

DETERMINACIÓN DE LA PRESENCIA DE PARTÍCULAS (PM₁₀) EN PERÚ PRODUCIDAS POR QUEMA DE BIOMASA CON AYUDA DE MODELOS NUMÉRICOS

Aldo Saturnino MOYA ÁLVAREZ^{1*}, René Estevan ARREDONDO¹ y Ricardo Ángel YULI POSADAS²

¹ Universidad Continental de Huancayo. Avenida San Carlos, número 1980, Huancayo, Perú, C. P. 12001

² Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Calle Germán Amézaga número 375, Edificio Jorge Basadre, Ciudad Universitaria, Lima 1, Perú

*Autor para correspondencia: aldomoya00@gmail.com

(Recibido octubre 2015; aceptado abril 2016)

Palabras clave: espesor óptico por aerosoles, patrones sinópticos, incendios forestales, red de monitoreo

RESUMEN

Con el objetivo de implementar una red de monitoreo de partículas (PM₁₀) en Perú, se realiza una investigación con ayuda del modelo de pronóstico e investigaciones sobre el tiempo, acoplado con el modelo de química atmosférica (WRF-CHEM, por sus siglas en inglés) para determinar el transporte y dispersión de dichas partículas, producidas por la quema de biomasa, ya sea en Perú o en regiones aledañas. Se tomaron los datos de emisiones del inventario de incendios del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de Estados Unidos (NCAR, por sus siglas en inglés) y como base meteorológica, los datos de salida del modelo meteorológico “Sistema Global de Predicción” (GFS, por sus siglas en inglés). Se seleccionó el periodo junio-agosto de 2015. Se determinó que ocurrió un incremento progresivo del número de focos en la región, que originó un aumento, también progresivo, de las concentraciones de partículas sobre el territorio y particularmente sobre Perú. Se determinó que Perú es afectado por partículas generadas por incendios dentro del país y las provenientes desde países vecinos, principalmente desde Brasil y Bolivia. El análisis fotométrico registró un incremento progresivo del espesor óptico por aerosoles desde mediados de julio, siendo más notable en agosto, en correspondencia con el incremento de las concentraciones de PM₁₀ simuladas. De lo anterior se infiere la necesidad de establecer una red de monitoreo de concentraciones de PM₁₀, principalmente en las regiones central y norte de Perú, dada la importancia de su control para la salud.

Key words: aerosol optical depth, synoptic patterns, forest fires, monitoring network

ABSTRACT

This study is conducted with the objective to implement a PM₁₀ monitoring network in Peru. We employ the Weather Research and Forecasting - Chemistry model (WRF-CHEM) to determine the transport and dispersion of particles generated by biomass burning in Peru and neighboring countries. We used the fire emission inventory from NCAR and meteorological data from the Global Forecast System (GFS) model. The period June–August of 2015 was studied. A progressive increase of fire hotspots in the region was found, which originated an increase, also progressive, of particle concentrations over the region and especially over Peru. We determined that Peru is affected by

particles generated by fires within the country and from neighboring countries, mainly from Brazil and Bolivia. The photometric analysis recorded a progressive increase of aerosol optical depth since mid-July, with maximums in August, corresponding with the increase of simulated PM₁₀ concentrations. These results point out to the necessity to establish a PM₁₀ concentration monitoring network, mainly in central and northern Peru, given the importance of controlling these particles for public health.

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales constituyen actualmente un problema ambiental importante que con frecuencia llega a ocasionar incluso la pérdida de vidas humanas (PROFONAMPE 2000), además de graves daños económicos (Llerena 1991) y la reducción de áreas boscosas (Reátegui 1996). Desde el punto de vista global son muy importantes las emisiones de gases y partículas a la atmósfera, entre ellos los conocidos gases de efecto invernadero (Blake et al. 1996, Andreae y Merlet 2001). No obstante, actualmente las emisiones de dióxido de carbono provenientes de los incendios y quemas forestales son responsables de menos del 25 % de las emisiones totales de este gas en el mundo (Castillo et al. 2003). En la región del Amazonas son muy frecuentes también los incendios producidos por la quema de vegetación durante prácticas de agricultura y deforestación (Alencar et al. 2006, Montenegro et al. 2011). La quema de biomasa, además, es la mayor fuente de emisiones de partículas carbonáceas finas en la troposfera global (Akagi et al. 2011).

A pesar de los daños que causa la quema de biomasa, sólo recientemente se han comenzado a analizar sus impactos atmosféricos y el transporte de contaminantes en Sudamérica (Mielnicki et al. 2005a, Mielnicki et al. 2005b, Boian 2005, Edwards et al. 2006).

Tradicionalmente la modelación de los procesos químicos en los sistemas de calidad del aire se realiza independientemente de la modelación meteorológica, mediante una integración de los mecanismos químicos sobre una malla externa que contiene información sobre el transporte de masa y los campos meteorológicos (Fernández et al. 2010). La ventaja de utilizar el modelo acoplado WRF-CHEM radica precisamente en que éste posee una estructura modular que permite acoplar la modelación meteorológica con los procesos químicos y considerar la interacción que existe entre ambos debido a que en la atmósfera real también los procesos químicos pueden afectar la meteorología. Por ejemplo, a través de sus efectos sobre el

balance de radiación, así como la interacción de los aerosoles con las nubes a través de la nucleación de gotas (Grell et al. 2005, Fast et al. 2006, Chapman et al. 2009).

