

‘Análisis espacio-temporal de la distribución de aerosoles atmosféricos en la ciudad de Córdoba (Argentina) y desarrollo de un modelo predictivo de los niveles de material particulado’

por **Lara Sofía Della Ceca**

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía y Física
y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich
como parte de los requerimientos para la obtención del grado de

MAGÍSTER EN APLICACIONES ESPACIALES DE ALERTA Y
RESPUESTA TEMPRANA A EMERGENCIAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Marzo, 2018

©IG - CONAE/UNC 2018

© FAMAFA - UNC 2018

Directora: Hebe Alejandra Carreras (IMBIV-CONICET, Argentina)

Co-Directora: Francesca Barnaba (ISAC-CNR, Italia)

Asesora técnica: Fernanda García Ferreyra (CONAE, Argentina)



Análisis espacio-temporal de la distribución de aerosoles atmosféricos en la ciudad de Córdoba (Argentina) y desarrollo de un modelo predictivo de los niveles de material particulado por Lara Sofía Della Ceca se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

RESUMEN

En esta tesis se estudia la variabilidad espacio-temporal de los aerosoles atmosféricos en la ciudad de Córdoba (Argentina) y sus alrededores para un período mayor a 10 años (2003-2013), mediante el uso del producto satelital *espesor óptico de aerosoles* (o AOD por Aerosol Optical Depth, en inglés) de frecuencia diaria obtenido con el algoritmo denominado *implementación de corrección atmosférica multi-ángulo* (MAIAC) que ha sido recientemente desarrollado para los datos obtenidos con el sensor MODIS (a bordo de los satélites Terra y Aqua/NASA). Hasta el momento; los productos de AOD disponibles presentaban resoluciones espaciales mayores a 3 km, adecuados para estudios a escala regional. Sin embargo no proveían suficiente detalle para el estudio de áreas urbanas o para estudios epidemiológicos. Con este objetivo se desarrolló este nuevo algoritmo, aún en fase de prueba, que mejora sensiblemente la resolución espacial a 1 km, con lo cual resulta más apropiado para el estudio de los aerosoles atmosféricos a escala urbana. En este trabajo, en una primera instancia se evaluó la performance del producto AOD-MAIAC mediante la comparación con valores de AOD obtenidos desde superficie en la estación Córdoba-CETT de la red AERONET. Se analizó la concentración y variación anual de los aerosoles, así como su variación mensual y estacional. Por último, se estudió la relación entre los valores satelitales de AOD-MAIAC y valores de material particulado (PM) obtenidos desde la superficie por una estación de monitoreo de la Municipalidad de Córdoba que funcionó en el centro de la ciudad durante enero-agosto de 2009. En general, el algoritmo MAIAC presentó una buena performance en el área de estudio. Los resultados reflejaron que, a pesar de que los valores de AOD son bajos respecto a otros sitios del mundo muy contaminados, existe una tendencia de incremento de AOD a lo largo del tiempo particularmente en algunas zonas de la ciudad (como por ejemplo el acceso a Sierras Chicas y la zona norte de la ciudad) que podría estar vinculado al aumento de la densidad poblacional en esa área y el consecuente incremento del tránsito vehicular. Además se observó un patrón de incremento o disminución en los niveles de AOD en determinados momentos del año. Durante los meses de verano (diciembre-febrero) se observaron valores relativamente altos concentrados en la ciudad de Córdoba, en las principales vías de acceso hacia las zonas turísticas así como en el anillo de circunvalación de la ciudad. Hacia el otoño los valores de AOD comienzan a disminuir hasta alcanzar los valores más bajos durante los meses de invierno. A partir de agosto se observa un gran incremento del AOD que tiene su pico máximo durante septiembre y se mantiene elevado durante el resto de la primavera. Este incremento de AOD coincide con

la estación de quema de biomasa en la provincia de Córdoba, el norte argentino y otras regiones de Sudamérica (Bolivia, Paraguay, Amazonia y Cerrado en Brasil) y evidencia la importancia del transporte atmosférico a escala regional pero también continental de material particulado que es liberado a la atmósfera durante los incendios. Los modelos de regresión lineal desarrollados en este estudio para evaluar la relación entre AOD-PM y variables meteorológicas no son suficientes para explicar la variabilidad de los datos de PM medidos en superficie a partir de los valores satelitales de AOD y las variables meteorológicas. Sin embargo, los resultados presentados constituyen un primer estudio exploratorio para la ciudad de Córdoba. Dada la falta de estaciones superficiales de monitoreo de material particulado en Argentina, y en particular en la ciudad de Córdoba, este estudio intentó ser una línea de base para el estudio de la dinámica de los aerosoles atmosféricos a escala urbana a partir de información satelital y constituye una primera aproximación a la problemática.

ABSTRACT

In this thesis we study the spatio-temporal variability of atmospheric aerosols in Córdoba city (Argentina) and its surroundings for the period 2003-2013 using the aerosol optical thickness (AOD) satellite product obtained with the MAIAC algorithm (MultiAngle Implementation of Atmospheric Correction), recently developed for MODIS sensor (onboard Terra and Aqua / NASA satellites). The novelty of this new satellite product, still in the test phase, is the higher spatial resolution (1 km), in contrast to the others AOD products available, which is more suitable for the study of atmospheric aerosols at urban scales. We first evaluated the performance of the AOD-MAIAC product by comparing with AOD values measured at the Cordoba-CETT surface station of the AERONET network. Then, we studied the spatio-temporal variability of satellite AOD product and mapped descriptive statistics such as mean and variation coefficient for each year of the time series. We also obtained seasonal and monthly maps for those statistics for the whole period 2003-2013. Finally, we studied the AOD-PM relation using a PM values measured by a monitoring station of the local government of Córdoba that operated in the city center during 2009 (January-August). In general, MAIAC algorithm showed a good performance in the study area. The results reflected that, though AOD values are lower than other heavily polluted sites in the world (i.e., urban areas in China and India), there is an AOD increasing trend over time particularly in some areas of the city (such as vehicular access to Sierras Chicas and the northern part of the city) that could be linked to the population density increase in that area and the consequent increase in vehicular traffic). In addition, an annual cycle was observed in the atmospheric aerosol dynamic in the study area. During summer months, relatively higher values are observed in the city of Cordoba, particularly concentrated in the beltway, Villa Carlos Paz (VCP) and route 38 that links VCP with Cosquín. By autumn, AOD values begin to decline, reaching the lowest values during winter months. Since August a great increase of AOD is observed, which has its peak during September and remains high throughout the rest of spring. This increment of AOD corresponds with the biomass burning season in the Córdoba province, northern Argentina and other regions of South America (Bolivia, Paraguay, Amazonia, and Cerrado in Brazil) and highlights the importance of atmospheric transport of particulate matter at regional and continental scales that is released into the atmosphere during fires. The linear regression models developed in this study to evaluate the relationship between AOD-PM and meteorological variables are not sufficient to explain the variability of the PM values measured in the surface. However, these results constitute

a first exploratory study for the city of Córdoba. Due to the lack of particulate matter surface monitoring stations in Argentina, and in particular in Córdoba city and its surroundings, this thesis attempted to be a baseline for the study of atmospheric aerosols dynamics at the urban scale using satellite information and constitutes a first approach to the problem.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) por la beca otorgada y la posibilidad recibir formación de primer nivel en el Instituto de Altos Estudios Espaciales “Mario Gulich”. A todos los docentes y personal del Instituto, en particular a Fernanda García Ferreyra por su contagioso entusiasmo y apoyo durante este período.

A la Agencia Espacial Italiana (ASI) por la beca otorgada para realizar la pasantía en el Instituto de Ciencias Atmosféricas y Clima (ISAC-CNR, Roma). Al ISAC por haberme recibido y en especial a la Dra. Francesca Barnaba, por su apoyo, dedicación e interés en guiarme en esta etapa de aprendizaje. Al Dr. Gian Paolo Gobbi, mis compañeros de oficina Luca y Davide, a Stefania, que siempre han sido muy atentos durante mi estadía en Roma.

A mi Directora de Tesis, Dra. Hebe Carreras, por la supervisión de mis actividades y el apoyo brindado durante el período de elaboración de esta Tesis.

A las instituciones que me permitieron el uso de sus bases de datos para poder elaborar esta Tesis:

- A la NASA, y en particular al Dr. Alexei Lyapustin que brindó los datos AOD-MAIAC y atendió las múltiples consultas realizadas.
- Al Servicio Meteorológico Nacional, por la base de datos meteorológicos
- A la Municipalidad de Córdoba por los datos de material particulado medido en superficie durante el año 2009 en la ciudad.
- Al Instituto Geográfico Nacional, por los vectores con los cuales se han elaborado los mapas de esta Tesis.

A los miembros del Tribunal evaluador, Dra. Aldana González Montoro, Dra. Carolina Tauro y Dr. Enrique Puliafito, por la atenta lectura, los comentarios y sugerencias realizadas que han enriquecido este trabajo.

Quiero agradecer además a esas personas especiales que conocí, que me han acompañado en esta etapa y han hecho más lindo el recorrido:

- Gracias a Julia Torti, por abrir las puertas de su casa en Roma, por confiar y compartir su espacio. Por las charlas y los almuerzos que tanto se extrañan. A Carmelo por sus sus recetas y secretos culinarios conmigo.
- A Lucho y Gabi, ha sido un placer caminar y caminar (bajo la lluvia y bajo el sol), charlar, viajar, reír y descubrir Roma, la città eterna en donde nació nuestra amistad.
- A Albi, por los paseos, las charlas y las noches de copas (de este y el otro lado del charco).
- A Carlitos, grande Carlitos! Cómo crecimos en tan poco tiempo! gracias por compartir esta etapa conmigo y seguir ahí siempre al pie del cañon.

- A Vero, por los abrazos, las noches de copas, las meriendas, las pastafrolas de cumple, las risas... todo eso que siempre se extraña y añora, y sobre todo por el enorme cariño que nunca falta entre nosotras.
- A Charo, gracias por estar siempre siempre. Por prestarme tu casita, cocinarme y siempre darme pilas para seguir adelante :)
- A Eli, por las risas, los tecitos y marroc de las mañanas. Feliz de habernos encontrado...

