

Estudio de las inversiones térmicas en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) y su relación con la calidad del aire. Propuesta de diagnóstico y predicción utilizando el modelo WRF (Weather Research Forecasting)

Angel R. Meulenert Peña, Victor M. Cornejo López, F. Omar García Concepción, H. Ulises Ramírez Sánchez, Jaime Alcalá Gutiérrez, Mario E. García Guadalupe
Instituto de Astronomía y Meteorología
Universidad de Guadalajara
Ave. Vallarta No.2602. Colonia Arcos Vallarta
Guadalajara, Jalisco
CP 44130
ameulene@astro.iam.udg.mx
vic@astro.iam.udg.mx

Resumen. La Ciudad de Guadalajara y los municipios adyacentes, los cuales en su conjunto conforman la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), ha tenido un desarrollo extraordinario en los últimos 30 años, por lo que se ha convertido en una gran metrópoli con un extraordinaria cantidad de vehículos automotores circulando diariamente y enormes zonas industriales, produciendo altas concentraciones de contaminantes. Por tal motivo es urgente que la ZMG cuente con un moderno sistema de alerta temprana para las contingencias ambientales, basadas en técnicas apropiadas que permitan el diagnóstico y pronóstico a corto y mediano plazo de la calidad del aire que se respira en el área.

Tomando como plataforma de base los resultados que proporciona el modelo numérico de predicción de las diferentes variables meteorológicas y el análisis diario de la información de radiosondeo en la ZMG, se confecciona un pronóstico a mediano plazo (3 días) del comportamiento de las inversiones térmicas (IT) en la región, su intensidad y hora de ruptura, lo cual a su vez se correlaciona con las condiciones ambientales de la calidad del aire (2, 4).

En cuanto a la metodología, en primer lugar se corre el modelo Weather Research Forecasting (3), el cual se considera en la actualidad como el más preciso para estudios de mesoescala. De

este se obtienen las condiciones atmosféricas generales que imperan en el área y su pronóstico a tres días, así como, los sondeos pronósticos sobre la ZMG. Además, se analiza el sondeo real obtenido de la estación Colomos, para conocer la situación instantánea. Con toda esa información procesada, el especialista confecciona el pronóstico de las IT para los siguientes tres días y de acuerdo con su intensidad y hora de ruptura, se conoce la calidad del aire que imperará en la ZMG. Ésta información se coloca en la página de Internet creada al efecto y se le envía a la Secretaría de Medio Ambiente (SEMADES) para que se tomen las medidas pertinentes.

Entre los resultados más destacados del proyecto se encuentra:

- Se cuenta con una estadística de ocurrencia y características de las IT en la ZMG en los últimos años.
- Se determinó la fiabilidad al comparar de los sondeos aerológicos obtenidos de satélites meteorológicos y los radiosondeos terrestres.
- Por primera vez SEMADES contará con información confiable y precisa del comportamiento de las IT en la ZMG y su pronóstico a 3 días.

Antecedentes

Durante los últimos años se han registrado contingencias ambientales producto de la mala calidad del aire en la ZMG de manera más recurrente, lo cual se relaciona en gran medida con el exagerado aumento del parque vehicular y el desarrollo industrial de la metrópoli. Unido a lo anterior, el deterioro progresivo de las áreas verdes, los incendios forestales en el Bosque La Primavera y otros.

Para conocer de manera instantánea la calidad del aire, la SEMADES creó una red de 8 estaciones de monitoreo de diferentes componentes nocivos a la salud humana, pero con el desarrollo acelerado y el aumento en extensión de la ZMG, ya estas estaciones son insuficientes, además de que sólo señalan el estado de la atmósfera en un momento dado, cuando ya se está respirando el contaminante dañino.

Objetivos Generales.

El objetivo general del proyecto es contar con un sistema de análisis y predicción de la calidad del aire en la ZMG, basado en los cambios y el comportamiento de las condiciones meteorológicas en el área, utilizando para esto modelos numéricos de predicción de alta precisión, como el WRF y sondeos aerológicos en tiempo real derivados de información satelital y terrestre.

Objetivos Particulares.

Como objetivos particulares se tienen conocer el comportamiento de las IT en la ZMG, sus intensidades, horas de ruptura (tiempo de duración) y vínculo con determinadas situaciones sinópticas significativas. Además, la comprobación de la fiabilidad de los sondeos satelitales, lo que permitirá utilizar estos cuando no se realicen sondeos terrestres en la ZMG.

Descripción de la aportación científica.