El presente trabajo tiene como objetivo fundamental simular el transporte de material particulado de 10 µm de diámetro (PM₁₀), emitido por la quema de biomasa, producida por los incendios forestales que tienen lugar en Perú y en países vecinos, y que son transportadas a largas distancias en dependencia de la dirección y de la fuerza del viento. Con la simulación se persigue contar con una estimación de las zonas del Perú que son afectadas por estas partículas con el fin de implementar una red de monitoreo de las mismas. Para lograr el objetivo se utilizó el modelo Weather Research and Forecasting acoplado con el modelo de química atmosférica (WRF-CHEM).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la implementación del modelo se emplearon las condiciones iniciales y de frontera del Sistema Global de Predicción (GFS, por sus siglas en inglés), con una resolución horizontal de 0.5° y limitada entre los 30° y los 120° de longitud oeste y entre los 60° de latitud sur y los 30° de latitud norte. Se utilizaron los datos pronóstico de las 00 del Tiempo Universal Coordinado (UTC, por sus siglas en inglés) hasta 72 h.

Se emplearon 24 niveles de salida del GFS en el plano vertical (nivel medio del mar (nmm), 1000, 975, 950, 925, 900, 850, 800, 750, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 200, 150, 100, 70, y 50 hPa). Las variables tomadas fueron las siguientes:

- En la altura: altura de geopotencial, humedad relativa, temperatura, componentes zonal y meridional del viento.
- En superficie: presión a nivel medio del mar, presión en la superficie, temperatura superficial, contenido de agua del suelo en 4 capas, temperatura y punto de rocío a 2 m de altura, componentes zonal y meridional del viento a 10 m de altura y albedo.

Para la construcción de los mapas promedio de altura de geopotencial se emplearon los datos del reanálisis desarrollado por el Centro Nacional de Predicciones Ambientales y por el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de los Estados Unidos de Norteamérica (NCEP–NCAR, por sus siglas en inglés) para el periodo 1979–2013, correspondiente a los meses de junio, julio y agosto (Kalnay et al. 1996).

Los datos de emisión fueron tomados del sitio Detección Remota y Predicción de la Composición Atmosférica (ACRESP, por sus siglas en inglés) del Inventario de incendios (FINN, por sus siglas en inglés) del NCAR, con información derivada del Espectroradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS, por sus siglas en inglés), cuyas emisiones son calculadas casi en tiempo real. Se tomaron solamente los datos de emisiones diarias de material particulado del tipo PM₁₀, mostrados de forma explícita en los ficheros.

Se empleó también información del espesor óptico por aerosoles (EOA) derivada a partir de las mediciones que se realizan con un fotómetro solar del tipo CIMEL en el Observatorio “Huancayo” (12.04020 S y 75.32090 W, 3352 msnm), perteneciente al Instituto Geofísico del Perú (IGP). Los datos se tomaron para el periodo junio-agosto de 2015 con el objetivo de ser comparados con las concentraciones de aerosoles obtenidas con el modelo.

Configuración del modelo WRF-CHEM

Las simulaciones se realizaron para un dominio, cuyas características se especifican en el **cuadro I**. Para el experimento se seleccionó el periodo junio-agosto de 2015, durante el cual tradicionalmente se manifiesta un incremento progresivo del número de focos de incendios en la región de estudio como fue mencionado anteriormente.

Como se indica en el **cuadro I**, las condiciones iniciales y de contorno del dominio externo son tomadas del pronóstico del modelo global GFS con una resolución de 0.5°, inicializado en el mismo horario para el cual se realizan las simulaciones de WRF-CHEM. En este cuadro la característica Frecuencia de CC (Frecuencia de Condiciones de Contorno) se refiere a la frecuencia con que las condiciones de contorno son capturadas de la salida del modelo base, en este caso, el GFS.

Los esquemas de parametrización utilizados se muestran en el **cuadro II**. Para la convección se seleccionó el esquema de Grell-Freitas (Grell y Freitas 2014). Otros esquemas de parametrizaciones que se describen en la literatura internacional son los de Kain-Fritsch (1990 y 2004), de Betts-Miller

CUADRO I. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL DOMINIO Y DATOS INICIALES Y DE FRONTERA

Características	Dominio
Límites	Entre los 5.3° N y los 20.9° S Entre los 83.5° y los 59.5° de W
Paso horizontal de malla	30 km
Dimensiones (XYZ)	90 × 100 × 32
Paso de tiempo	180 s
Condiciones iniciales	GFS* 0.5° × 0.5° pronóstico
Condiciones de Contorno (CC)	GFS* 0.5° × 0.5° pronóstico
Frecuencia de CC	3 h

*Sistema Global de Predicción

CUADRO II. ESQUEMAS DE PARAMETRIZACIÓN EMPLEADOS

Procesos	Esquemas de parametrizaciones (ambos dominios)
Convección	Grell – Freitas
Capa fronteriza	ACM2*
Microfísica	Esquema de Lin et al. (1983)
Radiación	Esquema RRTMG**
Suelo	Modelo de 4 capas de suelo, Noah LSM***

*Modelo 2 de asimetría convectiva

** Modelo rápido de transferencia radiativa – global

*** Modelo de superficie de suelo Noah

(ECMWF 1984), y de Grell y Devenyi (2002), entre otros.

Para la capa límite de la atmósfera se seleccionó el Modelo 2 de Asimetría Convectiva (ACM2, por sus siglas en inglés), descrito en los trabajos de Pleim (2007).

El modelo de radiación seleccionado fue el “modelo rápido de transferencia radiativa-global” (RRTMG, por sus siglas en inglés), usado anteriormente para radiación de onda corta y onda larga en el modelo del Centro Europeo de Pronóstico a Mediano Plazo (Morcrette et al. 2008), en los modelos GFS y WRF y en el Modelo Climático ECHAM5 (Wild y Roeckner 2006). RRTMG es una versión más reciente del modelo rápido de transferencia radiativa (RRTM, por sus siglas en inglés; Iacono et al. 2000) y con una mejor representación de la nubosidad. El RRTM también fue descrito por Mlawer et al. (1997) y utiliza el método k-correlacionado (Goody y Yung 1995) para implementar un algoritmo que destaca frente a otros, por su rapidez.

