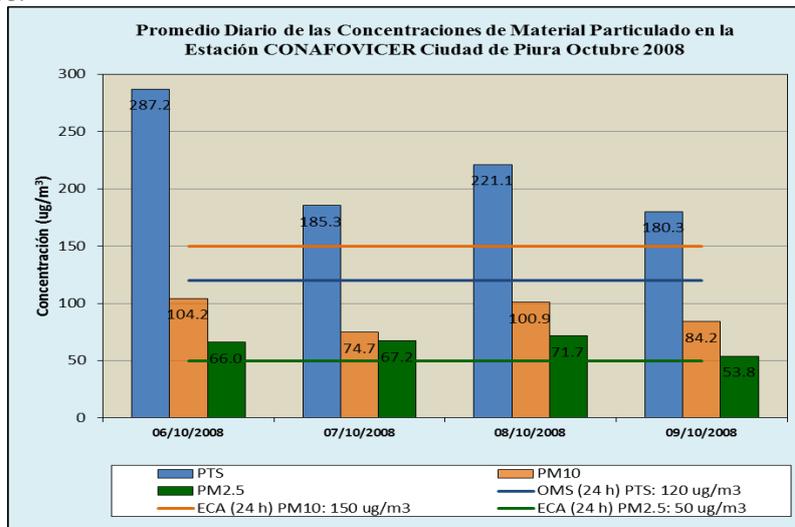
Para la evaluación de la calidad del aire en el área de estudio (Piura y Castilla) se seleccionaron 4 estaciones de muestreo: E-2 Municipalidad de Piura (Piura), E-3 Centro de Salud *Micaela Bastidas* (Piura), E-4 DESA-Piura (Castilla) y E-5 Centro Recreacional CONAFOVICER (Figura 2).

En las Figuras 3 y 4 se muestran los resultados del promedio diario de las concentraciones del material particulado (PTS) menores a 2,5 micrómetros (< 2,5 micrómetros PM<sub>2,5</sub>) y menores a 10 micrómetros (< 10 micrómetros PM<sub>10</sub>). Las PTS (<40-50 micrómetros) si bien constituyen un contaminante criterio, son importantes para asociarlas a un comportamiento estacional.

En la Figura 3 se observa que las partículas totales en suspensión (PTS=212 µg.m<sup>-3</sup>) sobrepasaron en un 75% los estándares referenciales de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (24 h=120 µg.m<sup>-3</sup>).



**Fig. 3.** Promedio diario de las concentraciones de Material Particulado (PTS, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>) en la estación E-5, abril del 2008.

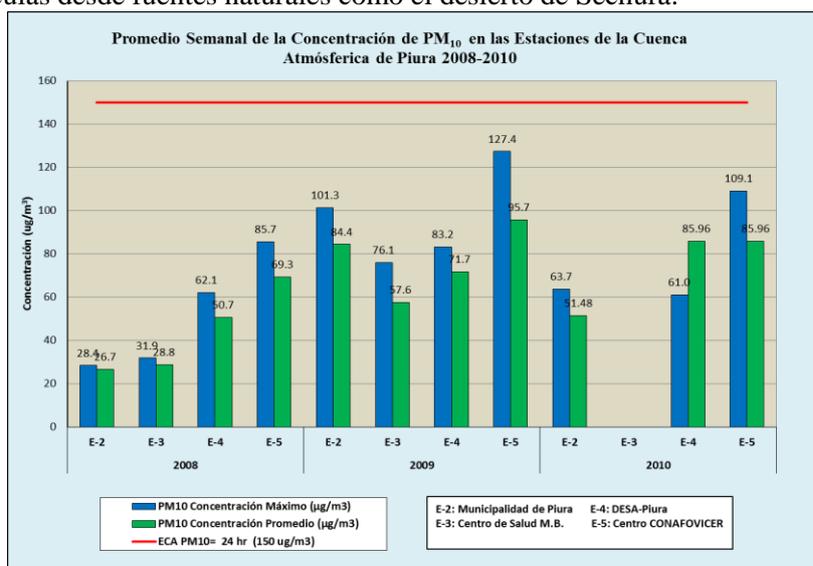


**Fig. 4.** Promedio diario de las concentraciones de Material Particulado (PTS, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>) en la estación E-5, octubre del 2008.