Las aportaciones científicas de este proyecto son las siguientes:

1. Precisar las condiciones atmosféricas generales que favorecen la formación de IT sobre la ZMG.
2. Contar con una estadística adecuada de las IT en la ZMG con sus características principales, tales como, intensidad, duración, espesor y frecuencia por meses.
3. Creación de un sistema de alerta temprana ante las contingencias ambientales de la calidad del aire, que se pueden presentar en la ZMG. Así como, la puesta en marcha de un pronóstico especial de la calidad del aire con validez de 3 días para la ZMG.

Justificación e importancia de los nuevos hallazgos.

Es de vital importancia conocer la calidad del aire que se respira en las grandes ciudades, ya que la contaminación que se genera en las mismas se vincula directamente con un gran número de enfermedades y de daños a las economías. Por lo tanto, se justifica plenamente emprender estudios en esta dirección y más aún cuando se derivará de los mismos obtener un sistema que permitirá a las autoridades alertar a la población de las posibles contingencias ambientales con tiempo suficiente y tomar las medidas que mitiguen o controlen los posibles efectos a la salud.

Descripción general de la metodología.

La *inversión térmica (IT)* es un fenómeno atmosférico muy común que ocurre con frecuencia en grandes áreas donde los vientos son muy débiles y la componente vertical del viento es descendente, de forma tal que la temperatura aumenta con la altura unos pocos

decenas de metros en lugar de disminuir como es normal. Cuando esto ocurre, las partículas de aire se mueven muy poco y quedan atrapadas en una capa desde la superficie del terreno hasta una altura de cientos de metros o menos. Si este aire no es “limpio” y contiene grandes cantidades de contaminantes, estos últimos provocan una elevación sustancial de los índices que miden la calidad del aire (IMECAS) y pueden ocurrir contingencias ambientales importantes. Observe en la figura 1 como el humo de un incendio en la ZMG asciende hasta cierta altura y comienza a inclinarse horizontalmente en el “techo” de la inversión. A partir de ese punto las partículas de humo no pueden seguir ascendiendo y se mezclan con el aire debajo de ellas, ocasionando un incremento de la contaminación del aire.

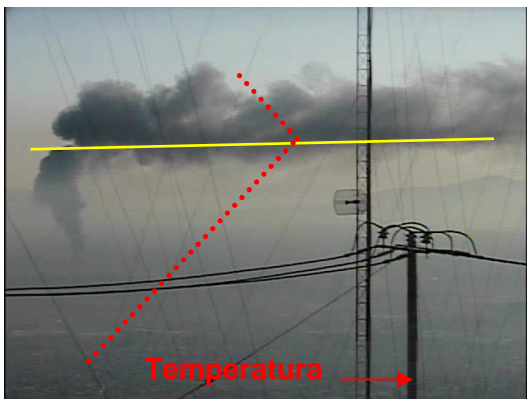


Fig.1 El humo de un fuerte incendio en la ZMG inclinado horizontalmente, muestra donde se encuentra el techo de la inversión térmica.

Las situaciones meteorológicas que provocan las IT en la ZMG aparecen con más frecuencia en los meses mas secos del año (octubre a marzo), aunque también lo hacen en los meses lluviosos, pero en este caso, las precipitaciones ayudan a “limpiar” la atmósfera y no es tan frecuente la elevación de los índices de calidad del aire.

Como se señala arriba las IT son un fenómeno meteorológico que no es perceptible por los seres vivos y no ocasionan problema alguno si no existieran partículas contaminantes suspendidas en el aire. Por ejemplo, en una zona rural, libre de contaminantes, no hay efecto alguno por la presencia de una IT, pero todo lo contrario ocurre en las zonas urbanas de las grandes y medianas ciudades, donde las industrias, autos, etc., están contaminando constantemente el aire.

Para conocer el comportamiento de algunas magnitudes meteorológicas desde la superficie del suelo hasta grandes alturas, tales como, la temperatura, presión atmosférica, dirección y velocidad del viento, humedad y otras, se cuenta con el sondeo atmosférico por medio de globos equipados con sensores que miden y transmiten en tiempo real a un equipo en tierra. Estos datos se reciben y procesan en corto tiempo y los meteorólogos obtienen un perfil casi instantáneo de las condiciones de la atmósfera en el lugar donde es lanzado, pudiendo determinar de inmediato la existencia o no de una IT, su intensidad, espesor y la hora en que concluye, fig.2.