A todos mis compañeros de Maestría y los MAEARTE de otras promociones por las aventuras compartidas.

Al Tio Naro, por estar siempre. Por enseñarme a no bajar los brazos y mirar siempre para adelante.

A Cris, por acompañarme con amor y comprensión.

A mi familia, porque sin raíces no hay alas.

Gracias totales...

Índice de Contenidos

1. MARCO TEÓRICO	15
1.1 La atmósfera	15
1.2 Aerosoles atmosféricos.....	17
1.3 Problemática de los aerosoles atmosféricos	19
Efectos en la salud humana	19
Efectos en los ecosistemas.....	20
Efectos en el clima.....	21
1.4 Legislación vigente y monitoreo de aerosoles.....	22
1.5 Fundamentos físicos de la teledetección	24
1.5.1 ¿A qué se denomina sensoramiento remoto o teledetección?	24
1.5.2 Teledetección de aerosoles desde plataformas satelitales	25
1.5.3 El sensor MODIS	29
1.5.4 Implementación del algoritmo de corrección atmosférica <i>multi-ángulo</i>	30
1.5.6 Ventajas y desventajas del sensoramiento remoto de los aerosoles	32
1.6 Mediciones de espesor óptico de aerosoles desde la superficie terrestre.	33
1.7 Calidad del aire en Córdoba	34
1.7 Objetivos de este estudio	34
2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y BASES DE DATOS	36
2.1 Área de estudio	36
2.1.1 Caracterización climática	39
2.2 Bases de datos.....	43
2.2.1 Elaboración de mapas.....	43
2.2.2 Espesor óptico de aerosoles (AOD).....	44
2.2.3 Datos meteorológicos	47
2.2.4 Material particulado.....	48
2.3 Análisis estadísticos.....	48
2.3.1 Desempeño del algoritmo MAIAC.....	48
2.3.2 Variación espacio temporal	49
2.3.3 Correlación y análisis de regresión lineal.....	49
3. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL ALGORITMO MAIAC	51
3.1 Resolución espacial: producto de MODIS estándar vs producto obtenido con MAIAC.....	51
3.2 Espesor óptico de aerosoles: comparación de AOD _{MAIAC} y AOD _{AERONET}	52
4. VARIACIÓN ANUAL DE LA DISTRIBUCIÓN DE AEROSOLES	57
4.1 Análisis anual de AOD para el área de estudio	57
5. VARIACIÓN ESTACIONAL Y MENSUAL DE LA DISTRIBUCIÓN DE	

AEROSOLES ATMOSFÉRICOS.....	67
5.1 Análisis estacional y mensual de la distribución de aerosoles	67
5.2 Focos de incendios en Córdoba y Sudamérica: estación de quema de biomasa. .	73
5.3 Caso de estudio: Incendios forestales ocurridos en el Valle de Calamuchita en el período 19-31 agosto de 2009	79
6. RELACIÓN ENTRE EL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOLES Y MATERIAL PARTICULADO MEDIDO EN SUPERFICIE	83
6.1 Variación del material particulado en el centro de Córdoba	84
6.2 Relación PM ₁₀ -AOD	86
6.2.1 Regresión simple: PM ₁₀ -AOD	88
6.2.2 Regresión múltiple: incorporación de variables meteorológicas.....	90
7. CONCLUSIONES.....	94
7.1 Proyecciones a futuro	97
Bibliografía.....	98

Índice de Figuras

Figura 1. <i>Capas de la atmósfera.</i>	16
Figura 2. <i>Ciclo atmosférico de los aerosoles.</i>	18
Figura 3. <i>Componentes de un sistema de teledetección.</i>	25
Figura 4. <i>Serie temporal de k días de mediciones de la banda azul de MODIS para la recuperación del SRC. La imagen muestra esquemáticamente un bloque de 25 km² en una cuadrícula geoméricamente corregida y calibrada de datos TOA (LIB; Lyapustin et al., 2011).</i>	31
Figura 5. <i>Red global de fotómetros Aeronet. Imagen obtenida de https://aeronet.gsfc.nasa.gov/.</i>	33
Figura 6. <i>Relieve en el área de estudio: altura sobre el nivel del mar. Fuente: Modelo de elevación digital (DEM) de 30 m de resolución espacial del Instituto Geográfico Nacional (IGN).</i>	37
Figura 7. <i>Relieve en el área de estudio: Pendiente en grados. Fuente: Modelo de elevación digital (DEM) de 30 m de resolución espacial del Instituto Geográfico Nacional (IGN).</i>	37
Figura 8. <i>Principales centros urbanos, ríos, lagos y vías de circulación (RP: Ruta Provincial, RN: Ruta Nacional, CV: Circunvalación) en el área de estudio. La cobertura del producto AODMAIAC está indicada con un cuadrado colorado sobre una imagen Landsat 8 (18/01/2014, RGB: 432).</i>	38
Figura 9. <i>Zonificación del área de estudio sobre una imagen Landsat 8 (15/12/2014, RGB: 652).</i>	39
Figura 10. <i>Temperatura, humedad relativa y precipitaciones totales mensuales registradas en las estaciones Observatorio y Aeropuerto del Servicio Meteorológico Nacional para el período 2002-2013.</i>	40
Figura 11. <i>Rosa de los vientos para las estaciones Aeropuerto (arriba) y Observatorio (abajo) del SMN para el período 2002-2013.</i>	42
Figura 12. <i>Porcentaje de valores de AOD disponibles para cada mes para el período 2003-2013.</i>	45
Figura 13. <i>Producto MYD_04 (izquierda) y AOD-MAIAC (derecha) para el día 19/06/2004 sobre la ciudad de Córdoba.</i>	52
Figura 14. <i>Variabilidad horaria de AOD medido desde superficie en la estación Córdoba-CETT de la red AERONET para abril y octubre de 2004.</i>	53
Figura 15. <i>Relación lineal entre AOD-MAIAC el AOD medido en la estación CETT-Córdoba (AERONET) para el período 2003-2010 (línea punteada: $y=x$).</i>	54
Figura 16. <i>Relación lineal entre AOD-MAIAC el AOD medido en la estación CETT-Córdoba (AERONET) para las distintas estaciones del año en el período 2003-2010 (línea punteada: $y=x$).</i>	55
Figura 17. <i>Variación mensual AOD de AERONET vs MAIAC para el período 2003-2010.</i>	56
Figura 18. <i>Media aritmética de AOD-MAIAC (447 nm) para los años 2003-2013 en la ciudad de Córdoba y alrededores (Mg: Malagueño, VCP: Villa Carlos Paz, Cq: Cosquín, Un: Unquillo, Md: Mendiolaza, VA: Villa Allende, JC: Juárez Celman, Sd: Saldán).</i>	58
Figura 19. <i>Coefficiente de variación ($\sigma/\bar{x} * 100$) de AOD-MAIAC (470 nm) para los años 2003-2013 en la ciudad de Córdoba y alrededores (Mg: Malagueño, VCP: Villa Carlos Paz, Cq: Cosquín, Un: Unquillo, Md: Mendiolaza, VA: Villa Allende, JC: Juárez Celman, Sd: Saldán).</i>	59
Figura 20. <i>Zonas urbanas, sierras, rural y de quintas tenidas en cuenta para el análisis anual.</i>	60

Figura 21. Variación anual de AOD-MAIAC para las zonas indicadas en Figura 20..	61
Figura 22. Variación anual de AOD-MAIAC para las zonas indicadas en Figura 20, excluyendo el mes de septiembre de la media aritmética.	62
Figura 23. Variación semanal del AOD en el centro de la ciudad de Córdoba (valor medio de 25x25 pixeles cubriendo el ejido urbano, las barras corresponden a (valor medio – desvío estándar) y (valor medio + desvío estándar)) para el mes de marzo en el período 2000-2006.....	63
Figura 24. Evolución del parque automotor en la ciudad de Córdoba. Fuente: Secretaría de Economía y Finanzas, Municipalidad de Córdoba en Municipalidad de Córdoba, 2012.....	65
Figura 25. Antigüedad del parque automotor en la ciudad de Córdoba según tipo de vehículo en el año 2012 (1993*: 1993 y años anteriores). Fuente: Secretaría de Economía y Finanzas, Municipalidad de Córdoba en Municipalidad de Córdoba, 2012.....	65
Figura 26. Media Aritmética (izquierda) y coeficiente de variación(derecha) de AOD-MAIAC para cada estación del año para el período 2003-2013 en la ciudad de Córdoba y alrededores (Mg: Malagueño, VCP: Villa Carlos Paz, Cq: Cosquín, Un: Unquillo, Md: Mendiolaza, VA: Villa Allende, JC: Juárez Celman, Sd: Saldán).....	68
Figura 27. Media Aritmética de AOD-MAIAC (470 nm) para cada mes del año para el período 2003-2013 en la ciudad de Córdoba y alrededores (Mg: Malagueño, VCP: Villa Carlos Paz, Cq: Cosquín, Un: Unquillo, Md: Mendiolaza, VA: Villa Allende, JC: Juárez Celman, Sd: Saldán).	70
Figura 28. Coeficiente de variación ($\sigma/\bar{x} * 100$) de AOD-MAIAC (470 nm) para cada mes del año para el período 2003-2013 en la ciudad de Córdoba y alrededores (Mg: Malagueño, VCP: Villa Carlos Paz, Cq: Cosquín, Un: Unquillo, Md: Mendiolaza, VA: Villa Allende, JC: Juárez Celman, Sd: Saldán).	71
Figura 29. Media aritmética (arriba) y coeficiente de variación ($\sigma/\bar{x} * 100$, abajo) de AOD-MAIAC para mayo, junio y julio para el período 2003-2013 en la ciudad de Córdoba y alrededores (Mg: Malagueño, VCP: Villa Carlos Paz, Cq: Cosquín, Un: Unquillo, Md: Mendiolaza, VA: Villa Allende, JC: Juarez Celman, Sd: Saldán).	72
Figura 30. Estacionalidad de incendios en distintas áreas de Sudamérica para el período 2003-2013.....	76
Figura 31. Variación mensual de AOD-MAIAC para las zonas indicadas en Figura 20. Las líneas rectas corresponden al valor medio de AOD _{MAIAC} , correspondiente a todo el período de estudio para cada zona (según el color de puntos correspondiente).....	77
Figura 32. Variación mensual de AOD obtenido de distintos sensores. Leyenda: AOD (λ) – SENSOR/Satélite (resolución espacial). Fuente: https://giovanni.gsfc.nasa.gov/	78
Figura 33. Incendios ocurridos en la Provincia de Córdoba. Imagen Landsat5 del 12 de septiembre. Focos de calor MODIS para los días del evento principal: 28, 29 y 30 de agosto.....	80
Figura 34. Dirección del viento en la ciudad de Córdoba.	80
Figura 35. Valor medio diario de AOD obtenido a partir de distintos productos satelitales (MAIAC, MYD03_3k, SEAWIFS, OMI) y la estación de AERONET Córdoba-CETT (AERONET) y de material particulado (PM) medido en la estación de la Municipalidad de Córdoba para el período 20-31 de agosto de 2009.	81
Figura 36. AOD AERONET vs AOD satelital durante los días del evento de incendios.	