Asimismo, las partículas menores a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>=154 µg.m<sup>-3</sup>) sobrepasaron en 3% los estándares de la calidad ambiental para el aire (ECA) (24 h=150 µg.m<sup>-3</sup>). Las partículas menores a 2,5 micrómetros (PM<sub>2,5</sub>=99,5 µg.m<sup>-3</sup>) sobrepasaron en un 99% los ECA (24 h=50 µg.m<sup>-3</sup>). (Figura 4).

En cambio, los promedios diarios de las concentraciones de las partículas totales en suspensión (PTS=287 µg.m<sup>-3</sup>) sobrepasaron en un 100% los estándares referenciales de la OMS). Las partículas menores a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>=104 µg.m<sup>-3</sup>) no sobrepasaron los ECA. Mientras las menores a 2,5 micrómetros (PM<sub>2,5</sub>=72,0 µg.m<sup>-3</sup>) sobrepasaron en un 44% los ECA (24 h=50 µg.m<sup>-3</sup>) (Figura 4). Estos valores obtenidos indican que concentraciones de material particulado de acuerdo a los resultados obtenidos en las dos campañas (abril y octubre 2008, Figuras 2 y 3) se puede dar debido a la ubicación de la estación (E-5) que está situada al suroeste de la zona industrial y al sureste de la zona comercial, donde se tiene la influencia de estas dos fuentes

antropogénicas, asimismo por constituirse en las zonas más expuestas a los vientos del suroeste que arrastran partículas desde fuentes naturales como el desierto de Sechura.



**Fig. 5.** Promedio semanal de las concentraciones de PM<sub>10</sub> en las 4 estaciones de la cuenca Atmosférica de Piura.

Los resultados del promedio semanal anual (2008, 2009 y 2010) de las concentraciones de material particulado menores a 10 micrómetros PM<sub>10</sub> en µg.m<sup>-3</sup>, se presentan en la Figura 5. En el año 2009, se registraron los valores más altos de material particulado en las estaciones E-5 (PM<sub>10</sub>=127 µg.m<sup>-3</sup>) y E-2 (PM<sub>10</sub>=101 µg.m<sup>-3</sup>), seguido del año 2010 en la estación E-5 (PM<sub>10</sub>=109 µg.m<sup>-3</sup>) y E-4 (PM<sub>10</sub>=86 µg.m<sup>-3</sup>), el valor más bajo se registró en el año 2008 en la estación E-2 (PM<sub>10</sub>=28,4 µg.m<sup>-3</sup>).

Las concentraciones de partículas PM<sub>10</sub> (< 10 micrómetros) del comportamiento anual en las 4 estaciones mencionadas no sobrepasan el ECA (150 µg.m<sup>-3</sup> para 24 horas) (Figura5).

### CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA

Para el monitoreo de superficie se utilizaron los datos de las estaciones meteorológicas automáticas. Las variables meteorológicas (viento [dirección, velocidad], humedad relativa, temperatura, radiación solar y precipitación) se han interpolado para la evaluación de la información en el periodo de estudio en época de verano e invierno. El análisis diario de las variables meteorológicas del viento superficial se ha realizado con información de las estaciones de Chusis, ubicada a barlovento de la ciudad y Miraflores y Mallares, ubicadas a sotavento de la ciudad. A nivel local el viento predomina en su componente sur y sureste, en la cuenca atmosférica de Piura.

El efecto de los vientos a nivel urbano con respecto a la dispersión de los contaminantes muestra poca variabilidad debido a la escasa rugosidad de la ciudad con construcciones poco elevadas (2 a 3 pisos en su mayoría).