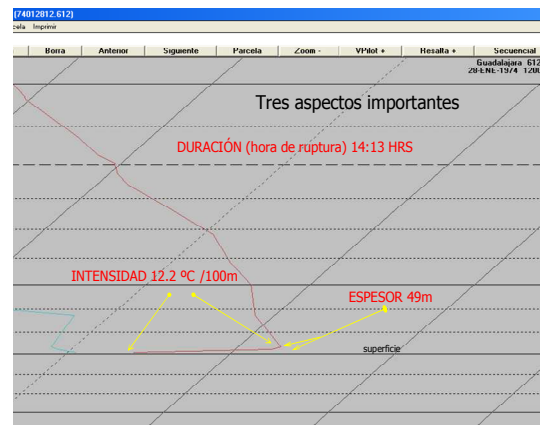


Fig.2 Sondeo atmosférico que muestra una intensa IT sobre la ZMG (línea roja),

la intensidad de 12.2°C por cada 100 metros y el espesor de 49 metros (distancia de la superficie hasta el techo de la IT)

En la ZMG se cuenta con un equipo de sondeo atmosférico operado por la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) instalado en la estación meteorológica del parque Colomos, lamentablemente este medio tan valioso y preciso para conocer la calidad del aire tiene grandes dificultades para su operación sistemática y regular por problemas de suministros de los insumos, falta de personal, etc., e incluso, el organismo responsable directo de su operación, el Servicio Meteorológico Nacional, ha decidido hacer mediciones sólo en días alternos por falta de presupuesto para obtener los insumos.

La operación irregular de este medio condujo a que los investigadores nos diéramos a la tarea de buscar alternativas para conocer el perfil de la atmósfera sobre la ZMG diariamente, para lo cual se recurrió a la utilización de técnicas de mediciones indirectas a partir de los satélites meteorológicos. Desde hace muchos años los satélites meteorológicos realizan sondeos atmosféricos a través de microondas que miden los mismos parámetros desde la plataforma espacial que los equipos en tierra, y los cuales han sido sometidos a rigurosas comparaciones. En la figura 3 se presenta un sondeo realizado desde la estación meteorológica en la ciudad de Omaha, USA, el 2 de julio de 1997 a las 1200 UTC (línea azul) y se superpone el sondeo realizado casi a la misma hora (1153 UTC) desde el satélite meteorológico GOES-8 (línea amarilla). Claramente se observa que ambos perfiles son muy similares (1).

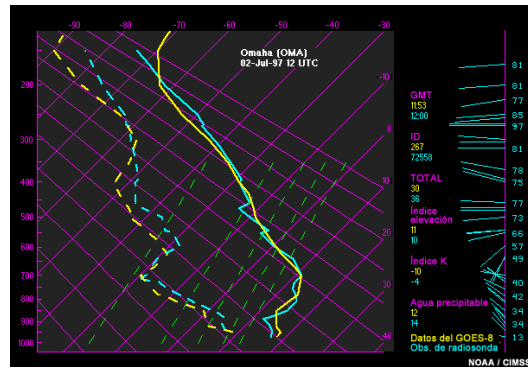
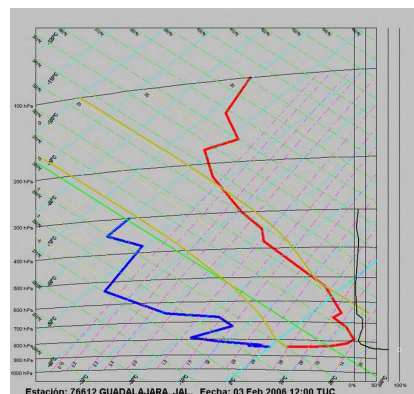


Fig. 3 Comparación entre sondeo atmosférico por radiosonda terrestre y por satélite meteorológico.

Especialistas del IAM llevaron a cabo un procedimiento similar para demostrar la fiabilidad en el uso de los sondeos satelitales cuando fallaran o no hubieran los sondeos terrestres, obteniéndose márgenes aceptables de diferencias y un dictamen adecuado para su uso. En la figura 4 se muestran el sondeo real realizado el 3 de febrero del 2006 a las 1200 UTC desde la estación Colomos (a) y el realizado por satélite a la misma hora sobre la ZMG (b). Son evidentes las similitudes entre ambos perfiles y se observa claramente la fuerte IT en ambos.