.....	82
Figura 37. <i>PM10 [$\mu\text{g}=\text{m}^3$] vs AOD satelital durante los días del evento de incendios.</i>	82
Figura 38. <i>Número de días con valores de PM10 en la ciudad de Córdoba disponibles para el período enero-agosto 2009.</i>	84
Figura 39. <i>Variación horaria de PM10 en la ciudad de Córdoba para el período enero-agosto de 2009.</i>	85
Figura 40. <i>Valores de PM10 en la ciudad de Córdoba según el día de la semana durante marzo de 2009 (día 1 corresponde a domingo y día 7 a sábado).</i>	85
Figura 41. <i>Variación mensual de valores de PM10 en la ciudad de Córdoba para el período enero-agosto de 2009 (se excluye junio por escasez de datos disponibles).</i>	86
Figura 42. <i>Distribución de frecuencias de las variables tenidas en cuenta en el modelo lineal.</i>	87
Figura 43. <i>Modelo de regresión lineal simple: AOD_{MAIAC} vs PM10.</i>	88
Figura 44. <i>Valores predichos vs Valores observados resultante del modelo de regresión lineal simple $PM_{10} = 106,65 * AOD + 18,85 \text{ ug/m}^3$</i>	89
Figura 45. <i>Histograma de frecuencias de los residuos estandarizados del modelo de regresión lineal simple $PM_{10} = 106,65 * AOD + 18,85 \text{ ug/m}^3$</i>	89
Figura 46. <i>Valores predichos vs Valores observados resultante del modelo de regresión múltiple que incorpora las variables temperatura, humedad relativa, altura de la capa límite, velocidad y dirección del viento (descrito en el texto).</i>	91
Figura 47. <i>Histograma de frecuencias de los residuos estandarizados del modelo de regresión múltiple que incorpora las variables temperatura, humedad relativa, altura de la capa límite, velocidad y dirección del viento (descrito en el texto).</i>	92
.....	92

Índice de Tablas

Tabla 1. <i>Comparación de valores límite de material particulado permitidos</i>	23
Tabla 2. <i>Ejemplos de plataformas y sensores satelitales utilizados para obtener información sobre propiedades de los aerosoles</i>	26
Tabla 3. <i>Meses con datos de AOD disponibles (*) en el período 2002-2010 en la estación AERONET- Cordoba CETT</i>	47
Tabla 4. <i>Frecuencia de los datos meteorológicos obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional (S.M.N) según la estación meteorológica para el período 2002-2013.</i>	47
Tabla 5. <i>Crecimiento poblacional en localidades de las Sierras Chicas y ciudad de Córdoba, para los años 2001 y 2010 (INDEC).</i>	64
Tabla 6. <i>Coeficiente de correlación entre las variables tenidas en cuenta en los modelos lineales (PM10: material particulado, AOD: espesor óptico de aerosoles obtenido con MAIAC, CL: capa límite, T°: temperatura, HR: humedad relativa, Vel.Viento: velocidad del viento, Dir.Viento: dirección del viento).</i>	90
Tabla 7. <i>Coeficientes e intervalos de confianza obtenidos para las variables consideradas en el modelo de regresión lineal múltiple para cada variable (AOD: espesor óptico de aerosoles obtenido con MAIAC, CL: capa límite, T°: temperatura, HR: humedad relativa, VEL.VIENTO: velocidad del viento, DIR.VIENTO: dirección del viento, EST: período del año).</i>	91
Tabla 8. <i>Valores AIC para selección del modelo lineal múltiple más adecuado.</i>	92

Acrónimos

AEARTE	Aplicaciones E spaciales de A lerta y R espuesta T emprana a E mergencias
AERONET	A Erosol R obotic N ETwork
AOD	A erosol O ptical D epth
AOD_{AERONET}	AOD medido en la estación AERONET Córdoba-CETT
AOD_{MAIAC}	AOD obtenido con el algoritmo MAIAC
AVHRR	A dvanced V ery H igh R esolution R adiometer
BRDF	B idirectional R eflection D istribution F unction
CETT	Centro E spacial T eófilo T abanera
CNES	Centre N ational D' Études S patiales
CNR	Conzilio N azionale di R icerca
CNRS	Centre N ational de la R echerche S cientifique
CONAE	Comisión N acional de A ctividades E spaciales
CONICET	Consejo N acional de I ntestigaciones C ientíficas y T écnicas
CV	Circunvalación
DEM	D igital E levation M odel
EPA	E nvironmental P rotection A gency
ESA	E uropean S patial A gency
FAMAF	F acultad de A stronomía, M atemática y F ísica
IGN	I nstituto G eográfico N acional
IMBIV	I nstituto M ultidisciplinario de B ióloga V egetal
INDEC	I nstituto N acional D e E stadística y C ensos
INSU	I nstitut N ational des S ciences de l' U nivers
ISAC	I stituto di S ienze dell' A tmosfera e del C lima
L2	Datos Nivel 2 (L evel 2)
MAIAC	M ultiangle I mplementation of A tmospheric C orrection
MERIS	M edium R esolution I maging S pectrometer
MODIS	M oderate R esolution I maging S pectroradiometer
NASA	N ational A eronautics and S pace A dministration
NOAA	N ational O ceanic and A tmospheric A dministration
OLI	O perational L and I mager
OMI	O zone M onitoring I nstrument

OMS	Organización Mundial de la Salud
PHOTONS	PHO tométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire
PM	P articulate M atter (material particulado)
PM_x	Material particulado de diámetro medio menor a x
RN	R uta N acional
RP	R uta P rovincial
SEAWIFS	SEA Viewing W ide F ield-of-View S ensor
SMN	S ervicio M eteorológico N acional
TIRS	T hermal I nfrared S ensor
TOA	T op O f A tmosphere
TOMS	T otal O zone M apping S pectrometer
UTC	C oordinated U niversal T ime

Capítulo 1

1. MARCO TEÓRICO

Los aerosoles juegan un rol fundamental en la físico-química atmosférica, la biosfera, el clima y la salud pública. Las partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire, en particular aquellas en un rango de tamaño de nanómetro a micrómetro, influyen en el balance energético de la Tierra, el ciclo hidrológico, la circulación atmosférica, y la abundancia de los gases de efecto invernadero y los gases traza reactivos. Además, desempeñan un papel importante en la reproducción de organismos biológicos y pueden causar o intensificar efectos adversos en la salud humana. Los efectos ambientales y en la salud de la población dependen de diversas características de los aerosoles, tales como el tamaño, la estructura y composición química. Estos parámetros presentan una gran variación espacio-temporal y por lo tanto es importante un monitoreo continuo de los mismos.

Existe una creciente preocupación a escala mundial sobre la situación de la calidad del aire y Argentina no es una excepción. En este contexto, es fundamental el desarrollo de técnicas de monitoreo que permitan evaluar la distribución espacial y temporal de los contaminantes atmosféricos a diversas escalas (regional, local) para detectar sus principales fuentes y aportar información para la toma de decisiones y el establecimiento de políticas de mitigación.

1.1 La atmósfera

La atmósfera es la capa gaseosa que rodea la Tierra, está compuesta por una mezcla de nitrógeno (78%), oxígeno (21%), y otros gases (1%) concentrados cerca de la superficie, comprimidos por la acción de la gravedad. Conforme aumenta la altura, la densidad de la atmósfera disminuye con gran rapidez. En los 5-6 kilómetros más cercanos a la superficie se encuentra la mitad de la masa total y antes de los 15 kilómetros de altura está el 95% de toda la materia atmosférica (Seinfeld y Pandis, 2006).

En términos generales, una de las principales características de la atmósfera de la Tierra es la variación de la temperatura y la presión con la altura. De hecho, la variación del perfil medio de temperatura con la altitud es la base para distinguir las capas de la atmósfera (Figura 1; Seinfeld y Pandis, 2006).

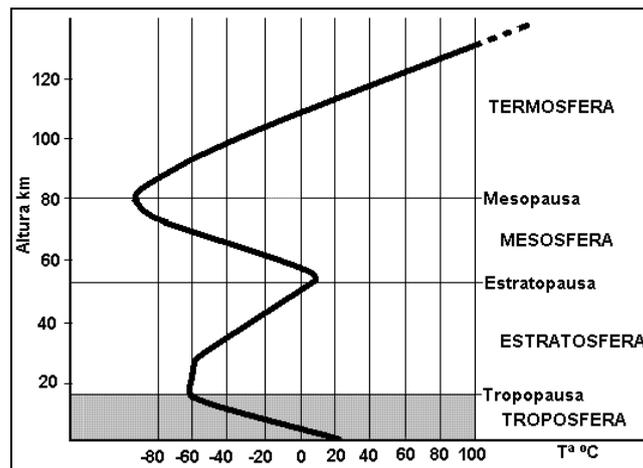


Figura 1. Capas de la atmósfera.