El monitoreo de altura se realizó con sondeo atmosférico midiendo el perfil vertical de temperatura del aire. Para la evaluación de la circulación de los vientos a nivel superficial se utilizó el método de Holzworth (1972), con el cual se obtuvo una base de altura de mezcla a las 07:00 h (950 a 1045 m) y a las 19:00 h (620 m a 1230 m) con los datos de la estación de sondeo atmosférico de Piura. Esta altura de mezcla (desde la superficie hasta el tope de las nubes) se observó en la mañana y tarde en época de invierno debido a la presencia de nubes bajas, en este caso la altura de mezcla según Holzworth casi coincide con la base de la inversión térmica toda vez que constituye una limitante en el proceso de dispersión de contaminantes.

### APLICACIÓN Y SIMULACIÓN DEL MODELO WRF-CHEM

Para la simulación de los contaminantes atmosféricos se utilizó el modelo WRF-CHEM (Weather Research and Forecasting model) (Grell et al. 2005). Este es un modelo numérico de mesoescala no

hidrostático de previsión del tiempo y de contaminantes atmosféricos, creado como un sistema operacional flexible y eficiente computacionalmente y ofrece una avanzada descripción física, química y numérica de la atmósfera. La inclusión de la parte química se basa en el modelo CMAQ (Community Multiscale Air Quality). El modelo WRF-CHEM actualmente cuenta con sofisticados módulos que tratan la química de la atmósfera y varios procesos físicos asociados a esas variables químicas.

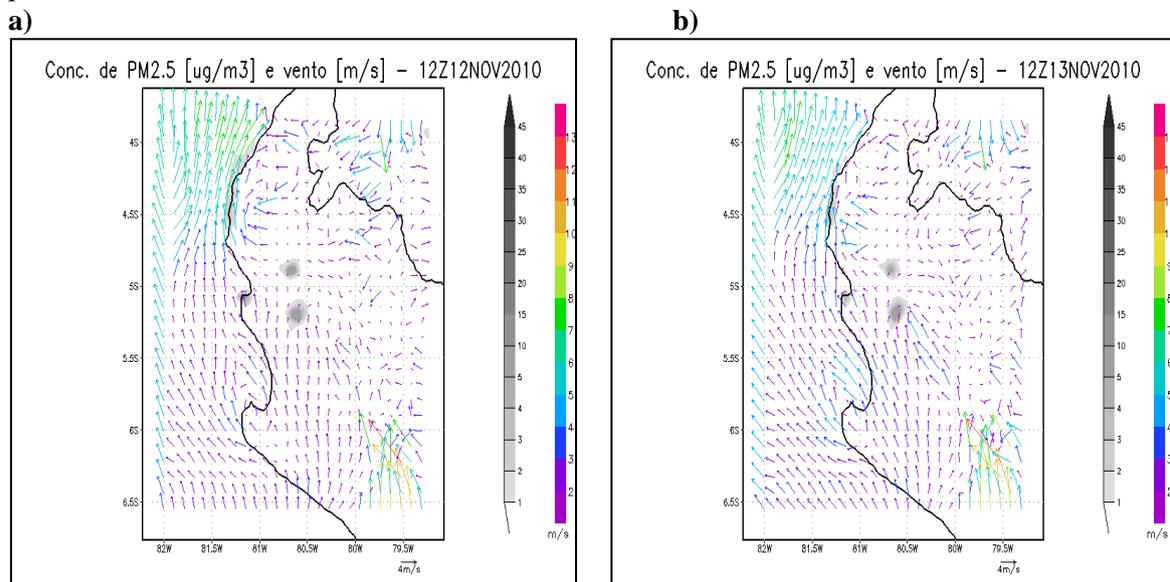
La corrida del modelo se ha realizado por dos días, se inició el 12 noviembre y terminó el 13 noviembre del año 2010, luego se han evaluado las variaciones significativas de material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>) con la relación a las variables meteorológicas (velocidad y dirección del viento) considerando la mayor incidencia a las 07:00 h local de los dos días de simulación de la calidad del aire en la ciudad de Piura.