(a)



(b)

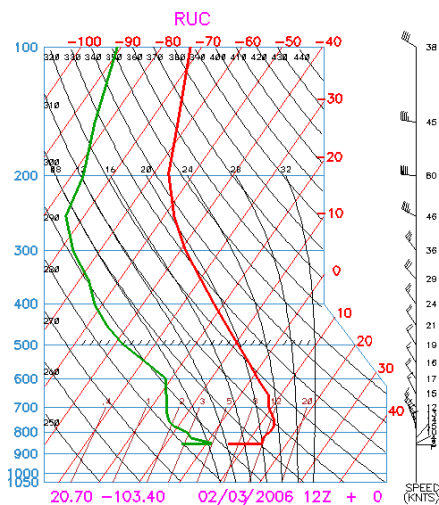


Fig. 4 Sondeo atmosférico de la ZMG realizado por la estación Colomos (a) y por satélite (b) el 3 de febrero de 2006 a las 1200 UTC (7:00 a.m. hora local).

Otro elemento importante a considerar para el análisis de la calidad del aire en un lugar específico son las condiciones atmosféricas generales en la región, ya que el sistema meteorológico que domina el comportamiento del tiempo en un momento dado es quien determina la existencia o no de una IT. Por ejemplo, las IT ocurren con mayor frecuencia cuando predomina el aire seco y estable, lo cual está asociado con zonas de altas presiones o anticiclones.

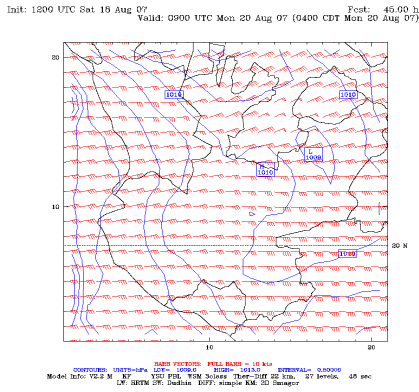
La posición y el desplazamiento de esos grandes sistemas de altas presiones se pueden determinar con el análisis de las cartas del tiempo y con diferentes modelos numéricos de pronóstico del tiempo. En el IAM se puso en marcha recientemente uno de los modelos físico matemáticos más modernos con que se trabaja actualmente la meteorología, (ver:<http://www.udg.mx/wrf/>) éste es el Weather Research and Forecasting (WRF) que es un sistema de predicción numérica de mesoescala de nueva generación, que puede ser

utilizado tanto para el trabajo operativo como para la investigación. El WRF es apropiado para ser aplicado en un amplio rango de escalas desde decenas de metros hasta miles de kilómetros.

Este sistema ha sido producto de la colaboración de diversas instituciones, entre ellas el National Center of Atmospheric Research (NCAR), el National Center for Environmental Prediction (NCEP), el Forecast Systems Laboratory (FSL), la Air Force Weather Agency (AFWA), el Naval Research Laboratory, Oklahoma University y la Federal Aviation Administration (FAA). Actualmente se encuentra en uso en una buena cantidad de instituciones científicas y en servicios meteorológicos del mundo.

En la figura 5 se observan las situaciones meteorológicas dadas por el WRF, que afectan tanto el Estado de Jalisco (a) como toda la República Mexicana y zonas adyacentes (b), donde la letra **H** señala la ubicación de los centros de altas presiones (anticiclones) y la **L** los centros de bajas presiones (ciclones). También se indica por vástagos la dirección y fuerza del viento, para el caso de Jalisco cada 22 km. y para la República Mexicana cada 111 km. Con esta información y su pronóstico a 3 días, que ofrece el modelo, el meteorólogo confecciona el pronóstico del tiempo a mediano plazo (3 días) y la evolución actual y futura de las masas de aire en la región.

(a)



(b)

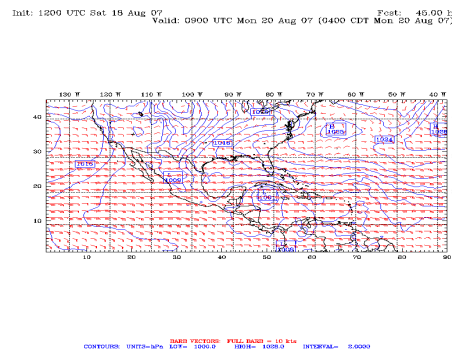
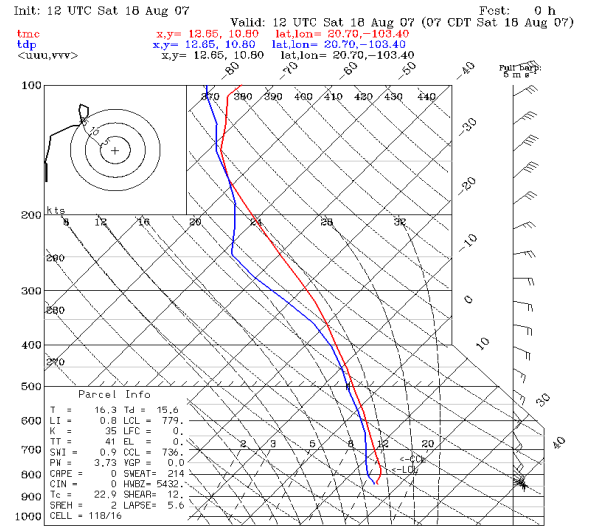


