

INTRODUCCIÓN

Los problemas de contaminación del aire son desde hace varias décadas un serio problema social en las mayores ciudades del mundo. El crecimiento poblacional y urbano, así como los procesos de desarrollo económico, con frecuencia resultan en afectaciones al ambiente. De entre las principales ciudades de El Salvador, la Zona Metropolitana de San Salvador (ZMSS) no ha escapado de este proceso y por tanto comienza a sufrir los efectos de la contaminación del aire (Figura 1), los cuales se han vuelto más evidente en años recientes.



Figura 1

En el presente análisis, se revisan los factores meteorológicos y climáticos que resultan en condiciones adversas para la dispersión de contaminantes atmosféricos, tomando en consideración, las características geográficas (latitud, altitud, cercanía al mar, usos de suelo) de las ciudades bajo estudio, principalmente el AMSS, así como los correspondientes parámetros meteorológicos relevantes en la dispersión de contaminantes (vientos, estabilidad atmosférica, capa de mezcla, radiación, humedad y temperatura) como función de la época del año (ciclo anual) y de la hora del día (ciclo diurno).

Los resultados obtenidos sirven para iniciar un diagnóstico de las variaciones de circulación y estabilidad en la atmósfera, que bajo las condiciones actuales de emisiones de contaminantes, pueden resultar en episodios de alta contaminación, constituyéndose en un alto riesgo para la salud de la población del AMSS.

RESULTADOS

i) Uso de suelo y topografía

El Salvador se caracteriza por una marcada orografía que determina en cierta medida su clima. Hacia el norte, existen cadenas montañosas que determinan climas relativamente más fríos que hacia la costa del Pacífico. Los climas son en gran medida resultados de la ubicación de El Salvador en la banda tropical, de las marcadas variaciones de alturas, y de la cercanía al mar.

La mayor parte del territorio salvadoreño está dedicado a la actividad agrícola con zonas de pastos, cultivos de granos básicos, café, caña y frutales. En gran medida, las actividades agrícolas son de temporada, con una mayor concentración del trabajo entre los meses de febrero a octubre, cuando se define el ciclo.

En años recientes, los mayores centros urbanos del país han experimentado un rápido crecimiento, observándose con más frecuencia como colindan la parte urbana con las zonas de cultivo. Este proceso de desarrollo conlleva a interacciones que en ocasiones se reflejan en la calidad del aire.

La compleja topografía de El Salvador resulta en cuencas donde se pueden definir procesos atmosféricos locales. Así, el AMSS está limitada al oeste por la zona de Santa Tecla, con montañas de altura superior a los 1000 metros. Hacia el norte, las montañas son de elevación menor, resaltando como barrera orográfica de mayor magnitud el volcán de San Salvador con alturas que alcanzan los 1800 y 1900 metros sobre el nivel del mar. Estos elementos constituyen un mecanismo modulador de la dirección de los vientos cerca de superficie. Hacia el este se distingue el Lago de Ilopango que se constituye un una salida del flujo atmosférico por su elevación baja. Finalmente, al sur se tienen elementos topográficos como el cerro de San Jacinto y las montañas de la cordillera del Bálsamo que alcanzan alturas entre 1000 y 1100 metros sobre el nivel del mar. Considerando las condiciones de la topografía del AMSS se establece que se trata de un valle en una cuenca rodeada por montañas de gran altura, en un área de aproximadamente 886.15 km².

El resto de ciudades incluidas en el estudio son Santa Ana, Acajutla-Izalco, San Miguel y La Unión y no presentan las características de “cuencas cerradas” como el AMSS, por lo que sus problemas de contaminación atmosférica son menores.

ii) Clima

Los principales factores del clima que explican la dispersión de contaminantes son los flujos de vientos que ventilan la atmósfera y la altura de la capa de inversión térmica (Fig. 2), ésta última asociada a los flujos de viento vertical y las altas presiones, que se relacionan con la altura de las montañas que forman la cuenca. El diagrama siguiente representa los otros factores que determinan la calidad del aire, especialmente las emisiones provenientes de los vehículos, la industria y también las quemas agrícolas y las reacciones que se dan en la atmósfera por la radiación solar.