Para la microfísica se escogió el esquema de Lin et al. (1983). Esta parametrización incluye el gránulo blando, la sedimentación de hielo y el tiempo de disgregación del hielo.

El modelo de suelo utilizado es el conocido como Modelo de Superficie de Suelo Noah (Noah LSM, por sus siglas en inglés) y está basado en el Modelo de Superficie de Suelo de la Universidad del Estado de Oregón (OSU LSM, por sus siglas en inglés), desarrollado por Pan y Mahrt (1987) y empleado por Chen et al. (1996). Comparando con datos del primer experimento de campo realizado en la ejecución del Proyecto Internacional de Climatología de la Superficie Terrestre Mediante Satélites (conocido como experimento FIFE, por sus siglas en inglés), Chen (1997) encontró que el OSU LSM se comportaba a la altura de modelos más complejos. Su balance entre simplicidad y error lo llevaron a ser implementado en los modelos operacionales del NCEP y del NCAR. En Chen y Dudhia (2001a y 2001b) puede encontrarse una descripción de la implementación del OSU LSM en el Modelo Meso Escalar de 5^{ta} Generación (MM5, por sus siglas en inglés). El llamado Noah LSM es la evolución del OSU LSM implementada en WRF y en el Modelo Meso Escalar para Norteamérica (NAM, por sus siglas en inglés). Este modelo divide el suelo en 4 capas de grosores: 10, 30, 60 y 100 cm, hasta una profundidad total de dos metros.

El modelo químico utilizado está basado en los modelos Modelo Modal Dinámico de Aerosoles para Europa (Ackermann et al. 1998) y el Modelo Secundario Orgánico de Aerosoles (Schell et al. 2001) (MADE/SORGAM por sus siglas en inglés). MADE/SORGAM considera las interacciones de los

aerosoles con la radiación solar y la microfísica de nubes. Se empleó el mecanismo fotoquímico RADM2 (NAPAP 1989, Stockwell et al. 1990).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la **figura 1** se muestran, con puntos, los focos de incendios en la región de estudio para los meses de junio, julio y agosto de 2015. Se aprecian puntos sobre Bolivia, Brasil y Perú en todos los meses, con un marcado incremento de un mes a otro. En el caso de Perú, la mayor parte de los focos se concentraron en la zona central del país, tanto zonal como meridionalmente. En el caso de Bolivia, los focos se concentran hacia la porción norte de la región representada en la figura y en el caso de Brasil hacia el suroeste del territorio enmarcado en el dominio de trabajo.

La **figura 2** muestra la distribución de las concentraciones medias mensuales de PM_{10} , generadas a partir de las salidas del WRF-CHEM, para los tres meses analizados. Para el mes de junio se aprecian máximos sobre el suroeste de Brasil, norte de Bolivia y la zona central de Perú, en correspondencia con las regiones con mayor número de incendios mostrados en la **figura 1**. Para los meses de julio y agosto estos máximos se incrementan cuantitativamente, a la vez que sus zonas de impacto se amplían, lo cual se corresponde también con el incremento del número de incendios para estos meses.

La **figura 3** muestra los campos de altura de geopotencial medios entre los 1000 y los 850 hPa (troposfera baja) para el período 1979-2013, correspondientes a los meses de junio, julio y agosto. Se

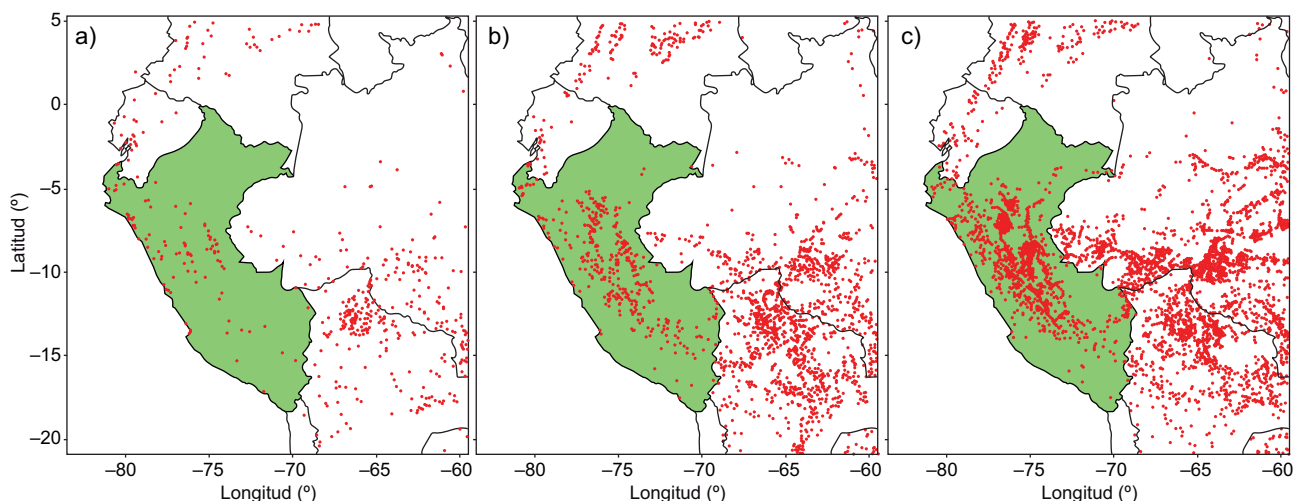


Fig. 1. Focos de incendios registrados en la región de estudio: (a) para junio, (b) para julio y (c) para agosto