Fig. 5 Mapas del tiempo del Estado de Jalisco (a) y de la República Mexicana (b) obtenidos del modelo WRF

Del modelo WRF también se obtiene el sondeo atmosférico actual derivado del procesamiento de datos de satélite y además confecciona los sondeos virtuales (pronóstico) para los siguientes tres días a intervalos de 3 horas, por lo que se puede ir conociendo el perfil de la atmósfera en una localidad dada y la evolución que tendrán las IT, para el caso que existieran. En la fig. 6 se presentan varios sondeos de la ZMG obtenidos del WRF. En el sondeo (a) de las 07:00 a.m. hora local se observa una débil inversión térmica de unos 40 metros de espesor (línea roja) y un alto contenido de humedad desde la superficie hasta la troposfera (líneas azul y roja muy unidas) y en el sondeo pronóstico para 3 horas adelante (b), se ve como

la inversión térmica existente tres horas antes ya ha desaparecido y la humedad ha disminuido.

(a)



(b)

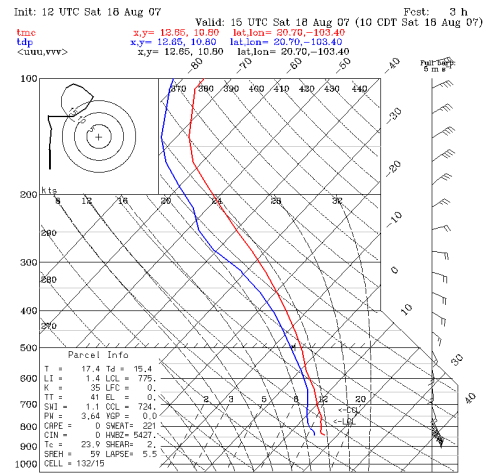


Fig. 6 Sondeos atmosféricos derivados del modelo de análisis y pronóstico del tiempo WRF para la ZMG.

Las imágenes de los satélites meteorológicos también proporcionan valiosa información sobre la situación sinóptica meteorológica en un momento dado y su análisis permite precisar donde se encuentran los diferentes sistemas meteorológicos en el área, las masas de aire y el contenido de vapor de agua, Fig.7 y 8.

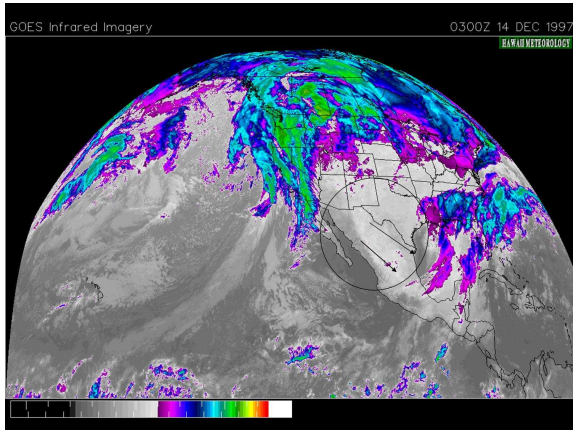


Fig. 7 Imagen del espectro infrarrojo del satélite meteorológico GOES-8 donde se observa un intenso anticiclón afectando gran parte del norte y centro de la República Mexicana.

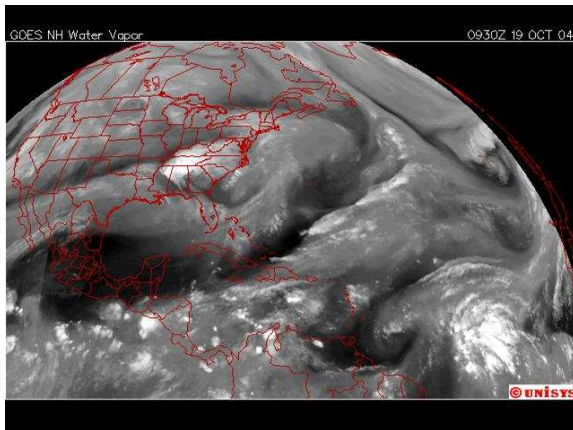


Fig. 8 Imagen del satélite meteorológico GOES-8 que muestra el contenido de vapor de agua en la atmósfera. Las áreas oscuras indican zonas muy secas.