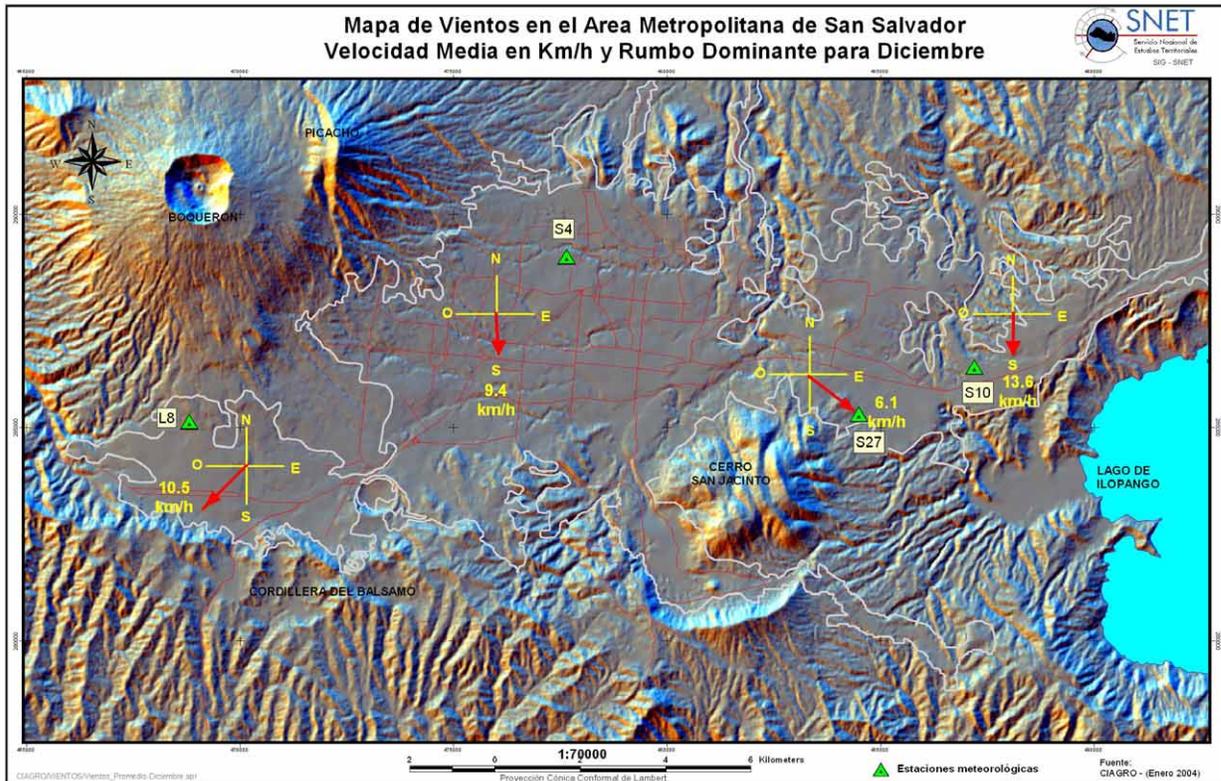


Figura 3

Aunque no se cuenta con mediciones directas en la altura, algunas mediciones sugieren que en los meses de la época seca se presenta mayor estabilidad atmosférica, pudiendo incluso presentarse inversiones térmicas como expresión de una alta estabilidad. Quizá por esta condición de estabilidad entre moderada y fuerte, los vientos en superficie exhiben una marcada divergencia en los meses secos.

Entre los meses de abril y mayo se presenta la transición seca-lluviosa desarrollándose condiciones húmedas y de menor estabilidad que pudieran facilitar la dispersión de contaminantes. La etapa de transición en ocasiones resulta más difícil de caracterizar por existir gran variabilidad en los campos meteorológicos. Sin embargo, se puede apreciar que en la mayoría de las estaciones meteorológicas estudiadas existe una componente sur e incluso del este en los vientos. Tal condición podría resultar en convergencia en los niveles bajos de la atmósfera, y por tanto en concentraciones mayores de contaminantes en la zona centro del AMSS. En las otras ciudades, el flujo del sur dispersaría los contaminantes hacia la zona norte que por ser montañosa produce con facilidad la formación de nubes y lluvias en esa época.