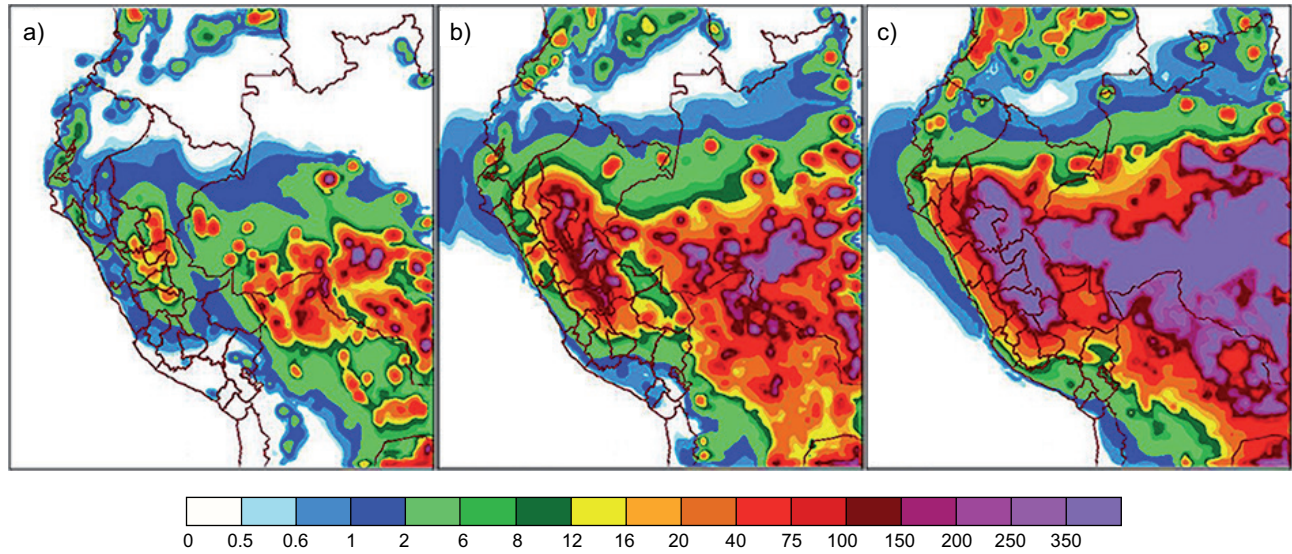
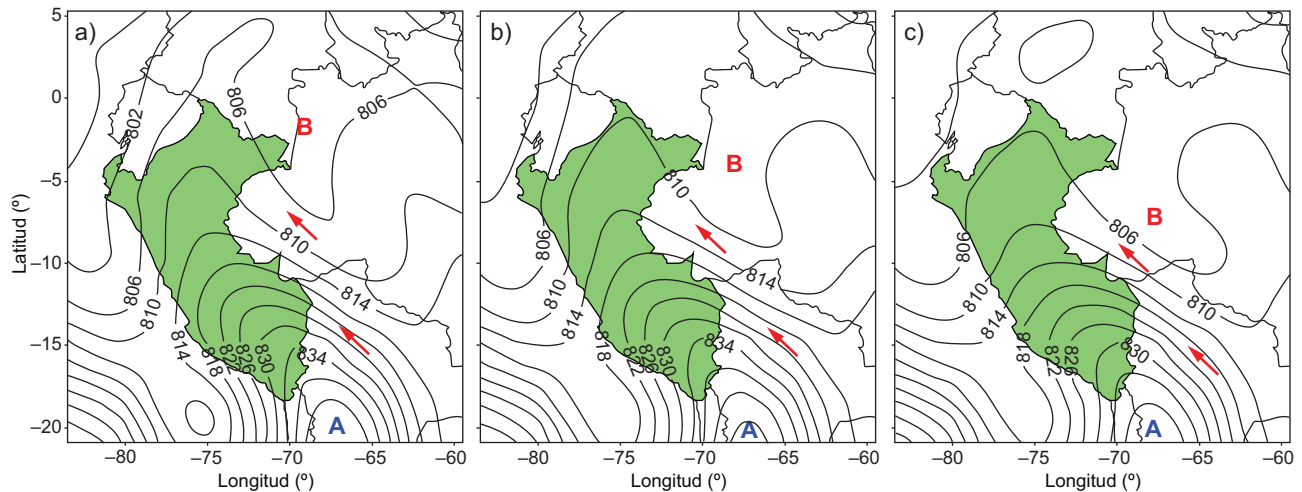


Fig. 2. Distribución de las concentraciones medias mensuales de PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), calculadas a partir de las salidas del modelo de pronóstico e investigaciones sobre el tiempo, acoplado con el modelo de química atmosférica (WRF-CHEM): (a) junio, (b) julio y (c) agosto