Con los modelos de modelación numérica de la atmósfera se pueden determinar los movimientos verticales del aire y a partir de que el aire ascienda o descienda, se puede conocer que el aire sea más o menos estable. Las IT se producen en condiciones de aire muy estable o lo que es igual a movimientos descendentes de las partículas de aire. En la figura 9 se muestran los movimientos verticales del aire sobre el Estado de Jalisco, las áreas azules son zonas de movimientos descendentes y muy estables y las

amarillas de movimientos ascendentes e inestables.

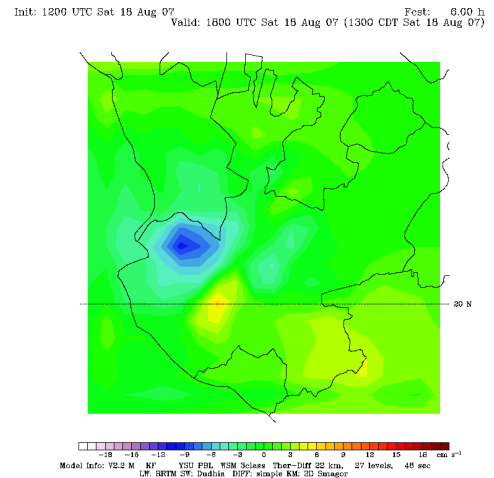


Fig.9 Movimientos verticales del aire sobre el Estado de Jalisco. Áreas azules descendentes (estabilidad). Áreas amarillas ascendentes (inestabilidad).

Además, en la ZMG opera una red automática de monitoreo ambiental operado por SEMADES (Secretaría de Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable) con la cual se obtiene información de los contaminantes contenidos en el aire en 8 puntos de la ciudad y también algunos parámetros meteorológicos, como temperatura, humedad, dirección y fuerza del viento. Esta red, aunque insuficiente en su densidad, dado lo extenso del área que tiene la ZMG, proporciona valiosa información instantánea del índice de calidad del aire y sirve como un diagnóstico, pero no de un pronóstico de la evolución en las próximas horas de los contaminantes presentes. Los datos meteorológicos que proporciona pudieran servir para alimentar algunos de los modelos de mesoescala, como es el caso del WRF, pero tendría que diseñarse un sistema automático de envío de datos, al procesador donde se corre el modelo.

Resultados y logros

Un estudio realizado con datos de sondeos aerológicos de la estación de Colomos, en la ZMG, que se muestra en la figura 10, arrojó lo siguiente:

1. Las inversiones térmicas más intensas (muy fuertes, fuertes y moderadas) se concentran en los meses de estiaje, o sea, desde finales de octubre hasta principios de mayo.
2. Febrero es el mes de mayor frecuencia de inversiones intensas.
3. Las IT débiles se producen todo el año y predominan en el temporal de lluvias (mediados de mayo hasta finales de octubre).
4. En temporal de lluvias son muy escasas o no ocurren las IT intensas.
5. Las IT moderadas y fuertes son las más frecuentes.

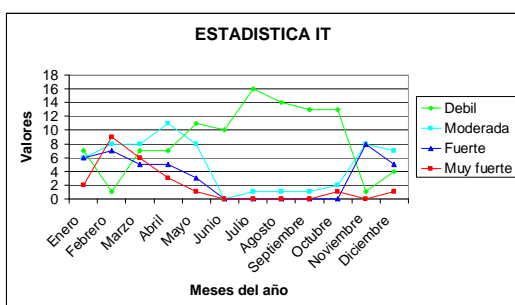


Fig. 10. Comportamiento de las IT por meses en la ZMG.

También se proponen criterios para clasificar la intensidad de las IT basado en tres características básicas de las mismas, dadas por las condiciones meteorológicas que afecten una región.

- Aumento de la temperatura por 100 m de altura.
- Espesor de la capa de inversión desde la superficie hasta el techo de la IT.
- La hora de ruptura de la IT.

De esta forma se tiene:

IT Débil: cuando el aumento de la temperatura con la altura es pequeño, o sea menor de 2°C a 4°C por cada 100 metros; la atmósfera es inestable y con gran contenido de humedad y la hora de ruptura de la capa de inversión es en horas tempranas del amanecer (antes de las ocho de la mañana).

IT Moderada: es un caso particular en que es elevado el aumento de la temperatura con la altura, o sea, mayor de 4°C, pero rompe antes del mediodía debido a condiciones meteorológicas que produzcan fuerte viento, aún cuando la atmósfera sea estable y seca.