### SALIDAS DE LA SIMULACIÓN DEL MODELO WRF-CHEM CON RESULTADOS PRELIMINARES

Para las salidas de la simulación del modelo se consideró un dominio de aproximadamente 320 x 320 km y la resolución espacial de 4 km. La corrida del modelo se realizó por espacio de 2 días (12 y 13 de noviembre de 2010). La figura 6 muestra las variaciones más significativas de los contaminantes en relación e interacción con las variables meteorológicas, durante las horas de mayor incidencia de concentración de los contaminantes (07:00 h).

En las Figuras 6 a) y 6b) se muestran los resultados del material particulado menor a 2,5 micrómetros (PM<sub>2,5</sub>). Además, las salidas del modelo —de los dos días correspondientes a las horas de la mañana 07:00 h— indican que las concentraciones de material particulado (PM<sub>2,5</sub>) se incrementan a las 07:00 h en ambos días. Este incremento de contaminantes se observa en horas de mayor tráfico vehicular, la operatividad del parque industrial (fuentes fijas y de áreas) y el incremento comercial

Se observan intensidades débiles de la velocidad del viento (< 3 m.s<sup>-1</sup>) y una dirección del viento predominante del sur que determina el transporte de los contaminantes hacia el norte y noreste de la ciudad (Figura 6), lo cual se confirmará con las respectivas evaluaciones en campo paralelamente.



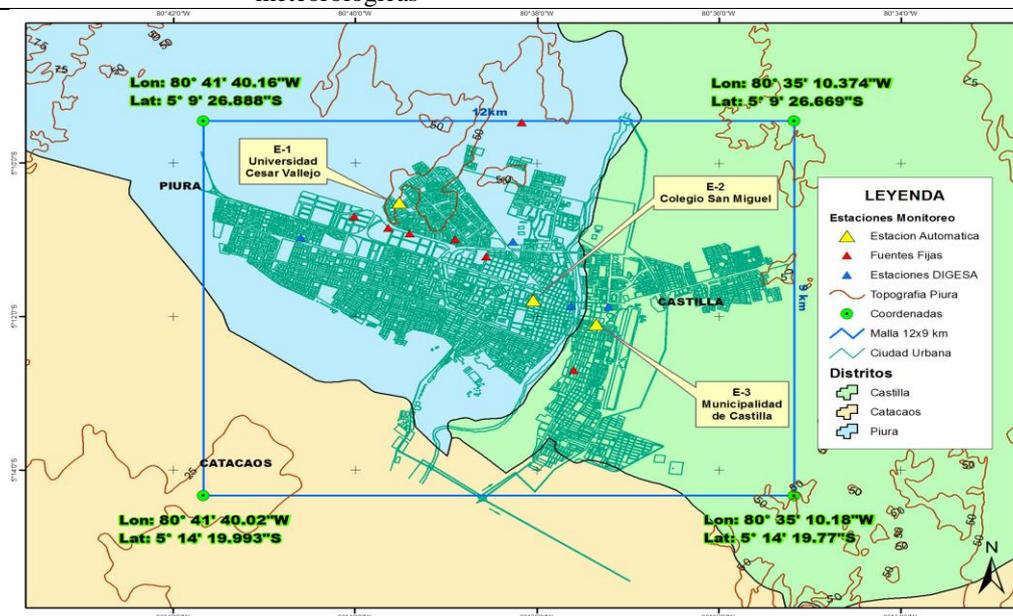
**Fig.6.** a) Concentración PM<sub>2,5</sub> en relación al viento a las 07:00 h local del 12/11/2010 y b) Concentración de PM<sub>2,5</sub> en relación al viento a las 07:00 h local del 13/11/2010.

### RESULTADOS

Aplicando la metodología descrita anteriormente se ha podido instalar 3 estaciones de calidad del aire (Tabla 2 y Figura 7) para medir partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> y tres estaciones automáticas meteorológicas en las áreas de mayor de influencia de la población, es decir, en el cercado de Piura, periferia de Piura y distrito de Castilla como se describe en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Ubicación de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire en la cuenca atmosférica de Piura y los parámetros a monitorear.