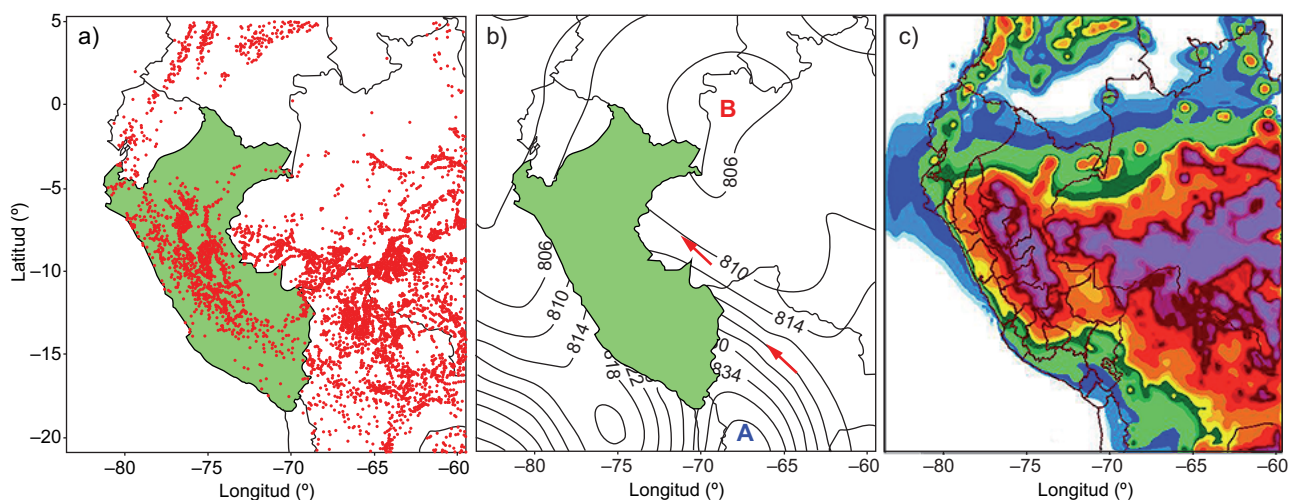


Fig. 4. Análisis para el trimestre junio-agosto de 2015: (a) distribución de los focos de quema de biomasa en la región de estudio, (b) campo de altura de geopotencial medio entre los 1000 y los 850 hPa para el periodo 1979-2013 y (c) distribución de la concentración media trimestral ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). En (b) “A” en azul es una zona de alta presión y “B” en rojo, un centro de baja presión

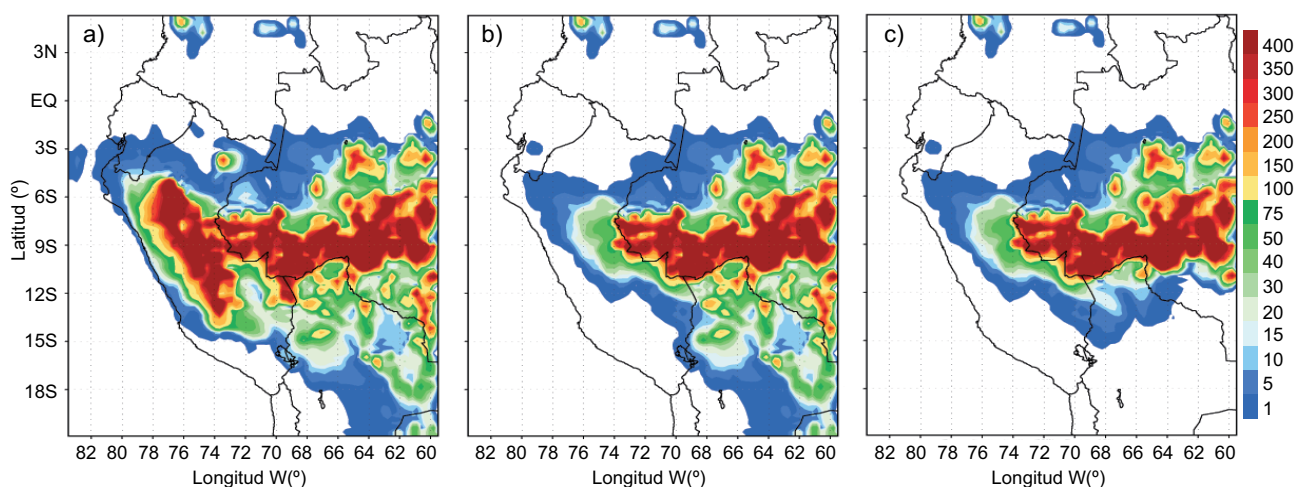


Fig. 5. Concentraciones de PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) obtenidas con el modelo, inicializado el 24 de agosto de 2015 (plazo 54 h de pronóstico): (a) incluye los focos ubicados en Perú y fuera de este, (b) incluye solamente los focos ubicados en Brasil y Bolivia y (c) incluye solamente los focos ubicados en Brasil

la dirección del flujo predominante del Este-Sudeste mostrado en las **figuras 3b** y **4b**. Sin embargo, en la **figura 5c** se aprecia que mayoritariamente la influencia se recibe de Brasil, mientras que desde Bolivia es poco significativa.

El **cuadro III** ilustra los porcentajes de aporte a las concentraciones de PM_{10} en diferentes localidades, de los incendios producidos en Perú y de los que ocurrieron en Brasil. Como se puede apreciar, el mayor aporte lo realizaron los incendios ocurridos en Perú, aunque hay un determinado aporte de los que tienen lugar en Brasil, más significativo en localidades cercanas a las fronteras, como son Pucallpa y Puerto Maldonado. De este cuadro se deduce que

el aporte de los incendios producidos en Bolivia es insignificante, con solo 0.5 % en Puerto Maldonado.

En la **figura 6** se representan las curvas normalizadas de los valores medios diarios de las concentraciones de PM_{10} obtenidos con el modelo y del espesor óptico por aerosoles registrado para el periodo junio-agosto para la localidad de Huayao, donde se encuentra ubicado el observatorio “Huancayo”. Se observa que de forma general existe una buena correspondencia entre ambas curvas para los tres meses, con un coeficiente de correlación del 72.4 % para el trimestre y de 76.8 % para el mes de agosto. Desde inicios del mes de junio hasta mediados de agosto se aprecia que tanto el EOA como las concentraciones tienen un comportamiento

CUADRO III. APOORTE DE LAS EMISIONES DE QUEMA DE BIOMASA PRODUCIDAS EN PERÚ Y BRASIL A LAS CONCENTRACIONES DE PM₁₀ PARA DIFERENTES LOCALIDADES SEGÚN INICIALIZACIÓN DEL 24 DE AGOSTO DE 2015 A LAS 00 UTC*

Localidad	% de aporte Incendios Brasil	% de aporte Incendios Perú
Huancayo	2.3	97.7
Cajamarca	5.1	94.9
Pucallpa	16.5	83.5
Iquitos	1.1	98.9
Huánuco	2.6	97.4
P. Maldonado	15.0	84.5

*Tiempo Universal Coordinado

relativamente estable con un ligero crecimiento, sin embargo, a partir de ese momento comienza un incremento significativo de ambas variables.