Las principales capas de la atmósfera y sus características más relevantes son:

- **Tropósfera:** la capa más baja de la atmósfera, que se extiende desde la superficie de la Tierra hasta la tropopausa, aproximadamente entre 7 y 18 km de altitud en función de la latitud y la época del año. Se caracteriza por la disminución de temperatura con la altura y veloces movimientos verticales y horizontales de las masas de aire.

La tropósfera es una región de turbulencia incesante y mezcla de las masas de aire donde ocurren todos los fenómenos meteorológicos que influyen en los seres vivos. A pesar de que la tropósfera representa sólo una pequeña fracción de la altura total de la atmósfera, esta capa contiene la casi totalidad del vapor de agua y aproximadamente 80% de su masa total. La disminución progresiva de la temperatura con la altitud en la tropósfera es debida a la distancia cada vez mayor de la superficie terrestre que ha sido calentada por el Sol. La tropósfera puede dividirse en la capa límite o capa de mezcla, que se extiende desde la superficie terrestre hasta aproximadamente 1 km, y la tropósfera libre, que se extiende de aproximadamente 1 km hasta la tropopausa.

La capa límite o capa de mezcla representa el estrato de aire sujeto a la influencia de la superficie terrestre; es el estrato de aire en el que la turbulencia atmosférica, originada por desequilibrios térmicos o mecánicos, produce una intensificación de los movimientos caóticos del aire, favoreciendo el fenómeno de difusión y transporte de energía y materia. De esta forma, las emisiones que tienen lugar en las capas bajas quedan retenidas en un volumen de aire cuya dimensión vertical está delimitada por la altura de la capa de mezcla. Debido a esto, en general, existe una estrecha relación entre los índices de contaminación atmosférica y el espesor de este estrato del aire (Seinfeld y Pandis, 2006). Las condiciones meteorológicas locales dentro de la capa límite pueden afectar la

variación en la distribución altitudinal de partículas debido a variaciones de mezcla. La altura y estructura de la capa límite varía según la geografía, el momento del año e incluso a lo largo del día. La altura de la capa límite se ve afectada en gran medida por la temperatura, a mayor temperatura mayor altura de la capa límite (Zhang et al., 2009).

- Estratósfera: se extiende desde la tropopausa a la estratopausa, hasta aproximadamente 45-55 km de altitud. En esta capa la temperatura aumenta con la altitud y como consecuencia la mezcla vertical en la misma es muy lenta.
- Mesósfera: se extiende desde la estratopausa a la mesopausa, hasta llegar aproximadamente a los 80-90 km sobre el nivel del mar. La temperatura disminuye con la altitud hacia la mesopausa, alcanzando la temperatura más fría de la atmósfera. El mezclado vertical de masas de aire es rápido.
- Ionósfera: es una región que incluye la zona superior de la mesósfera e inferior de la termósfera en la cual los iones son producidos por fotoionización.
- Termósfera: Se caracteriza por las altas temperaturas como resultado de la absorción de la radiación de longitud de onda (λ) corta por el N_2 y O_2 . La mezcla vertical es rápida.
- Exósfera: es la región más externa de la atmósfera (> 500 km de altitud) donde las moléculas de gas tienen suficiente energía para escapar de la atracción gravitatoria de la Tierra.

1.2 Aerosoles atmosféricos

Los *aerosoles atmosféricos* se definen como suspensiones relativamente estables de partículas sólidas o líquidas en un gas y que presentan un diámetro menor a $10 \mu m$. El término aerosoles atmosféricos difiere del término *material particulado* (PM, siglas en inglés), en que éste incluye tanto las partículas como el gas en el cual las mismas se encuentran suspendidas. Sin embargo, cabe señalar que ambos términos serán utilizados como sinónimos para denotar sólo las partículas en este texto, tal como ocurre en general en la literatura sobre química atmosférica (Finlayson-Pitts & Pitts Jr., 2000).

Los aerosoles se originan a partir de una amplia variedad de fuentes naturales y antropogénicas. Las partículas primarias son aquellas emitidas directamente a la atmósfera, por ejemplo durante la quema de biomasa, la combustión incompleta de combustibles fósiles, erupciones volcánicas, resuspensión de material depositado en los caminos debido a la circulación del tránsito, suelo y polvo mineral transportado por vientos, sal marina, material biológico (fragmentos de plantas, microorganismos, polen, etc.). Las partículas secundarias son formadas por procesos de conversión gas-partícula

en la atmósfera por procesos de nucleación o condensación a partir de precursores gaseosos (Finlayson-Pitts y Pitts Jr., 2000). Las partículas en suspensión experimentan diversas interacciones físicas, químicas y transformaciones que resultan en cambios en su tamaño, estructura y/o composición (Figura 2; Seinfeld y Pandis, 2006).

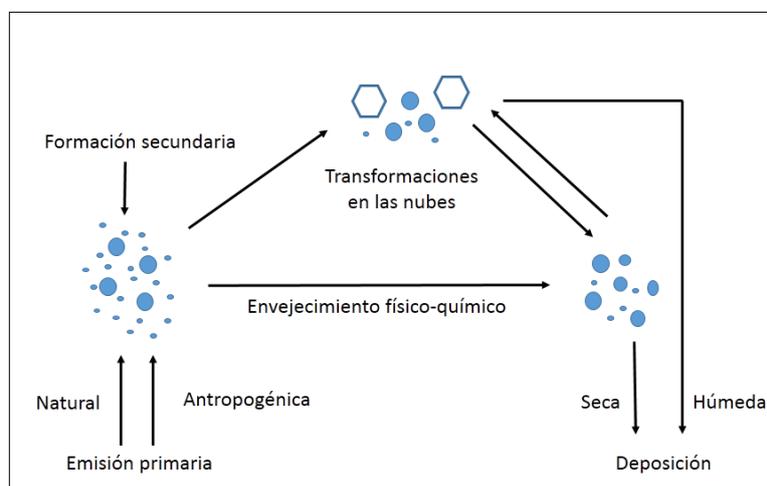


Figura 2. Ciclo atmosférico de los aerosoles.

El proceso denominado *deposición húmeda*, es decir, la remoción de partículas de la atmósfera por precipitación de agua o nieve, es la principal fuente de partículas atmosféricas en la superficie terrestre. La *deposición seca* ocurre a través de la acción del viento, la difusión y la acción de la gravedad. A pesar de ser menos importante a escala global, este tipo de deposición es relevante en el análisis de la calidad del aire a escala local y los efectos en la salud humana (inhalación y deposición en el sistema respiratorio). El tiempo de residencia de las partículas en la atmósfera varía de horas a semanas dependiendo de las propiedades de los aerosoles y las condiciones meteorológicas. Las propiedades de los aerosoles (concentración, composición, distribución del tamaño de partículas) presentan una alta variación espacio-temporal dependiendo de la meteorología, las fuentes de emisión de los aerosoles y de sus precursores.

En general, en la composición química del material particulado predominan sulfatos, nitratos, amonio, sal marina, polvo mineral, compuestos orgánicos, carbono elemental ó negro (black carbon); cada uno con una contribución de 10-30% de la masa total. La abundancia relativa de éstos puede variar en un orden de magnitud o más dependiendo del sitio de estudio y la época del año (Asmi et al., 2016). Por ejemplo, los compuestos o aerosoles de origen secundario presentarán mayores concentraciones durante el verano debido a la mayor actividad fotoquímica de la atmósfera como consecuencia de mayor

radiación solar incidente durante este período del año (Wang et al., 2016). Las partículas secundarias generalmente consisten en mezclas de sulfato, amonio, nitrato, materia orgánica y agua. La formación y crecimiento de las partículas secundarias, que es dominante en la atmósfera en términos de concentración, depende fuertemente de los procesos químicos en fase gaseosa, especialmente en la producción fotoquímica de ácido sulfúrico de baja volatilidad y de la concentración de amoníaco gaseoso, vapores de ácido nítrico y compuestos orgánicos semivolátiles (Ma y Birmili, 2015).

Las propiedades aerodinámicas de los aerosoles determinan el tipo de transporte y remoción de la atmósfera, condicionan su depósito dentro del sistema respiratorio y están asociadas con la composición química y las fuentes que las originan. El *diámetro aerodinámico* de una partícula se define como el diámetro de una esfera de densidad unidad (1 g cm^{-3}) con las mismas características aerodinámicas de la partícula bajo consideración. Según su diámetro aerodinámico equivalente las partículas se clasifican en: *gruesas* (PM_{10} : 2,5-10 μm), *finas* ($\text{PM}_{2.5}$: menor a 2,5 μm) y *ultrafinas* ($\text{PM}_{0.1}$: menor a 0,1 μm). Por ejemplo, las partículas emitidas en procesos de combustión (tránsito vehicular, centrales térmicas de generación de energía, quema de biomasa) presentan un diámetro aerodinámico que varía desde unos pocos nanómetros hasta 1 micrón. En cambio, las partículas provenientes del polvo resuspendido por el viento, del polen y de la sal marina tienen diámetros mayores al micrón.

1.3 Problemática de los aerosoles atmosféricos

La atmósfera en los centros urbanos de mayor densidad poblacional puede presentar altas concentraciones de material particulado y afectar la salud de la población, dañar monumentos históricos formando capas de degradación que causan daño estético y estructural de los materiales originales (Sabbioni, 1995; Spurny, 2000), o bien reducir la visibilidad a escala urbana, dificultando el tránsito vehicular (Cheung et al., 2005). Por otro lado, el aumento de partículas en la atmósfera puede reducir la radiación solar que llega a la superficie terrestre y afectar distintos ciclos biológicos y el clima a diversas escalas (Grantz et al., 2003).