Estación	Ubicación	Contaminantes y variables meteorológicas	Dirección	Coordenadas Geográficas		Distrito
				Latitud	Longitud	
E-1	Colegio San Miguel	Partículas PM10, PM2,5 variables meteorológicas	Cercado de Piura	05°11'47,08"S	80°38'02,03"W	Piura
E-2	Universidad Cesar Vallejo	Partículas PM10, PM2,5 variables meteorológicas	Periferia de Piura	05°10'30,46"S	80°39'30,88"W	Piura
E-3	Municipalidad de Castilla	Partículas PM10, PM2,5 variables meteorológicas	Poblado de Castilla	05°12'05,62"S	80°37'20,76"W	Castilla



**Fig.7.** Resultados de la ubicación de las 3 estaciones automáticas de la red de Monitoreo de la Calidad del Aire de la ciudad de Piura y Castilla.

En la Figura 7 se muestra un mapa con las coordenadas geográficas de las fuentes fijas (7 industrias), las estaciones de monitoreo de la línea base (4 puntos) de acuerdo a las coordenadas establecidas y las 3 estaciones automáticas de calidad del aire para la red de monitoreo propuesto.

## CONCLUSIONES

La metodología ECO/OPS (1997) es aplicable, ya que su uso resulta eficaz para el diseño de una red de monitoreo de la calidad del aire en el departamento de Piura, específicamente en los distritos de Piura y Castilla. Se logró establecer la cantidad (tres estaciones automáticas de calidad del aire y tres estaciones automáticas meteorológicas) y la ubicación de las estaciones (cercado de Piura [Colegio San Miguel], periferia de Piura [Universidad César Vallejo] y la población de Castilla [Municipalidad de Castilla]) que formarían parte de la red de monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Piura y Castilla.