En los meses de la etapa temprana de la estación lluviosa, los vientos poseen una fuerte componente del sur indicando los posibles efectos de circulaciones de escala sinóptica o de circulaciones regionales y locales como la brisa de mar. Para el mes de julio e incluso el de agosto, se presentan cambios en la circulación de superficie muy probablemente asociados a la canícula, el mínimo relativo en precipitación a mitad de la estación de lluvias. La componente del norte se ve reforzada, aunque con ligeras variaciones principalmente relacionadas con los efectos

de la orografía. Para la parte final del año, la circulación vuelve a ser predominantemente del norte con desviaciones relacionadas principalmente a los accidentes topográficos.

Durante la época lluviosa, la estabilidad atmosférica disminuye resultando al parecer en condiciones de una estabilidad menor y en ocasiones movimientos ascendentes que favorecen la dispersión de contaminantes. La lluvia actúa como elemento limpiador de la atmósfera principalmente en lo que a partículas se refiere, aumentando con frecuencia la visibilidad. La lluvia sin embargo puede resultar en lluvia ácida, especialmente al principio de la época lluviosa, con potenciales impactos en la vegetación, edificaciones e incluso en algunos cuerpos de agua. La nubosidad de la estación lluviosa limita la radiación solar que llega a la superficie y los procesos fotoquímicos que resultan en formación de ozono. A la mitad de la temporada de lluvias, entre julio y/o agosto, la canícula permite un aumento de insolación y es probable que se presente un máximo relativo de ozono.

Las lluvias en general están asociadas con vientos más débiles que en la estación seca. Sin embargo, la menor estabilidad atmosférica puede favorecer la dispersión de ciertos contaminantes, haciendo de esta época una de mejor calidad del aire.

iii) Tiempo

Aunque el análisis de condiciones climáticas genera información sobre las variaciones estacionales de las lluvias, las temperaturas y los vientos, es necesario detallar de mejor forma, las características diurnas de la circulación sobre las ciudades y el AMSS, pues el ciclo diurno es responsable de que en ciertas horas el problema de la contaminación sea un verdadero riesgo.

El ciclo diurno es claro para todos cuando se considera la evolución de parámetros como la temperatura o las lluvias, pues en el primer caso, máximos y mínimos de temperatura tienden a ocurrir después del medio día y en las primeras horas de la mañana, respectivamente. En el caso de la lluvia, las precipitaciones son más frecuentes en la tarde y noche, en relación directa con la estabilidad de la atmósfera. Para la mayoría, resulta menos evidente que parámetros como la dirección y magnitud del viento presenten un ciclo diurno (Fig.4). Sin embargo, los calentamientos diferenciados en distintos puntos de la ciudad, principalmente resultados de diferentes usos de suelo o topografía pueden generar brisas valle - montaña o brisas de mar, circulaciones locales que pueden determinar la dispersión de contaminantes. Tal comportamiento parece existir en la estación San Salvador, donde las horas de la madrugada las condiciones son de calma, pasando a vientos relativamente intensos provenientes del norte en las primeras horas de la mañana. Hacia la tarde, la dirección es del sur aunque con vientos relativamente débiles. Dicho comportamiento de los vientos, típico de valles encerrados por montañas, puede determinar el ciclo diurno de la contaminación, así como su distribución espacial.

Bajo el régimen de circulaciones atmosféricas locales antes descritos podrían esperarse episodios de mayor concentración de contaminantes en la madrugada y primeras horas de la mañana, con alta dispersión hacia el medio día y la tarde. Sin embargo, de presentarse una alta estabilidad atmosférica, pudieran ocurrir circulaciones directas que eleven los contaminantes y los transporten al otro extremo de la ciudad, para luego descenderlos, en un ciclo de recirculación de contaminantes que sean trazadores. Este tipo de condiciones, que llevan a un incremento día con día de la contaminación ha sido reportado por especialistas de México. La falta de observaciones

en algunos puntos del AMSS, así como de altura, hace difícil verificar esta hipótesis para el AMSS.