Efectos en la salud humana

Los contaminantes atmosféricos ingresan al cuerpo humano a través del sistema respiratorio. Las partículas más finas, con mayor posibilidad de ingresar más profundamente en el tracto respiratorio, son generalmente las que más contribuyen a los

efectos adversos en la salud humana.

Según informes de la Organización Mundial de la Salud el material particulado es uno de los contaminantes atmosféricos más nocivos (OMS, 2005 y 2014). Los efectos adversos en la salud humana dependerán tanto de la composición como del tamaño de las partículas. Por otro lado, los efectos varían con la intensidad y duración de la exposición a la que son sometidos los seres humanos y la edad y la condición sanitaria de los individuos expuestos. La población con mayor riesgo de sufrir efectos adversos incluye a niños, embarazadas, personas mayores de 65 años y personas con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias preexistentes.

En estudios recientes se ha observado que la exposición a corto y largo plazo a altos niveles de partículas en el ambiente produce el aumento de la morbilidad y la mortalidad (Poper y Dockery, 2006), principalmente asociados a enfermedades cardiopulmonares (Larrieu et al., 2007) y respiratorias (Jerret et al., 2005). Por otro lado, el material particulado proveniente de las emisiones del tránsito ha sido recientemente clasificado como sustancia carcinógena del Grupo I por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, 2013). A pesar de la sustancial bibliografía que evidencia los efectos adversos del PM para la salud, los mecanismos toxicológicos no han sido aún dilucidados claramente (Shrey et al., 2011).

Efectos en los ecosistemas

La deposición de material particulado sobre la superficie de las hojas en la vegetación puede causar abrasión y calentamiento radiativo conduciendo a una reducción de la capacidad fotosintética de las plantas. Así, si se depositan compuestos ácidos o alcalinos, éstos pueden causar lesiones en la superficie de la hoja (Rai y Panda, 2014). Incluso algunos estudios reportan reducción en el crecimiento, la floración y la reproducción de algunas especies vegetales debido a la deposición de material particulado (Davies y Unam, 1999).

Por otro lado, el material particulado depositado directamente en el suelo puede influir en el ciclo de nutrientes del ecosistema, especialmente afectar el ciclo del nitrógeno, a través de sus efectos en las bacterias y hongos de la rizósfera.

En el caso de los animales, éstos resultan afectados de manera similar a la que es afectada la población humana, dependiendo de la sensibilidad de cada especie.

Efectos en el clima

Los aerosoles atmosféricos juegan un papel importante en el balance de la radiación de la tierra debido a que dispersan y absorben tanto la radiación solar de onda corta como la radiación terrestre de onda larga. Además, están altamente involucrados en la formación de nubes y precipitaciones, ya que funcionan como núcleos de condensación de nubes y hielo.

Los aerosoles desempeñan un papel importante en el equilibrio térmico de la Tierra y el cambio climático global, que se ha intensificado desde la revolución industrial debido a la creciente emisión antropogénica de contaminantes atmosféricos. Sin embargo, los efectos de los aerosoles sobre el clima son complejos y aún hay muchas incertezas al respecto. Existen, básicamente, dos procesos mediante los cuales los aerosoles afectan el clima de la Tierra: el forzamiento radiativo directo (dispersión y absorción de la radiación) e indirecto (formación de nubes).

El grado de dispersión o absorción de la radiación debido a la presencia de aerosoles dependerá de las propiedades físico-químicas de los mismos. Las partículas de aerosol reflejan una parte de la radiación solar de onda corta hacia el espacio, enfriando la atmósfera de la Tierra. Este efecto de enfriamiento por parte de los aerosoles, especialmente por aquellos compuestos por sulfato, puede ser compensada por la absorción de la radiación terrestre de onda larga por parte de aerosoles con una gran proporción de compuestos de carbono en estado elemental (*black carbon*) y partículas de polvo. La media anual global de forzamiento radiativo es aún incierta, se estima un valor de $-0,4 \pm 0,2 \text{ W m}^{-2}$ para los aerosoles en cuya composición predomina el sulfato, $-0,05 \pm 0,05 \text{ W m}^{-2}$ cuando predomina el carbono orgánico de combustibles fósiles, $0,2 \pm 0,15 \text{ W m}^{-2}$ para el carbono elemental de combustibles fósiles, $0,03 \pm 0,12 \text{ W m}^{-2}$ para aerosoles provenientes de la quema de biomasa, $-0,1 \pm 0,1 \text{ W m}^{-2}$ para las partículas de nitrato y $-0,1 \pm 0,2 \text{ W m}^{-2}$ para el polvo mineral (IPC, 2007). Una gran erupción volcánica puede aumentar en gran medida la concentración de aerosoles de sulfato en la estratósfera, incrementando el forzamiento radiativo negativo. Sin embargo, una sola gran erupción podría enfriar la atmósfera sólo por unos pocos años.

Las partículas de aerosol también pueden afectar el balance de radiación a través de la formación de nubes. Las gotas de las nubes se forman en la tropósfera por condensación de vapor de agua en las partículas de aerosol (núcleos de condensación, o núcleos de hielo) cuando la humedad relativa es superior al nivel de saturación. Sin la presencia de

partículas, sería necesario una gran sobresaturación (aproximadamente 400%) para la condensación homogénea de vapor de agua.

Tanto las propiedades como el número de partículas afectan a la formación y las características de las nubes y la ocurrencia de precipitaciones de diversas maneras (Lohmann y Feichter, 2005). El aumento del número de partículas, y por lo tanto el aumento del espesor óptico de las nubes, disminuye la radiación solar superficial neta. Las partículas más pequeñas disminuyen la eficiencia del proceso de precipitación, prolongando de este modo la vida media de las nubes. Por otro lado, la absorción de la radiación solar por las partículas de hollín puede causar la evaporación de agua de las nubes (efecto semi-directo). Los aerosoles antropogénicos, mediante el efecto albedo, afectan el contenido de agua de las nubes causando un forzamiento radiativo negativo de -0.3 a -1.8 W m^{-2} (IPC, 2007).

Por otro lado, los aerosoles afectan la concentración y distribución de gases traza atmosféricos mediante reacciones químicas complejas y pueden alterar significativamente los ciclos de nitrógeno, azufre y oxidantes atmosféricos. Así por ejemplo, en la estratósfera, donde se forma la mayor parte del ozono, las partículas pueden modificar los procesos de remoción del ozono (Mészáros, 2000).

1.4 Legislación vigente y monitoreo de aerosoles

En Argentina, la primer instancia de regulación de la calidad del aire fue la Ley Nacional N° 20284, sancionada en el año 1973, que estableció valores máximos de emisión permitidos para seis contaminantes prioritarios (CO, NO_x, SO₂, material particulado en suspensión y particulado sedimentable). Algunas provincias, como por ejemplo Buenos Aires (Ley N° 5965, Decreto N° 3395/96), han establecido normas de calidad del aire tomando como valores guía aquellos establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, Estados Unidos). En el caso del PM₁₀, la media de 24 hs no debe superar los $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la media anual los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos valores límite superan ampliamente aquellos sugeridos por la OMS ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la media de 24 hs y $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la media anual; OMS, 2005) (Tabla1).

Tabla 1. Comparación de valores límite de material particulado permitidos

		Provincia de Buenos Aires	Provincia de Santa Fe	EPA	UNION EUROPEA	OMS
PM ₁₀ (µg/m ³)	Promedio 24 hs	150	150	150	50	50
	Promedio Anual	50	50	50	40	20
PM _{2.5} (µg/m ³)	Promedio 24 hs	-	-	35	-	25
	Promedio Anual	-	-	-	25	10

Debido a la creciente preocupación en la región y nuestro país por la calidad del aire y su relación con la salud humana, recientemente se ha establecido el Plan de Acción Nacional sobre Contaminación Atmosférica (res. 1327/14). Dentro de las prioridades del Plan se ha establecido concretar esfuerzos dirigidos a desarrollar acciones integrales sobre contaminación atmosférica tales como el relevamiento de la situación actual a nivel nacional, establecer contactos con las jurisdicciones involucradas, fijar criterios en base a los estándares internacionales y nacionales, entre otros.

Hasta el momento, en Argentina, el monitoreo de la calidad del aire ha sido llevado a cabo por grupos de investigación en distintas universidades y programas locales municipales o provinciales (p. ej: área de la Cuenca Matanza Riachuelo, Rosario, Zárate-Campana, Bahía Blanca, Mendoza, Ensenada; Lijteroff et al., 1999; Bilos et al., 2001; Municipalidad de Bahía Blanca, 2006; Carreras et al., 2006; Puliafitto y Allende, 2007; Bogo et al., 2003).

En la ciudad de Córdoba, el municipio realizó un monitoreo continuo de la calidad del aire durante los años '90 en dos sitios de la ciudad y en los años 2007 y 2009 en un sólo sitio de la ciudad. Si bien estas estaciones brindan valores de concentración muy precisos, están muy influenciadas por fuentes locales de emisión, por lo tanto posiblemente no caracterizan correctamente la distribución espacial real de los contaminantes en la ciudad. De hecho, tienen una cobertura espacial muy limitada y por tanto, este tipo de monitoreo resulta insuficiente para evaluar el nivel real de exposición de la población (Kloog et al., 2011).

En las últimas décadas y para intentar tener una mejor aproximación en la estimación de la distribución espacio-temporal de aerosoles en áreas urbanas, se han combinado resultados obtenidos en mediciones de monitores puntuales con modelos de calidad del aire (de transporte químico y de dispersión atmosférica). Los modelos de calidad del aire

permiten relacionar las emisiones de contaminantes con sus concentraciones en aire y para ello utilizan como datos de entrada un inventario de emisiones antropogénicas del área de estudio. Desafortunadamente, los inventarios de emisiones no siempre están disponibles para muchas zonas urbanas, como es el caso de la ciudad de Córdoba, o no son aún lo suficientemente precisos y comprometerían la confiabilidad de los resultados obtenidos de los modelos (García Ferreyra., 2014). Es por ello que una herramienta cada vez más utilizada para el estudio de la distribución espacio-temporal de los contaminantes atmosféricos es la teledetección o sensado remoto (Engel-Cox et al., 2004).