Esta red de monitoreo implementada servirá de base para evaluar los estándares de calidad ambiental del aire, en cumplimiento de la legislación ambiental y poder activar oportunamente las medidas necesarias en episodios críticos y estimar el impacto de las medidas tomadas (como es el caso de la reducción de las emisiones) y regular parámetros de la calidad del aire.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los Ings. José Silva Cotrina, José Carlos Canales, Dr. Marció de Oliveira López de la Universidad de Sao Paulo, Dra. Laura Gallardo de la Universidad de Chile, al Instituto Interamericano para la Investigación de Cambio Global-IAI y a la Dirección Regional SENAMHI-Piura por su aporte y apoyo en la realización de este estudio. Asimismo, al personal de la Dirección General de Investigación y Asuntos Ambientales del SENAMHI.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Diario El Peruano (2001). Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire, D.S. N° 074-2001/PCM.
- Diario El Peruano (2008). Estándares Nacionales de la calidad Ambiental del Aire. Decreto Supremo N° 003-2008/MINAM.
- DIGESA (2005). Protocolo de Monitoreo de la Calidad del Aire y Gestión de los Datos. R.D. N° 1404-2005/DIGESA/SA, Lima, Perú.
- DIGESA (2005). Inventario de emisión de fuentes fijas de la cuenca atmosférica de la ciudad de Piura Estudio del IM-07 PROCLIM, Gesta Zonal del Aire Piura, Plan a Limpiar el Aire, Lima, Perú.
- Faudez, T. P. (2011). Construcción optimal de redes de monitoreo aplicado a la vigilancia de los contaminantes atmosféricos, Tesis de Maestría, Universidad de Santiago de Chile USACH.
- GESTA (2005). Plan “A Limpiar el Aire” de la cuenca atmosférica de Piura. GESTA zonal de Piura. Descargado de: <http://cdam.minam.gob.pe:8080/cendoam/bitstream/123456789/175/1/CDAM0000074.pdf>. Noviembre del 2005.
- Grell, G.A., Peckham, S.E., Schmitz, R. & Mceen, S. A. (2005). Fully coupled *online* chemistry within the WRF model: description and application. *Atmospheric Environment*, 39:6957-6975.
- García, G. A. (2004). México evaluación de escenarios utilizando el modelo regional de calidad del aire Multiscale Climate Chemistry Model. CCA- Universidad Nacional Autónoma de México 2002. Ph.D. Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Holzworth, G. C. (1972) Mixing Heights, Wind Speeds and Potential for Urban Air Pollution Throughout The Contiguous United States, Office of Air Programs Pub. N° AP-101, EPA, U.S.A.
- Mazzeo, N. & Venegas L. (2000). Practical use of the ISCST3 model to select monitoring site locations for air pollution control. *International Journal of Environment and Pollution*, 14: 246-259.
- MINAM (2010). Servicio de consultoría para la asistencia técnica a Municipios para la Implementación de Redes de Monitoreo de la calidad del aire cuenca Atmosférica de Piura, Lima-Perú.
- Misenis, C. & Zhang, Y. (2010). An examination of sensitivity of WRF/Chem predictions to physical parameterizations, horizontal grid spacing, and nesting options. *Atmospheric Research*, 97: 315-334.
- Noll, K. E. & Mitsutomi, S. (1983). Design methodology for optimum dosage air monitoring site selection. *Atmospheric Environment*, 17: 2583-2590.
- OMM (2006). Directrices de la OMS sobre la calidad del aire/Air Quality Guidelines. Plan Estratégico de la OMM 2012-2015.
- SENAMHI PERÚ (2005). Trabajo de Investigación Evaluación de la Contaminación Atmosférica en la ciudad de Piura, Lima, Perú.
- SENAMHI PERÚ (2006). Trabajo de Investigación Evaluación de la contaminación atmosférica en la ciudad de Piura, mediante la aplicación de un modelo de Dispersión de Contaminantes, Lima, Perú.
- SENAMHI PERÚ (2008). Trabajo de investigación Evaluación ambiental de la ciudad de Piura: Calidad del aire, Lima, Perú.
- Tie, X., Madronich, S., Li, G. H., Ying, Z. M., Zhang, R., Garcia, A., Lee-Taylor, J., & Liu, Y. (2008). Characterizations of chemical oxidants in Mexico City: A regional chemical/dynamical model (WRF-Chem) study. *Atmospheric Environment*, 41:1989-2008.
- Tie, X., Geng, F. H., Peng, L., Gao, W., & Zhao, C. S. (2009). Measurement and modeling of O3 variability in Shanghai, China; Application of the WRF-Chem model. *Atmospheric Environment*, 43: 4289-4302.
- Tie, X., Madronich, S., Li, G. H., Ying, Z. M., Weinheimer, A., Apel, E., & Campos, T. (2009). Simulation of Mexico City Plumes during the MIRAGE-Mex Field Campaign Using the WRF-Chem Model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9:4621-4638. Doi:10.5194/acp-9-4621-2009.
- Tseng, C.C. & Chang, N. B. (2001). Assessing relocation strategies of urban air quality monitoring stations by GA-based compromise programming. *Environment International*, 26: 523-541.
- Venegas, L. E. & Mazzeo, N. A. (2003b). Design methodology for background air pollution monitoring site selection in an urban area. *International Journal of Environment and Pollution*, 20(1-6): 185-195.
- Wu, H. W. Y. & Chan, L. Y. (1997). Comparative study of air quality surveillance networks in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 31: 935-945.
- Ying, Z. M., Tie, X. & Li, G. H. (2009). Sensitivity of ozone concentrations to diurnal variations of surface emissions in Mexico City: A WRF/Chem modeling study. *Atmospheric Environment*, 43: 851-859.
- Zhang, Y., Dubey, M. K., Olsen, S. C., Zheng, J. & Zhang, R. (2009). Comparisons of WRF/Chem simulations in Mexico City with ground-based RAMA measurements during the 2006-MILAGRO. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9: 3777-3798. Doi:10.5194/acp-9-3777-2009.