En la **figura 7** se representan los porcentajes correspondientes a la clasificación de los diferentes tipos de aerosoles, para cada mes de los aquí analizados. En esta clasificación entran los aerosoles de tipo

marítimo, continental, polvo, mezcla y contaminado. La mencionada clasificación se ha realizado de acuerdo con los criterios de Hess et al. (1998), Hoben et al. (2001) y Dubovik et al. (2002).

En correspondencia con los análisis anteriores se puede apreciar el incremento paulatino de los aerosoles de tipo contaminado a lo largo de los tres meses. Los aerosoles de tipo continental consideran la contribución de especies carbonáceas originadas fundamentalmente como consecuencia de contaminación de ciudades e industrias, básicamente, como consecuencia de la quema incompleta de combustibles fósiles. En el presente estudio los aerosoles de tipo continental constituyen básicamente el EOA de fondo en la zona de estudio, con un valor medio de 0.088 para el trimestre analizado. Sin embargo, el EOA del tipo contaminado alcanza un valor medio de 0.210 para el mismo periodo. Mientras que en los meses de junio y julio los mayores porcentajes corresponden a los aerosoles del tipo continental con valores superiores a 70 %, en el mes de agosto existe un predominio de los aerosoles del tipo contaminados, con un 48 %. Los aerosoles de tipo contaminado

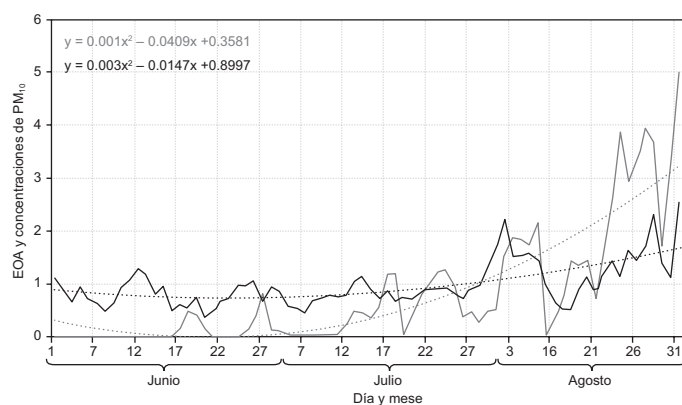


Fig. 6. Curvas normalizadas del espesor óptico por aerosoles (EOA, azul) y de concentraciones de PM₁₀ (roja) obtenidas con el modelo para los meses de junio a agosto de 2015

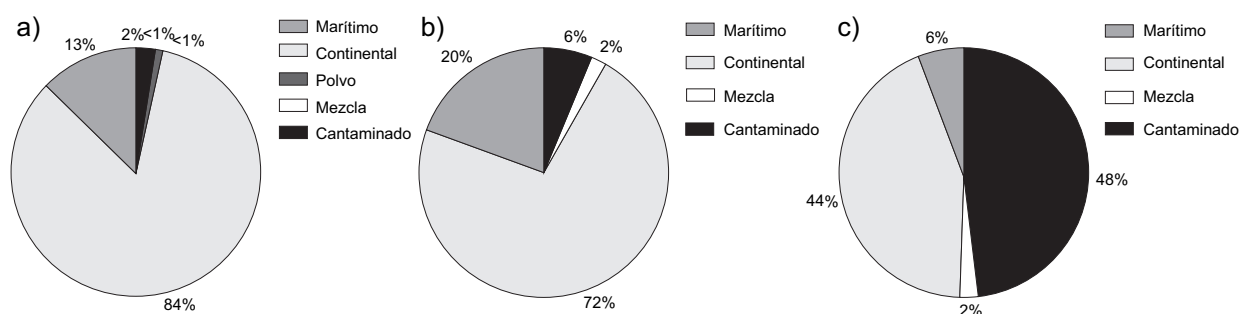


Fig. 7. Porcentaje de las clasificaciones de los diferentes tipos de aerosoles registrados por el fotómetro solar ubicado en el observatorio "Huancayo": (a) para junio, (b) para julio y (c) para agosto

están compuestos básicamente por especies carbonáceas, las mismas que forman parte de los aerosoles generados como consecuencia de la quema de biomasa según Dubovik et al. (2002). Este análisis por tipos de aerosoles corrobora, por tanto, los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas con el WRF-CHEM, sobre todo si se tiene en cuenta que la información de entrada al modelo WRF-CHEM está constituida solamente por las emisiones de PM₁₀ en los puntos de incendio.

CONCLUSIONES

Los resultados del trabajo arrojaron que sobre toda la región de estudio tiene lugar un incremento progresivo, desde junio hasta agosto, del número de focos de incendios, lo cual dio lugar a un aumento, también progresivo, de las concentraciones de partículas PM₁₀ sobre todo el territorio y particularmente sobre Perú. Se pudo definir que el territorio peruano es afectado, tanto por partículas generadas por incendios dentro del país, como por partículas provenientes de incendios ocurridos en países vecinos, como Brasil y Bolivia, este último con una contribución muy baja en relación con Brasil y con el propio Perú. El estudio de los patrones sinópticos medios de latitudes bajas para el período estudiado confirmó que en esta época del año predomina un flujo de aire orientado desde el sudeste hacia el noroeste, que garantiza el transporte de partículas desde los países antes mencionados hacia el Perú. Un estudio de caso simulado arrojó que Brasil realizó mayor aporte que Bolivia, mientras que las mayores concentraciones de PM₁₀ en Perú resultaron de incendios que tienen lugar en su el propio territorio.