1.5 Fundamentos físicos de la teledetección

1.5.1 ¿A qué se denomina sensoramiento remoto o teledetección?

El sensoramiento remoto o teledetección es una técnica que permite adquirir información mediante el análisis de datos colectados por instrumentos que no están en contacto físico con los objetos investigados. Los sensores remotos miden la energía o radiación electromagnética (REM) que es reflejada o emitida por los objetos y pueden ser ubicados a bordo de aviones o satélites que orbitan la Tierra (Chuvieco, 2010). Debido a que la superficie terrestre es modificada constantemente ya sea por la evolución de los ecosistemas, la acción del hombre y la interacción entre ambos, la observación sistemática de la superficie terrestre es fundamental para comprender y pronosticar la dinámica de los sistemas. El conocimiento de esta dinámica permitirá la predicción de escenarios futuros y la teledetección se convierte así en una herramienta fundamental que complementa e incrementa la cobertura de las mediciones *in situ* de ciertas variables.

Los diferentes componentes de un sistema de teledetección espacial son (Chuvieco, 2010; Figura 3):

1. Fuente de energía: es el origen de la radiación que detecta el sensor. Si la fuente es externa al sensor, por ejemplo el sol, se denomina *teledetección pasiva*; si la fuente es emitida por el mismo sistema se denomina *teledetección activa*.
2. Medio de propagación a través del cual viaja la energía y la información.
3. Superficie terrestre: recibe la energía proveniente de la fuente y la refleja, también emite su propia energía.
4. Sistema sensor: este sistema está compuesto por el sensor y la plataforma que lo contiene.
5. Sistema de recepción: sitio donde se recibe la información transmitida por la plataforma.

6. Intérprete: quien convierte los datos recibidos en información temática de interés.
7. Usuario final: quien analiza el producto y hace uso del mismo para la toma de decisiones.

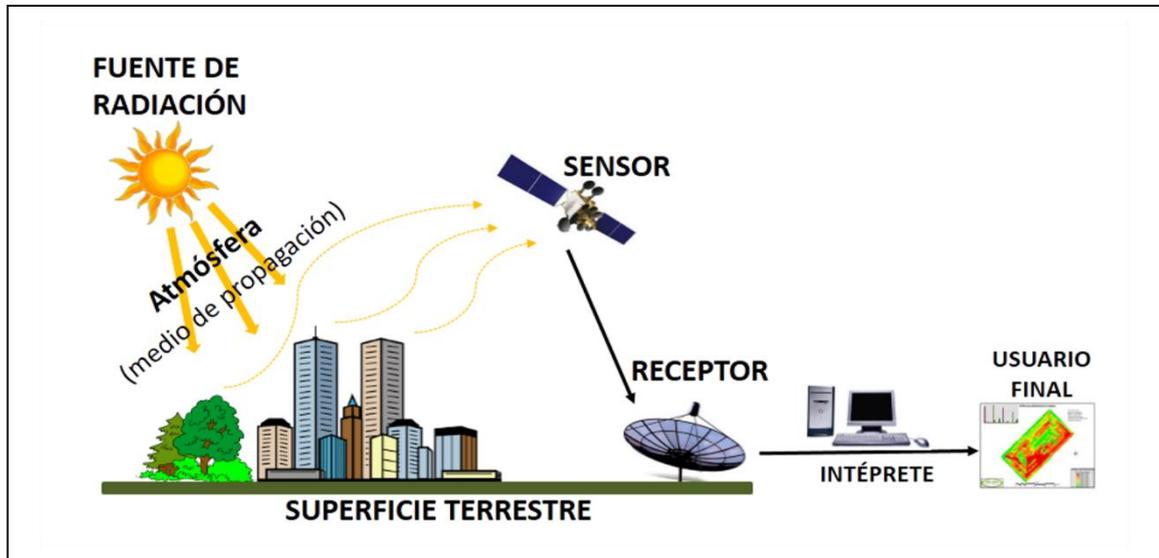


Figura 3. Componentes de un sistema de teledetección.

1.5.2 Teledetección de aerosoles desde plataformas satelitales

Más de tres décadas han pasado desde el lanzamiento del primer satélite utilizado para la detección de aerosoles atmosféricos. Los primeros productos satelitales de aerosoles fueron generados por el satélite TIROS-N lanzado el 19 de octubre de 1978. Originalmente, el sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) a bordo del TIROS-N fue destinado a observaciones climáticas pero sus capacidades fueron ampliadas para la detección de aerosoles. Unos días más tarde, el 25 de octubre, fue lanzado el Nimbus-7 que llevaba a bordo un instrumento de medición aerosoles estratosféricos (SAM) y el sensor TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer*; McCormick et al. 1979), éste último diseñado originalmente para estudiar el contenido total de ozono en la atmósfera. Así, los primeros datos sobre aerosoles han sido aportados por plataformas que no fueron diseñadas expresamente con esta aplicación. De hecho, los productos de aerosoles obtenidos como subproductos de los sensores AVHRR y TOMS, aún en operación, constituyen la serie de registros globales de aerosoles de mayor duración obtenidas desde plataformas satelitales (Herman et al. 1997; King et al., 1999).

Desde entonces, el desarrollo de nuevas tecnologías por parte de distintas agencias espaciales (NASA, CNES, JAXA, ESA, NOAA, entre otras) ha dado lugar a múltiples

bases de datos con información sobre los aerosoles aportada por distintas plataformas satelitales (Tabla 2). Estos productos satelitales son utilizados para inferir las principales fuentes de emisión de aerosoles, estudiar su distribución espacial y variación temporal, la distribución vertical en la columna atmosférica, evaluar su composición en cuanto a la fracción de aerosoles finos y gruesos, su interacción con la radiación solar incidente, entre otros (Petrenko et al., 2012; Kumar, 2015; Jia et al., 2012; Gueymard y George, 2005).

Tabla 2. Ejemplos de plataformas y sensores satelitales utilizados para obtener información sobre propiedades de los aerosoles

Lanzado	Fin misión	Plataforma	Instrumento
1978	1980	TIROS-N	AVHRR
1978	1993	Nimbus-7	SAM-2,CZCS,TOMS
1979	1981	AEM-B	SAGE
1979	Presente	NOAA-6~16	AVHRR
1984	2005	ERBS	SAGE-2
1997	Presente	TRMM	VIRS
1991	1996	SPOT-3	POAM-2
1991	1999	ERS-1	ATSR, GOME
1992	2005	UARS-	HALOE
1994	1994	SSD	LITE
1995	Presente	ERS-2	ATSR-2, GOME
1996	Presente	Earth	Probe
1996	1997	ADEOS	POLDER, ILAS, OCTS
1997	Presente	OrbView-2	SeaWiFS
1998	Presente	SPOT-4	POAM-3
1999	Presente	TERRA	MODIS, MISR
2001	2005	METEOR-3M	SAGE-3
2001	Presente	PROBA	CHRIS
2001	Presente	Odin	OSIRIS
2002	Presente	AQUA	MODIS
2002	Presente	ENVISAT	AATSR, MERIS, SCIAMACHY
2002	2003	ADEOS-2	POLDER-2, ILAS-2, GLI

2002	Presente	MSG-1	SEVIRI
2003	-2003	ICESat	GLAS
2004	Presente	AURA	OMI, HIRDLS
2004	Presente	PARASOL	POLAR-3
2006	Presente	CALIPSO	CALIOP

Espesor óptico de aerosoles

Las mediciones satelitales de aerosoles se basan en el hecho de que las partículas en suspensión cambian la forma en que la atmósfera refleja y absorbe la luz visible e infrarroja.

El parámetro más común obtenido de sensores remotos relacionado con los aerosoles en atmósfera es el *espesor óptico de aerosoles* (AOD por Aerosol Optical Depth o AOT por Aerosol Optical Thickness, en inglés). El AOD es un parámetro adimensional que mide la extinción de la luz debida a su dispersión y absorción por la presencia de partículas (por ejemplo, neblina urbana, humo, polvo desértico, sal marina) distribuidas en la columna de aire desde la superficie terrestre a la parte superior de la atmósfera. Los valores de este parámetro varían entre 0 y aproximadamente 5. El voltaje (V) medido por un sensor (a bordo de un satélite o un fotómetro en superficie) es proporcional a la irradiancia espectral (I) que llega al instrumento, además el sensor estima la irradiancia espectral en la parte superior de la atmósfera (I_0). El espesor óptico total (τ_{TOT}) se obtiene a partir de la siguiente ecuación de acuerdo a la ley de Beer-Lambert-Bouguer:

$$V(\lambda) = V_0(\lambda) d^2 \exp[-\tau(\lambda)TOT * m] \quad (1)$$

donde $V(\lambda)$ es el voltaje digital medido a la longitud de onda λ , V_0 es el voltaje en la parte superior de la atmósfera (estimación de I_0), d es la relación entre el promedio y la distancia real entre el Sol y la Tierra, τ_{TOT} es el espesor óptico total, y m es la masa óptica de aire (Holben 1998).

A mayor espesor óptico total (τ_{TOT}) el sensor registra un valor menor de $V(\lambda)$; es decir, a mayor masa de partículas en la atmósfera, menor es la irradiancia espectral (I) detectada por el instrumento.

Además de las partículas, otros constituyentes atmosféricos pueden dispersar o absorber la radiación y deben considerarse al calcular el AOD. El espesor óptico de aerosoles debido al vapor de agua, la dispersión de Rayleigh y otros gases traza (dependientes de la longitud de onda) deben restarse del espesor óptico total para obtener el componente correspondiente a los aerosoles:

$$\tau(\lambda)\text{Aerosol}=\tau(\lambda)\text{TOT}-\tau(\lambda)\text{agua}-\tau(\lambda)\text{Rayleigh}-\tau(\lambda)\text{O}_3-\tau(\lambda)\text{NO}_2-\tau(\lambda)\text{CO}_2-\tau(\lambda)\text{CH}_4 \quad (1b)$$

Algoritmos

La teledetección de aerosoles es un problema complejo debido a que el número de variables a determinar es mayor que el número de parámetros que, en un principio, son derivados de las mediciones satelitales.