IT Fuerte: significativo aumento de la temperatura con la altura, (mayor de 4°C) con la atmósfera muy estable y seca, poco viento o calma y hora de ruptura después del mediodía.

Un caso especial sería el de **IT muy fuerte o extremadamente fuerte**, cuando se cumplen las características de **IT fuerte**, pero con un espesor de capa muy laminar o menor de 10 metros.

En el presente estudio se obtuvieron los datos que se presentan en la Tabla 1 con respecto a los espesores medios, la intensidad media y la hora de ruptura promedio.

Tabla1. Características de las IT en la ZMG

Meses	Espesor Medio (en metros)	Intensidad Media (en °C)	Hora de ruptura promedio (local)
Enero	56	7	13:10
Febrero	68	11	12:17
Marzo	52	8	11:19
Abril	54	8	10:23
Mayo	63	6	09:57
Junio	99	1.2	07:43
Julio	75	2.4	08:15
Agosto	76	2.3	08:45
Septiembre	63	3	08:48
Octubre	84	3.6	10:30
Noviembre	57	9	13:13
Diciembre	48	6.5	12:10

Como se observa en la Tabla 1 los menores espesores se presentan en los meses de estiaje desde noviembre hasta mayo, con un aumento notable en los meses más lluviosos como es el caso de junio, julio y agosto. Septiembre y octubre son meses irregulares en el comportamiento de la lluvia y esto influye en las características de la capa de inversión. También se observa que los meses más secos son los de IT más intensas, destacándose entre ellos noviembre, febrero, marzo y abril.

Sistema de Alerta Temprana

Con la información disponible, se puede preparar un sistema que sea capaz de ofrecer un análisis de la situación atmosférica actual y el pronóstico de las mismas válido para los próximos tres días.

El procedimiento sería como sigue:

1. A las 7 de la mañana se reciben y procesan los datos del sondeo aerológico para obtener la información del grado de intensidad de la IT, hora de ruptura y espesor de la capa. Con esta información se puede tener una apreciación instantánea del comportamiento de la calidad del aire en la ZMG durante el día en cuestión.

2. La corrida del modelo WRF, cuyos resultados se obtienen a las seis de la mañana, muestran el análisis actual de la situación meteorológica general en el área y su evolución en los siguientes 3 días.
3. Con los sondeos pronósticos sobre la ZMG derivados del modelo WRF, se conocerá el comportamiento de las IT en los próximos 3 días. Esto permitirá emitir alertas de contingencias ambientales con mucho tiempo de anticipación.
4. Toda la información derivada del análisis y pronóstico del comportamiento de las IT se colocará en una página de Internet creada a tal efecto y se transmitirá a las organizaciones de gobierno responsables de tomar las medidas adecuadas de alerta y prevención.

Actualmente el Instituto de Astronomía y Meteorología cuenta con el personal calificado en el área de las Ciencias Atmosféricas, capaz de realizar la tarea propuesta. Sin embargo, es necesario apoyo en infraestructura, sobre todo en la ampliación y plena automatización de la red de monitoreo actual de SEMADES, para

aumentar la densidad de datos y su procesamiento en los programas de análisis y pronóstico propuestos.

Otro de los aspectos básicos es que CONAGUA cuente con los recursos necesarios para que no se tome la drástica medida de suspender los sondeos de la estación Colomos. Es necesario aclarar que esta estación está registrada en las de vigilancia meteorológica mundial de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) de Naciones Unidas y sus datos son de intercambio mundial, por lo que una supresión de los mismos implicaría dejar de cumplir con acuerdos internacionales.

Tanto las direcciones de ecología de los municipios de la ZMG, como la SEMADES deberían ser fortalecidas con personal preparado en Meteorología y Climatología a niveles superiores y el IAM puede organizar cursos de alto nivel en esas temáticas para personal de esas entidades con carreras afines.

También se debe fortalecer la infraestructura computacional del IAM para poder aumentar la capacidad de procesamiento computacional de los programas que se utilizaran en el proyecto.

Impactos económico y social

Obviamente que los habitantes de la ZMG puedan ser alertados con suficiente antelación de una posible contingencia ambiental en cuanto a la calidad del aire que se respira y que las autoridades se preparen para tomar medidas que mitiguen el daño, tiene un gran impacto social. Por otra parte, el impacto económico es evidente al poder planificarse con tiempo las actividades económicas; poner a resguardo los materiales y cultivos que puedan ser dañados por los contaminantes o partículas suspendidas, así como otras muchas tareas relacionadas con el turismo, la salud, el transporte, etc.