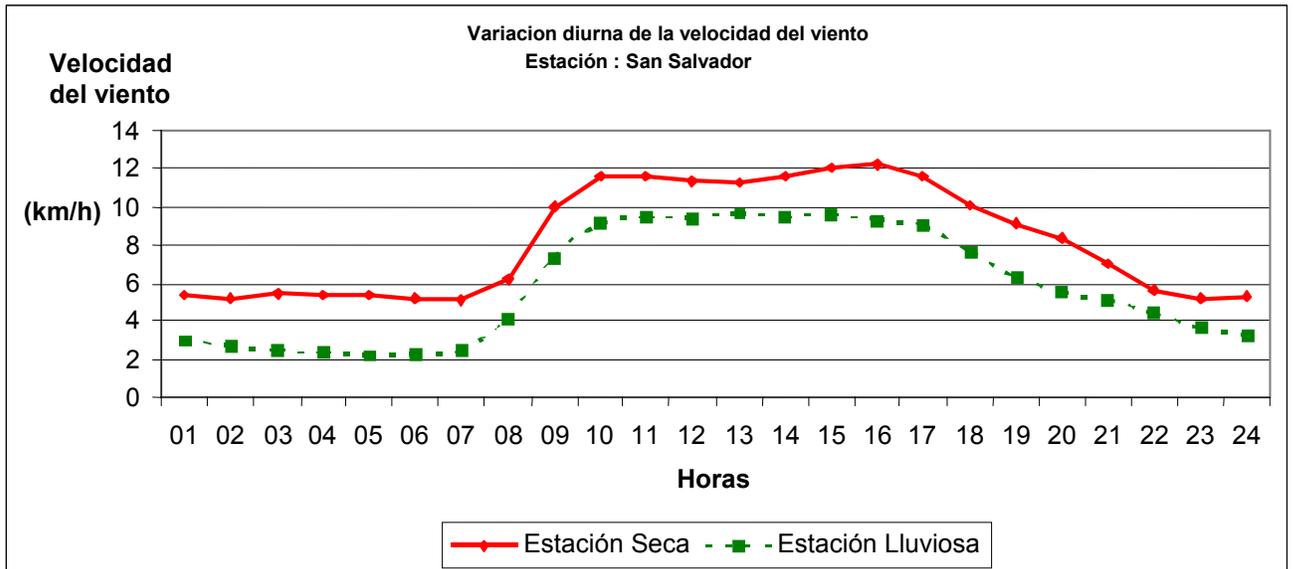


Figura 4

CONDICIONES QUE AFECTAN LA CALIDAD DEL AIRE EN EL SALVADOR

Aunque la Meteorología de una región presente circulaciones directas, ante condiciones de alta estabilidad atmosférica o valores bajos de capa límite, la contaminación es prácticamente en su totalidad el resultado de las actividades humanas. El crecimiento del AMSS ha llevado a mayores demandas de transporte, energía, etc., que se traducen en mayores emisiones de gases contaminantes y niveles de contaminación del aire. Es por ello que este problema ambiental se debe analizar con un enfoque multidisciplinario. Como referencia se mencionan los factores relacionados con emisiones y las condiciones meteorológicas en San Salvador, que pueden considerarse como de gran relevancia al momento de estudiar el problema.

Febrero, es un mes con alta estabilidad en el cual disminuye el flujo del viento horizontal, se incrementan las inversiones térmicas y por lo tanto, la ventilación es débil (Figura 5). Por ello se inhibe la dispersión de contaminantes hasta el punto de notar la bruma espesa en nuestra atmósfera. Tal efecto visual corresponde esencialmente al denominado smog (smoke= humo, fog = niebla).