El EOA registró un incremento progresivo a partir de mediados de julio, que fue más notable durante el mes de agosto, en correspondencia con el incremento de las concentraciones de PM₁₀. Los análisis realizados arrojaron un incremento de material carbonáceo, más notable en agosto, típico de las emisiones de partículas producidas por quema de biomasa. De todo lo anterior se infiere la necesidad de establecer una red de monitoreo de concentraciones de PM₁₀, fundamentalmente en las regiones central y norte de Perú, dada la importancia que su control significa para la salud de la población.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Dra. Yamina Silva Vidal por su esfuerzo en el establecimiento y mantenimiento del

sitio “Huancayo - Instituto Geofísico del Perú” perteneciente a la Red Robótica de Aerosoles (Aeronet, por sus siglas en inglés).

REFERENCIAS

- Ackermann I.J., Hass H., Memmesheimer M., Ebel A., Binkowski F.S. y Shankar U. (1998). Modal aerosol dynamics model for Europe. Development and first applications. *Atmos. Environ.* 32, 2981-2999. DOI: 10.1016/S1352-2310(98)00006-5
- Akagi S. K., Yokelson R. J., Wiedinmyer C., Alvarado M. J., Reid J. S., Karl T., Crounse J. D. y Wennberg P. O. (2011). Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models. *Atmos. Chem. Phys.* 11, 4039-4072. DOI: 10.5194/acp-11-4039-2011
- Alencar A., Nepstad D. y Vera M. C. (2006). Forest understory fire in the Brazilian Amazon in ENSO and Non-ENSO years: Area burned and committed carbon emissions. *Earth Interact.* 10, 1-17. DOI: 10.1175/EI150.1
- Andreae M. O. y Merlet P. (2001). Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochem. Cycles* 15, 955-966. DOI: 10.1029/2000GB001382
- Avissar R. y Nobre C. A. (2002). Preface to special issue on the large-scale biosphere-atmosphere experiment in Amazonia (LBA). *J. Geophys. Res.* 107, 8034. DOI: 10.1029/2002JD002507
- Blake N. J., Collins J. B. y Sachse G. W. (1996). Biomass burning emissions and vertical distribution of atmospheric methyl halides and other reduced carbon gases in the South Atlantic region. *J. Geophys. Res.* 101, 24151-24164. DOI: 10.1029/96JD00561
- Boian C. y Kirchhoff V. W. J. H. (2005). Surface ozone enhancements in the south of Brazil owing to large-scale air mass transport. *Atmos. Environ.* 39, 6140-6146. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.06.041
- Castillo M., Pedernera P. y Peña E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente. Una síntesis global. *Revista Ambiente y Desarrollo* 19, 44-53. [en línea]. http://linfor.forestaluchile.cl/wp-content/uploads/2014/03/ID-05-2003-Incendios-forestes-y-M.amb_.pdf 10/09/2015
- Chapman E., Gustafson Jr W., Easter R., Barnard J., Ghan S., Pekour M. y Fast J. (2009). Coupling aerosol-cloud-radiative processes in the WRF-CHEM model: Investigating the radiative impact of elevated point sources. *Atmos. Chem. Phys.* 9, 945-964. DOI: 10.5194/acp-9-945-2009

- Chen F. (1996). Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. *J. Geophys. Res.* 101, 7251-7268. [en línea]. <http://alanbetts.com/workspace/uploads/chenetal-95jd02165-1276805602.pdf> 23/07/2015
- Chen T. H., Henderson-Seller A., Milly P. C. D., Pitman A. J., Beljaars A. C. M., Polcher J., Abramopoulos F., Boone A., Shang S., Chen F., Dai Y., Desborough C. E., Dickinson R. E., Dumenil L., Ek M., Garrat J. R., Gedney N., Gusev Y. M., Kim J., Koster R., Kowalczyk E. A., Laval K., Lean J., Lettenmaier D., Liang X., Mahfouf J. F., Mengelkamp H. T., Mitchell K., Nasonova O. N., Noilhan J., Robock A., Rosenzweig C., Schaake J., Schlosser C. A., Schulz J. P., Shao Y., Shmakin A. B., Verseghi D. L., Wetzel P., Wood E. F., Xue Y., Yang Z. L. y Zeng Q. (1997). Cabauw experimental results from the project for intercomparison of land-surface parameterization schemes. *J. Climate* 10, 1194-1215.
- Chen F. y Dudhia J. (2001a). Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Mon. Wea. Rev.* 129, 569-585. [en línea]. http://box.mmm.ucar.edu/mm5/lsm/MWR_CD_1.pdf 23/07/2015
- Chen F. y Dudhia J. (2001b). Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM 5 Modeling System. II- Preliminary model validation. *Mon. Wea. Rev.* 129, 587-604.
- Dubovik O., Holben B., Eck T. F., Smirnov A., Kaufman Y. J., King M. D., Tanré D., y Slutsker I. (2002). Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. *J. Atmos. Sci.* 59, 590-608. DOI: 10.1175/1520-0469(2002)059<0590:VOA AOP>2.0.CO;2
- ECMWF (1984). A new convective adjustment scheme, Part I and II. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Reporte técnico. Reading, Reino Unido, 43-65 pp.
- Edwards D. P., Emmons L. K., Gille J. C., Chu A., Attié J. L., Giglio L. y Drummond J. R. (2006). Satellite-observed pollution from Southern Hemisphere biomass burning. *J. Geophys. Res.* 111, 1984-2012. DOI: 10.1029/2005JD006655
- Fast J. D., Gustafson Jr W. I., Easter R. C., Zaveri R. A., Barnard J. C., Chapman E. G., Grell G. A. y Peckham S. E. (2006). Evolution of ozone, particulates, and aerosol direct radiative forcing in the vicinity of Houston using a fully coupled meteorology-chemistry-aerosol model. *J. Geophys. Res.* 111, 1-29. DOI: 10.1029/2005JD006721
- Fernandez R., Allende D., Castro F., Cremades P. y Puliafito E. (2010). Modelado regional de la calidad del aire utilizando el modelo WRF/CHEM: Implementación de datos globales y locales para Mendoza. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 14, 43-50. [en línea]. <http://www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2010/2010-t001-a007.pdf> 13/05/2015
- Grell G. y Devenyi D. A. (2002). Generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *J. Geophys. Res.* 29, 38-51. DOI: 10.1029/2002GL015311
- Grell G., Peckhama S. E., Schmitz R., McKeenb S. A., Frost G., Skamarockd W. C. y Edere B. (2005). Fully coupled "online" chemistry within the WRF model. *Atmos. Environ.* 37, 6957-6975. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.04.027
- Grell G. A. y Freitas S. R. (2014). A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. *Atmos. Chem. Phys.* 14, 5233-5250. DOI: 10.5194/acp-14-5233-2014
- Goody R. M. y Yung Y. L. (1995). Atmospheric radiation: Theoretical basis. 2^{da} ed. Oxford University Press. Oxford, Reino Unido. 519 pp.
- Hess M., Koepke P. y Schult I. (1998). Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 79, 831-844. DOI: 10.1175/1520-0477(1998)079<0831:OPOAA C>2.0.CO;2
- Holben B. N., Tanré D., Smirnov A., Eck T. F., Slutsker I., Abuhassan N., Newcomb W. W., Schafer J. S., Chatenet B., Lavenu F., Kaufman Y. J., Vande Castle J., Setzer J., Markham B., Clark D., Frouin R., Halthore R., Karneli A., O'Neill N. T., Pietras C., Pinker R. T., Voss K. y Zibordi G. (2001). An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET. *J. Geophys. Res.* 106, 12067-12097. DOI: 10.1029/2001JD900014
- Iacono M. J., Mlawer E. J., Clough S. A. y Morcrette J. J. (2000). Impact of an improved longwave radiation model, RRTM, on the energy budget and thermodynamic properties of the NCAR community climate model, CCM3. *J. Geophys. Res.* 105, 14873-14890. DOI: 10.1029/2000JD900091
- Kain J. S. y Fritsch J. M. (1990). A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.* 47, 2784-2802. DOI: 10.1175/1520-0469(1990)047<2784:AO DEPM>2.0.CO;2
- Kain J. S. (2004). The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.* 43, 170-181. DOI: 10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU >2.0.CO;2
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woolen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah

- M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R. y Joseph D. (1996). The NCEP/NCAR 40-Year reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 77, 437-471. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
- Llerena C. (1991). Contaminación atmosférica, efecto invernadero y cambios climáticos: sus impactos forestales. *Revista Forestal del Perú* 18, 101-135.
- Lin Y. L., Farley R. D. y Orville H. D. (1983). Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Appl. Meteor.* 22, 1065-1092. DOI: 10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2
- Mielnicki D. M., Canziani P. O., Drummond J. y Skalany J. P. (2005a). La quema de biomasa en Sudamérica vista desde el espacio. Memorias. CONGREGMET IX, Buenos Aires, Argentina, BA. 3 al 7 de octubre, 2005. [en línea]. http://200.16.86.38/uca/common/grupo72/files/Quema_biomasa_desde_espacio.pdf 04/09/2015
- Mielnicki D. M., Canziani P. O. y Drummond J. (2005b). Quema de biomasa en el centro-sur de Sudamérica: incendios locales, impactos regionales. Memorias. CONGREGMET IX, Buenos Aires, Argentina, BA. 3 al 7 de octubre, 2005. [en línea]. http://200.16.86.38/uca/common/grupo72/files/QUema_biomasa_centro_sur_sudamerica.pdf 04/09/2015
- Mlawer E. S., Taubman P., Brown M., Iacono M. J. y Clough, S. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.* 102, 16,663-16,682. DOI: 10.1029/97JD00237
- Morcrette J. J., Barker H. W., Cole J. S. Iacono M. J. y Pincus R. (2008). Impact of a new radiation package, McRad, in the ECMWF Integrated Forecasting System. *Mon. Weather Rev.* 136, 4773-4798. DOI: 10.1175/2008MWR2363.1
- Montenegro D., Schaldach R., Alcamo J., Bondeau A., Msangi S., Priess J. A., Silvestrini R. y Soares-Filho B. S. (2011). Impacts of climate change and the end of deforestation on land use in the Brazilian legal Amazon. *Earth Interac.* 15, 1-29. DOI: 10.1175/2010EI333.1
- NAPAP (1989). The regional acid deposition model and engineering model. State-of Science/Technology. National Acid Precipitation Assessment Program. Reporte 4. Washington, DC, EUA, 1-130 pp.
- Pan H. y Mahrt L. (1987). Interaction between soil hydrology and boundary-layer development. *Bound. Layer Meteor.* 38, 185-202. DOI: 10.1007/BF00121563
- Pleim J. (2007). A combined local and non-local closure model for the atmospheric boundary layer. Part I: Model description and testing. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 46, 1383-1395. DOI: 10.1175/JAM2539.1
- PROFONAMPE (2000). Situación ecológica ambiental del Santuario Histórico de Machu Picchu: Una aproximación. Fondo de Promoción de las Áreas Naturales Protegidas del Perú. Reporte. Cusco, Perú, 17-93 pp.
- Reátegui F. (1996). Monitoreo continuo de los procesos de deforestación en la amazonía peruana. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Perú, 84 pp.
- Schell, B., Ackermann I. J., Hass H., Binkowski F.S. y Ebel A. (2001). Modeling the formation of secondary organic aerosol within a comprehensive air quality model system. *J. Geophys. Res.* 106, 275-293. DOI: 10.1029/2001JD000384
- Stockwell W.R., Middleton P., Chang J.S. y Tang X. (1990). The second-generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling. *J. Geophys. Res.* 95, 16343-16367. DOI: 10.1029/JD095iD10p16343
- Wild M. y Roeckner E. (2006). Radiative fluxes in the ECHAM5 general circulation model. *J. Clim.* 19, 3792-3809, DOI: 10.1175/JCLI3823.1