Los sensores satelitales miden la radiación espectral (densidad de flujo de energía radiante por unidad de ángulo sólido) que llega desde el sistema superficie terrestre-atmósfera. En el visible, la señal que llega al sensor es debida a la reflexión de la superficie de la tierra y la dispersión y absorción por la atmósfera (gases y partículas). Es decir, la luz visible reflejada desde la superficie de la tierra es dispersada por los gases y aerosoles. Para una composición atmosférica y una superficie terrestre determinada, la radiancia varía dependiendo del ángulo cenital solar, ángulo cenital del satélite y el ángulo cenital relativo sol/satélite. El espesor óptico de aerosoles es inferido a partir de la radiación detectada por el sensor satelital y la consideración de algunas suposiciones sobre las propiedades ópticas de los aerosoles (distribución de tamaño, forma, albedo de dispersión, y el índice de refracción).

La señal recibida por el satélite está condicionada tanto por variables atmosféricas (nubes, gases, aerosoles), es decir variables del medio de propagación de la señal, como por variables de la superficie terrestre, que refleja la radiación solar. Por lo tanto, para inferir las propiedades de los aerosoles es necesario descomponer las señales mixtas provenientes de los gases atmosféricos, los aerosoles, y la superficie terrestre. La detección de aerosoles sólo es válida en condiciones de cielo despejado debido a que en presencia de nubes la señal reflejada es muy alta. Es por ello que el primer paso de los algoritmos de recuperación de aerosoles comprende siempre la identificación de la presencia de nubes. En aquellos pixeles en los que se detecta la presencia de nubes, el espesor óptico de aerosoles no es estimado. El segundo paso consiste en evaluar la dispersión molecular debido a la presencia de partículas atmosféricas y la absorción de gases atmosféricos y el tercero implica eliminar de la señal recibida por el sensor aquella que corresponde a la reflexión de la superficie terrestre, para lo cual se utilizan modelos de transferencia de radiación que simulan la interacción entre la radiación solar, la tierra y la atmósfera.

Los primeros algoritmos para recuperar la señal de los aerosoles estaban limitados a superficies oscuras con reflectividades bajas y uniformes, como por ejemplo los océanos

(Griggs, 1975; Higurashi y Nakajima 1999). Sin embargo, el sensoramiento remoto de los aerosoles sobre superficies continentales más brillantes es muy importante para estudios ambientales y climáticos debido a que la mayoría de los aerosoles se originan en superficies tales como suelos desnudos, desiertos, áreas urbanas, agrícolas e industriales. La recuperación de la señal proveniente de los aerosoles sobre superficies continentales requiere el conocimiento con mayor precisión posible de la reflectancia de la superficie terrestre. Gracias a la aparición de nuevas técnicas de teledetección que utilizan información de mediciones multiespectrales desde múltiples ángulos esta limitación ha disminuído considerablemente (Kaufman et al., 1997; Martonchik et al., 1998 y 2002; Hsu et al., 2004; Remer et al., 2005; Levy et al., 2007).

Para la detección de aerosoles desde plataformas satelitales han sido desarrollados numerosos algoritmos que utilizan una o múltiples longitudes de onda, la vista desde el nadir o desde ángulos múltiples, con o sin polarización, desde órbitas polares o geoestacionarias. Algunos de los algoritmos se utilizan para aplicaciones de rutina de corrección atmosférica, mientras que otros son utilizados específicamente para el estudio de los aerosoles. En la literatura científica pueden encontrarse una gran cantidad de comparaciones y evaluaciones sobre los diferentes productos satelitales de aerosoles, incluidos los del MODIS, MISR, AVHRR, TOMS, SeaWiFS, MERIS, AATSR, y otros instrumentos (Jeong et al., 2005; Kokhanovsky et al 2007).

1.5.3 El sensor MODIS

El sensor MODIS se encuentra a bordo de los satélites Aqua y Terra (NASA), puestos en órbita polar y heliosincrónica el 18 de diciembre de 1999 y el 4 de mayo de 2002, respectivamente. Estos satélites operan a una altura aproximada de 700 km y cruzan el ecuador aproximadamente a las 10:30 hs (TERRA) y 13:30 hs UTC (AQUA). Las 36 bandas espectrales, desde la longitud de onda del visible hasta el infrarrojo térmico permite que su información espacial tenga muchas aplicaciones, entre ellas la de obtener valores diarios globales del AOD y del tamaño de los aerosoles en la atmósfera.

El algoritmo de aerosoles de MODIS se compone de dos algoritmos independientes, uno para aerosoles derivados en áreas continentales y otro para los aerosoles derivados sobre el océano. Ambos utilizan *look-up tables* para el cálculo del AOD. Las *look-up tables* (o tablas de consulta, en español) son tablas que contienen las radiancias de la parte superior de la atmósfera (radiancia TOA) simuladas a partir de la geometría sol-tierra-satélite, la carga de aerosoles, las características de aerosol, y reflectividad de la

superficie. El supuesto clave para la obtención del AOD está en la especificación de la función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF), necesaria para determinar la radiación reflejada por la superficie de la tierra. El espesor óptico de aerosoles se obtiene a partir de la búsqueda en las *look-up tables* de las entradas que más se acerquen a las radiancias observadas a una determinada longitud de onda. Para una revisión detallada de los algoritmos del producto estándar de AOD de MODIS debe consultarse Levy et al. (2009).

Numerosos estudios en distintas regiones del mundo reportan un buen desempeño del producto estándar de AOD de 10 y 3 km de resolución espacial de MODIS (MOD04/Terra y MYD04/Aqua; Barnaba et al, 2010; More et al, 2013). Sin embargo, estas resoluciones espaciales no son suficientes para el estudio de la variabilidad espacial de aerosoles en áreas urbanas o para evaluar el impacto de los aerosoles en estudios de tipo epidemiológicos (Chudnovsky et al., 2014).

1.5.4 Implementación del algoritmo de corrección atmosférica *multi-ángulo*

Recientemente, ha sido desarrollado para MODIS un nuevo algoritmo genérico denominado *implementación de corrección atmosférica multi-ángulo* (MAIAC, siglas en inglés) mediante el cual se obtiene información sobre aerosoles y la corrección atmosférica tanto sobre superficies oscuras con vegetación como sobre desiertos brillantes mediante el procesamiento basado en imágenes y el análisis de series de tiempo. Los productos obtenidos mediante este algoritmo incluyen el espesor óptico de aerosoles a 470 nm de longitud de onda a una resolución espacial de 1 km. Esta mayor resolución espacial, requerida en numerosas aplicaciones como el estudio de la calidad del aire en áreas urbanas, puede brindar nueva información sobre las fuentes de aerosoles atmosféricos. A pesar de que MAIAC se encuentra todavía en la etapa de desarrollo, se considera que la calidad actual del producto MAIAC es lo suficientemente alta como para justificar el análisis de la información en distintos sitios del mundo y su comparación con otros productos operacionales de MODIS.

Para una descripción detallada del algoritmo debe consultarse Lyapustin et al. (2011 y 2012). Brevemente, el algoritmo MAIAC realiza la corrección atmosférica y recupera información sobre aerosoles en base al procesamiento de imágenes MODIS, el análisis de serie temporal (hasta 16 días previos) y la función de distribución de reflectancia superficial bidireccional (BRDF, siglas en inglés).

El algoritmo de aerosol propiamente dicho consiste en dos pasos: la caracterización de la superficie (cálculo de coeficiente de regresión espectral, SRC) en el azul (banda B3: 0,47 μm), y la recuperación del espesor óptico y la fracción de modo fino de aerosoles.

La información acumulada de la serie de tiempo provee una cobertura multi-ángulo (según el día cambia el ángulo de observación del satélite) requerida para la recuperación de la BRDF, ésta última puede ser definida como la razón entre la radiación reflejada (radiancia) y la radiación incidente (irradiancia) en función de los ángulos definidos por la dirección de incidencia y de detección. La BRDF permite precisar la distribución angular de la radiación reflejada en una superficie y así determinar propiedades relacionadas con la superficie.

MAIAC define como área de procesamiento elemental un bloque de 25x25 píxeles (25 km), donde se asume que la variabilidad del AOD es pequeña. Si la BRDF cambia poco durante el período de acumulación de k días, entonces el número de mediciones en cualquier banda espectral dada excede el número de incógnitas (Figura 4).

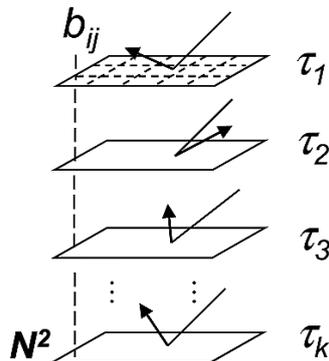


Figura 4. Serie temporal de k días de mediciones de la banda azul de MODIS para la recuperación del SRC. La imagen muestra esquemáticamente un bloque de 25 km² en una cuadrícula geométrica corregida y calibrada de datos TOA (LIB; Lyapustin et al., 2011).

Para simplificar el problema de inversión, MAIAC inicialmente recupera el BRDF en el infrarrojo de onda corta, la banda 7 (SWIR: 2,1 μm), que normalmente es transparente a la atmósfera, y asume que la BRDF es similar entre el SWIR y las bandas azules de MODIS.

El algoritmo de los aerosoles deriva del coeficiente de regresión espectral (SRC, en inglés), que relaciona la BRDF superficial entre las bandas azul y SWIR. Este

componente permite que la recuperación de los aerosoles pueda hacerse tanto para superficies oscuras como claras a una resolución de 1 km.

Una vez que el SRC ha sido calculado, se calcula la BRDF superficial. En este paso, la resolución de 25 km se descarta. El AOD es estimado a una resolución de 1 km haciendo coincidir la reflectancia medida el último día de mediciones de MODIS con un valor simulado.