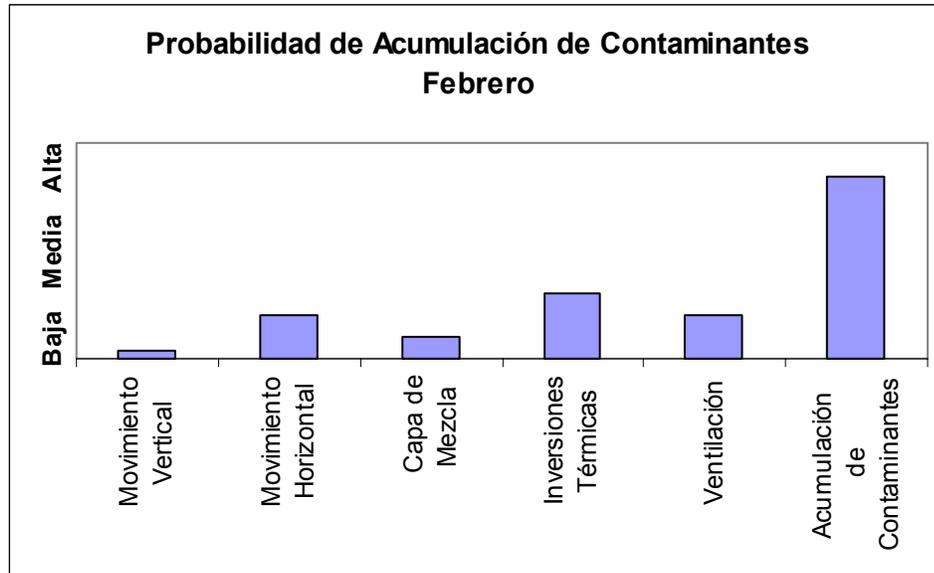


Figura 5

i) Emisiones

Las emisiones son producto de la combustión de gasolinas (Fig. 6), carbón, leña, etc. En San Salvador, gran parte de las emisiones son resultado de vehículos automotores. Un parque vehicular de casi medio millón de unidades resulta en emisiones contaminantes casi continuas. Es de particular relevancia el caso del transporte público, que consumiendo diesel, emite contaminantes visibles en alta concentración. Los autos particulares son también importantes emisores de contaminantes debido a la edad promedio de los mismos y su baja eficiencia de combustión. Finalmente se deben mencionar los puestos de comida en la calle en donde se utiliza gas propano y que muy probablemente no tienen controladas posibles fugas.

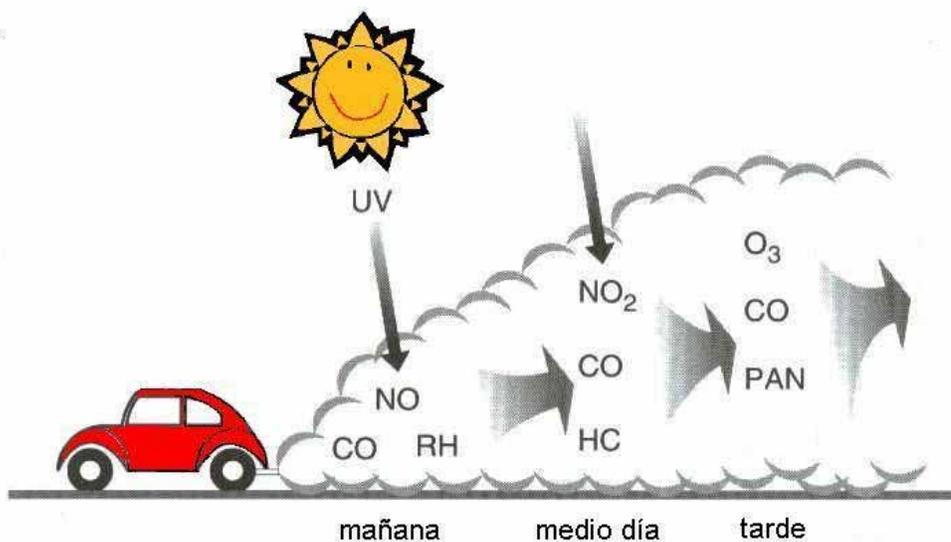


Figura 6

Lo anterior cobra relevancia cuando se piensa que si el problema son los autobuses diesel, la contaminación se manifiesta en partículas y en altos niveles de NOx y también Hidrocarburos. Si el Diesel contiene mucho azufre, se dañan los motores y además producen mucho SO₂ y partículas (humo, hollín). Si dichos precursores se disipan antes de las 10:00 AM, habrá menos contaminación fotoquímica (ozono). Los puestos de alimentos en la calle quemando aceites con combustión incompleta, por lo que producen mucho CO y nuevamente partículas (humo, hollín).

ii) Meteorología

El análisis de la contaminación debe ser el resultado de considerar las emisiones así como las condiciones meteorológicas, pues como se menciona en el apartado anterior, no toda la contaminación del aire será resultado de emisiones de un sólo tipo. Los niveles de contaminación dependerán del tipo de contaminante y del proceso del que resulta. Así, la parte meteorológica debe considerar no sólo los factores de viento y capa límite, sino adicionalmente factores como radiación solar, nubosidad, humedad y temperatura, tanto en sus aspectos de evolución en el tiempo, como su distribución en el espacio. Es necesario entonces considerar tipos de contaminantes y factores meteorológicos específicos que lo afectan.

EVALUACIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DE LOS FACTORES FAVORABLES Y DESFAVORABLES EN MATERIA DE CALIDAD DEL AIRE

Entre los factores que resultan desfavorables para calidad del aire en San Salvador están:

- El AMSS se encuentra rodeado por montañas
- Vientos débiles por las mañanas
- Estabilidad atmosférica de moderada a fuerte por las mañanas
- Alta radiación solar la mayor parte del año
- Altas emisiones de humo y hollín resultado de mala combustión del diesel de transporte público
- Alto porcentaje de autos particulares con antigüedad mayor a diez años con procesos de eficiencia de combustión desconocida
- Incremento en el número de puestos ambulantes de comida
- Prácticas agrícolas de quema en los meses de febrero a abril en zonas aledañas a San Salvador (Fig. 7)
- Ausencia de mediciones continuas de niveles de contaminación y calidad del aire
- Cambio de uso de suelo de bosque a tierra de agricultura y a zona urbana



Figura 7

Sin embargo, existen factores que pueden hacer del problema algo menos serio de lo que ocurre en otras partes del mundo como Ciudad de México, Santiago o Sao Paulo. Entre estos factores se tienen:

- Altura de San Salvador menor a los 700 metros en su zona urbana
- Salidas de flujo de aire por zonas sin montañas
- Amplias zonas de árboles en gran parte de la ciudad
- Vientos vespertinos relativamente fuertes (> 5 m/s)
- Eventos de Nortes en los meses de noviembre a marzo como factores que aumentan la ventilación
- Aumento en la altura de la capa de mezcla antes de las 10AM lo que permite dispersar contaminantes
- Una estación de lluvias que permite el barrido de ciertos contaminantes por gotas de lluvia

Bajo tal escenario se comienzan a distinguir algunos períodos y zonas que pueden resultar ciertamente críticos. Se puede considerar que el problema de contaminación es más serio durante la temporada seca, particularmente en las horas de la mañana. Especialmente, se puede pensar que la mayor exposición de la gente se da en los sitios de mayor tránsito vehicular, particularmente en las paradas de autobuses. Lo anterior no exenta a otras zonas de la ciudad de alcanzar altos niveles de contaminación, pues la circulación local, altamente influenciada por la topografía puede resultar en concentraciones de contaminantes altas incluso en zonas residenciales de poco tránsito de vehículos. Los casos de Santa Tecla o de la Zona de Ilopango parecen ser potenciales ejemplos de la afectación resultado del transporte de contaminantes por vientos.

La falta de mediciones regulares en ciertos puntos de la ciudad, así como el desconocimiento de algunos factores meteorológicos como la evolución diaria y estacional de la capa de mezcla no permite obtener conclusiones más contundentes sobre los procesos meteorológicos y cómo afectan estos los niveles de contaminación. Adicionalmente, no se cuenta con esquemas que

procesen la información recibida de las estaciones automáticas, que la preparen en términos de parámetros de relevancia para el tema de la contaminación ambiental. Es aún más limitado el trabajo de pronóstico de circulaciones atmosféricas locales, con información para estimar niveles de contaminación. Considerando lo anterior, se realizan las siguientes recomendaciones para avanzar en el diseño de estrategias que disminuyan los niveles de contaminación actuales.

RECOMENDACIONES

De manera general se puede pensar que es esencialmente el AMSS la que enfrenta y enfrentará problemas de contaminación en los años por venir. Por ello, los esfuerzos de control de contaminación deben centrarse en esta región, pues las otras ciudades, aunque con rápido crecimiento, distan aún de presentar problemas como San Salvador.

Son varias líneas las que se recomienda seguir, en materia de cuantificación del problema y que incluyen:

- i) Mediciones de parámetros meteorológicos clave, relacionados con la formación, transporte y dispersión de algunos contaminantes. Así, se recomienda ampliar al menos en dos o tres estaciones meteorológicas de superficie, la red meteorológica del AMSS y realizar algunas medidas con la altura.
- ii) Iniciar campañas de medición de contaminantes como: CO, CO₂, O₃, HC, SO₂, NO₂, NO_x, PM₁₀ y PM_{2.5} entre otros para determinar cuáles de estos son los más abundantes. La medición de estos contaminantes debe ser simultánea con las mediciones meteorológicas para tratar de determinar la fuente de los contaminantes.
- iii) Realizar algunos diagnósticos de las condiciones meteorológicas que resultan en episodios de alta contaminación. Tales análisis permitirán identificar sitios adecuados para el monitoreo de la calidad del aire. Los modelos numéricos resultan una herramienta de gran utilidad en combinación con mediciones. El modelo en su primera etapa debe considerar sólo los aspectos meteorológicos en gran detalle, aprovechando la infraestructura y las mejoras de las redes de observación. Mantener y verificar los resultados del modelo en forma operativa ayudará a generar confianza en la información meteorológica.
- iv) Dada la dificultad de medir operativamente y con gran detalle contaminantes y precursores de los mismos, se recomienda realizar una campaña de mediciones intensiva en un periodo de al menos dos semanas en los periodos que se han identificado como críticos (época seca).
- v) Capacitar personal en el manejo de información meteorológica destinada al monitoreo de calidad del aire y la (meteorología de la contaminación atmosférica). Será necesario capacitar también a personal especializado en la parte química de la contaminación