Aplicación y vinculación de los resultados de investigación con los usuarios

Los resultados de esta investigación ya se han venido aplicando de manera experimental desde hace algunos años y divulgados diariamente a través del Noticiero Matutino de Televisa Estación 4 y su evaluación ha sido muy satisfactoria. Fig.11.



Fig. 11 Forma en que se presentan las condiciones de la Calidad del Aire en la ZMG y su pronóstico, en el Noticiero Matutino GDL Noticias.

En estos momentos se ha preparado una página en Internet donde diariamente se ofrecerá el pronóstico meteorológico a 3 días para cinco zonas del Estado de Jalisco, o sea, la ZMG, Puerto Vallarta, Colotlán, Lagos de Moreno y Ciudad Guzmán y en esta misma página aparecerá el pronóstico para 3 días de la calidad del aire en la ZMG, <http://www.udg.mx/tiempo/tiempo3dias/>. En la figura 12 se ilustra la página.

En breve se firmará un convenio de colaboración IAM-SEMADES donde entre otras cosas se crea un grupo de trabajo con especialistas de ambas instituciones y se pondrá en ejecución el Sistema de Alerta Temprana para la Calidad del Aire que se propone en esta investigación, en el próximo período de estiaje 2007-2008.

Por lo anterior, los resultados de esta investigación estarán al alcance de toda la

comunidad en la página de Internet mencionada arriba y a través de todos los medios de comunicación. También habrá liga directa con el Gobierno del Estado y en particular con SEMADES.



Fig.12 Nueva página de Internet del IAM, para el Pronóstico del Tiempo a 3 días y el Pronóstico de la Inversión Térmica y la Calidad del Aire para 3 días en la ZMG

Glosario de Términos y Abreviaturas

- **Anticiclones:** Sistema meteorológico conformado por una masa de aire de miles de kilómetros de longitud, donde predomina el buen tiempo, condiciones secas y estables. En los anticiclones hay un centro de altas presiones y los vientos giran a favor de las manecillas del reloj en el Hemisferio Norte.
- **Ciclones:** Sistema meteorológico formado por una masa de aire inestable, en general húmeda y frecuentemente asociada con mal tiempo. Es de menor longitud que los anticiclones y en su centro se localizan bajas presiones y los vientos giran en

contra de las manecillas del reloj en el Hemisferio Norte.

- **Inversión Térmica (IT):** Es un fenómeno atmosférico muy común que ocurre con frecuencia en grandes áreas donde los vientos son muy débiles y la componente vertical del viento es descendente, de forma tal que la temperatura aumenta con la altura unos pocos decenas de metros en lugar de disminuir como es normal
- **Modelos numéricos de Pronóstico del Tiempo:** Son programas computacionales que procesan las ecuaciones físicas que controlan los procesos atmosféricos y pronostican el comportamiento de las mismas a diferentes intervalos de tiempo.
- **Sondeos atmosféricos:** Se refiere a sensores ubicados en globos que ascienden desde una estación en tierra y miden las condiciones de la atmósfera, enviando toda la información a través de ondas de radio. También hay mediciones de estos mismos parámetros de manera indirecta en los satélites meteorológicos que orbitan el planeta.
- **WRF (Weather Research and Forecasting):** Es uno de los modelos de predicción numérica más avanzados de la actualidad, el cual permite obtener análisis y pronósticos de más de 120 variables atmosféricas. Se puede trabajar en una escala sinóptica (miles de kilómetros) o en mesoescala (decenas de metros).

Bibliografía

1. MetEd en español. Educación y formación en Meteorología. University

Corporation for Atmospheric Research
(UCAR).

http://www.meted.ucar.edu/index_es.htm

2. Meulenert A.R., Cornejo V.M., Ramírez H.U., García M.E., García F.O., Alcalá J. Análisis de las inversiones térmicas en la ZMG y su relación con los índices de contaminación. Memorias XI Congreso Internacional y Nacional de Ciencias Ambientales. Oaxtepec, Morelos. 7 – 9 junio 2006. En CD.
3. Michalakes, J., S. Chen, J. Dudhia, L. Hart, J. Klemp, J. Middlecoff, and W. Skamarock (2001): *Development of a Next Generation Regional Weather Research and Forecast Model. Developments in Teracomputing: Proceedings of the Ninth ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*. Eds. Walter Zwiefelhofer and Norbert Kreitz. World Scientific, Singapore. pp. 269-276.
4. Ramirez H.U., Meulenert A.R., et al. (2004). Variabilidad del índice UV en la ZMG y su relación con los índices de contaminación durante el 2003. *Clima y Cosmos*. Vol.1. No. 4: 21-30. ISSN 1870-123X.