- vi) Concluidas algunas de las tareas anteriores se pueden iniciar programas de información para las autoridades y la población en general sobre el problema de la contaminación en el AMSS:
- vii) Realizar un estudio sobre la relación salud y contaminación

CONCLUSIONES

Para cualquier visitante al AMSS, el problema de la contaminación resulta visible de inmediato, principalmente por las altas emisiones de los vehículos automotores. Para los habitantes de la ciudad es sin embargo más serio, porque además de percibirlo comienzan a sentir sus efectos en las vías respiratorias y gastrointestinales. Desafortunadamente no existe una cuantificación de los niveles de contaminación, ni de los tipos particulares que más afectan, así como de sus fuentes.

Por tratarse de un problema relativamente reciente (cinco años), existe poca experiencia en cómo analizar el problema desde el punto de vista meteorológico. Las redes de observación han sido diseñadas para monitoreo del tiempo y del clima, pero no necesariamente para analizar procesos de dispersión de contaminantes. Los meteorólogos operativos del SNET están capacitados para observaciones, diagnósticos y pronósticos de tiempo y clima, pero se requiere de personal con conocimientos de capa límite y dispersión de contaminantes para dar seguimiento al clima.

El interés de las autoridades del ambiente por resolver el problema ha incluido el considerar las experiencias de otras grandes ciudades con problemas de contaminación. Es posible mediante la colaboración con diversas instituciones definir una estrategia de monitoreo, diagnóstico y pronóstico de la calidad del aire, que lleve a concientizar a la población del problema, siempre sobre bases sólidas y no sobre especulaciones. Para ello resulta importante medir, diagnosticar y encontrar mecanismos de control que lleven a establecer normas en cuanto a emisiones.

En el tema meramente meteorológico es de fundamental importancia mejorar la red urbana de monitoreo y contar con herramientas para procesar la información, que permita generar los productos de relevancia en dispersión de contaminantes. El establecimiento de un modelo de alta resolución para El Salvador y para el AMSS permitirá llegar a un estado adecuado de conocimiento de la meteorología que inhibe o favorece la dispersión de contaminantes.

Es importante realizar campañas que arrojen mediciones de los niveles de contaminación y permitan identificar fuentes de contaminantes, para de esta manera, iniciar discusiones sobre los mejores mecanismos de control (normatividad).

ACCIONES FUTURAS: INMEDIATAS Y DE MEDIANO PLAZO

En el corto plazo será necesario:

- i) Aumentar la red urbana de monitoreo meteorológico con al menos dos estaciones.
- ii) Implementar modelos meteorológicos numéricos de mesoescala para asimilar los datos de estaciones, diagnosticar y pronosticar las condiciones que favorecen o inhiben la dispersión de contaminantes
- iii) Realizar una campaña de mediciones para validar el modelo y determinar algunos parámetros clave (e.g., altura y evolución de la capa de mezcla) en la dispersión de contaminantes
- iv) Caracterizar y cuantificar contaminantes y sus fuentes

En la generación de capacidades es necesario trabajar en la formación de especialistas en el manejo de información relativa a contaminación. Se propone:

- i) Diseñar y desarrollar cursos de corta duración sobre los aspectos fundamentales de la contaminación (meteorología, química, políticas ambientales). Se sugiere recurrir a especialistas de instituciones académicas y de investigación.
- ii) Solicitar cooperaciones técnicas en el marco de acuerdos regionales internacionales existentes para transferir tecnologías (e.g, modelos numéricos de circulación atmosférica) e implementarlas en El Salvador
- iii) Capacitación de especialistas en materia de análisis y control de la contaminación, los cuales pueden surgir de las universidades del país.