Para que este proceso tenga éxito, la reflectancia de la superficie debe ser relativamente estable a lo largo de la ventana de tiempo de 16 días. Presenta un buen desempeño sobre superficies cuya reflectancia no cambia mucho o cuando se cambia de forma relativamente lenta con el tiempo, de modo que MAIAC es capaz de rastrear el cambio a través de la corrección atmosférica.

Por otro lado, cambios grandes y rápidos en la superficie, por ejemplo crecimiento rápido de vegetación sobre suelos brillantes, pueden causar errores sistemáticos tanto en la recuperación de los aerosoles, que se basa en el conocimiento previo de las propiedades de la superficie, como en la corrección atmosférica. Por esta razón, el algoritmo MAIAC tiene un componente de detección de cambios y combina la recuperación del BRDF de varios días con la evaluación de reflectancia de un único día. Para una descripción detallada del algoritmo de corrección atmosférica y de su interrelación con el algoritmo de aerosol debe consultarse (Lyapustin et al., 2011 y 2012).

1.5.6 Ventajas y desventajas del sensoramiento remoto de los aerosoles

Los avances tecnológicos en el monitoreo satelital de los aerosoles atmosféricos han resultado en el desarrollo de numerosas bases de datos de gran valor científico tanto a escala global como local. El monitoreo desde plataformas satelitales brinda la posibilidad de realizar mediciones homogéneas, precisas, regionales, durante mayores períodos de tiempo y con una periodicidad diaria.

Como desventaja respecto a las estaciones de monitoreo de aerosoles en superficie, que en general presentan una frecuencia horaria, la información obtenida mediante plataformas satelitales no permite evaluar la variación espacio-temporal de los aerosoles durante el transcurso del día. Otra desventaja es que, debido a que la detección de los aerosoles se realiza por medios ópticos, la presencia de nubes imposibilita la detección de aerosoles desde el espacio. Esto es una limitación particularmente importante en regiones con largos períodos de lluvia.

1.6 Mediciones de espesor óptico de aerosoles desde la superficie terrestre.

Además de la estimación del espesor óptico de aerosoles mediante sensado remoto desde plataformas satelitales, este parámetro puede ser y es medido desde fotómetros localizados en la superficie terrestre.

El registro más importante de AOD a escala global desde fotómetros localizados en la superficie terrestre es ofrecido por la red AERONET (AErosol ROBotic NETwork, en inglés), programa llevado a cabo por NASA y PHOTONS (PHOtométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire; Univ. of Lille 1, CNES, y CNRS-INSU) que consiste en una red de fotómetros ubicados en la superficie terrestre distribuidos en distintas partes del mundo gracias a la colaboración de otras redes (por ejemplo: RIMA, AeroSpan, AEROCAN y CARSNET) y distintas agencias, instituciones, universidades (Figura 5). Mediante estos instrumentos se realizan mediciones de espesor óptico de aerosoles, propiedades microfísicas y de radiación atmosférica para su aplicación en estudios sobre aerosoles atmosféricos, su caracterización y validación de la información obtenida con los satélites. El programa ofrece una base de datos continua, de dominio público y fácil acceso y estandariza qué tipo de instrumentos se utilizan, su calibración, el procesamiento y la distribución de los datos (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>).

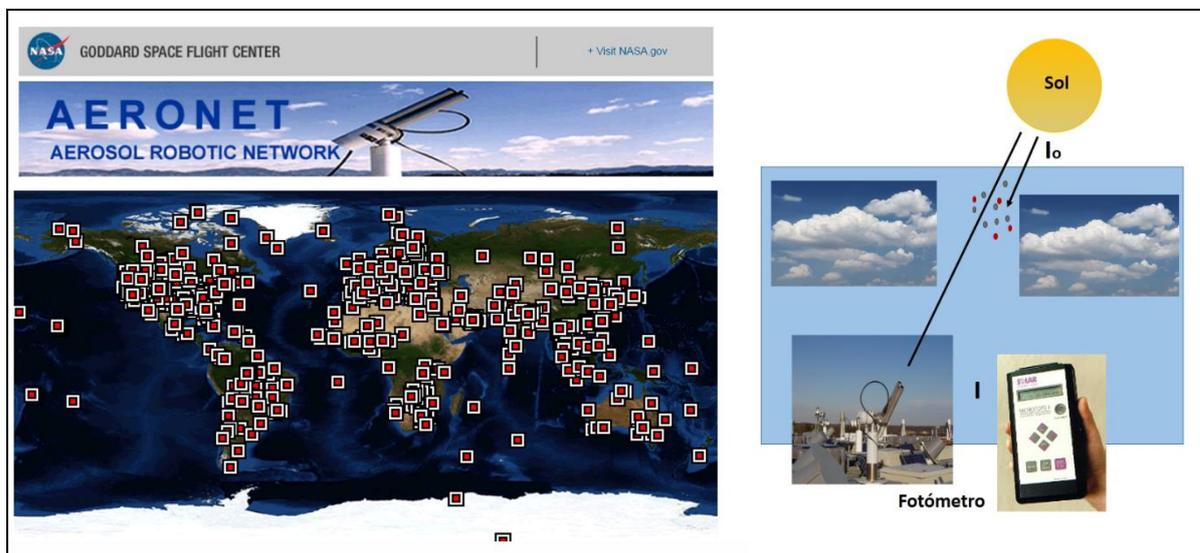


Figura 5. Red global de fotómetros Aeronet. Imagen obtenida de <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>

1.7 Calidad del aire en Córdoba

La ciudad de Córdoba es la capital de la Provincia de Córdoba y la segunda ciudad más grande del país, con aproximadamente 1,3 millones de habitantes y una superficie de 576 km² (INDEC, 2010). Debido a que la ciudad se encuentra rodeada por un cordón montañoso y a que durante el invierno ocurren eventos de inversión térmica, se produce el estancamiento de los contaminantes del aire en una fina capa (200 metros) sobre la superficie (Stein y Toselli, 1996; Olcese y Toselli, 2002). Estudios realizados sobre la composición y fuentes de los aerosoles dentro de la ciudad revelan que la principal fuente de material particulado es el tránsito (85% de la emisión total de partículas), seguido por la resuspensión del polvo de calles y edificios en construcción (Stein y Toselli, 1996). Respecto al tamaño del material particulado, un estudio de monitoreo realizado en el período julio de 2009 - abril de 2010 reporta que en Córdoba más del 65% del PM corresponde a PM₁₀ (López et al., 2011) y que los umbrales de calidad del aire fijados por la OMS (Tabla 1) se superan con frecuencia (López et al., 2011). El O₃ troposférico presenta bajas concentraciones en la ciudad debido a las emisiones de NO procedentes del tráfico, pero aumenta en los alrededores como consecuencia del transporte de sus precursores por el viento (Olcese y Toselli, 2002). Algunos estudios realizados con biomonitores reportaron niveles críticos de metales pesados (Carreras y Pignata 2002) con un potencial de genotoxicidad significativo (Carreras et al., 2006).

1.7 Objetivos de este estudio

Este estudio tiene como objetivo principal analizar la distribución espacio-temporal de aerosoles atmosféricos en la ciudad de Córdoba y evaluar la relación entre las mediciones de AOD satelital, material particulado de una estación de monitoreo y datos meteorológicos.

Los objetivos específicos son:

- Analizar el desempeño del algoritmo MAIAC en Córdoba a través de la comparación con valores de AOD medidos desde superficie por la estación Córdoba-CETT (AERONET).
- Evaluar los cambios en la distribución espacio-temporal de aerosoles en la ciudad de Córdoba para el período 2003-2013 utilizando el producto de AOD de MODIS de alta resolución (algoritmo MAIAC).

- Evaluar la correlación entre los valores de AOD-MAIAC con mediciones en superficie de PM₁₀.
- Analizar la influencia de diferentes variables meteorológicas (humedad, temperatura, precipitación, velocidad y dirección del viento, altura de la capa límite) en la concentración de aerosoles y PM en la ciudad de Córdoba.
- Estudiar la relación entre los valores de AOD satelitales, mediciones de PM desde superficie y datos meteorológicos, para evaluar la contribución a la variabilidad de los valores de PM medidos en superficie y realizar una primera aproximación al desarrollo de un modelo predictivo de la distribución espacial de aerosoles.

Capítulo 2

2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y BASES DE DATOS

2.1 Área de estudio

El área de estudio comprende la ciudad de Córdoba (31,39°S-64,18°O) y alrededores. La ciudad de Córdoba se encuentra ubicada en la en la región central del país, a 437 m s.n.m, al este del cordón oriental de las Sierras Chicas que poseen una altura promedio de 550 m s.n.m, siendo el cerro más alto el Uritorco, de 1.979 m s.n.m (Figura 6 y 7). Las bases de datos utilizadas para la elaboración de los mapas en esta sección se describe en la sección 2.2.1.

En la Figura 8 se muestra la región con los límites del área analizada del producto AOD_{MAIAC} utilizado para este estudio, los principales asentamientos urbanos y vías de circulación, ríos y lagos. Además, se indica la ubicación de las estaciones de monitoreo de AOD (AERONET), material particulado (PM) y meteorológicas (Aeropuerto y Observatorio) descriptas en la sección 2.2.

El uso de la tierra en el área de estudio comprende actividades urbanas, agrícolas e industriales. El cinturón verde de Córdoba (o área de quintas) es una zona en la periferia de la ciudad destinada a la actividad fruti-hortícola. Tiene un área cercana a las 20 mil hectáreas (200 km²), la mayoría dentro del departamento Capital. Alrededor de 260 productores se dedican a hortalizas livianas (verduras de hoja, berenjena, tomate, chaucha, zapallito, entre otros) y alrededor de 60 se dedican a hortalizas pesadas (papa, batata y zanahoria). Cada explotación tiene entre 4 y 15 hectáreas. Esta área se distribuye tanto al noreste como sureste de la ciudad. La actividad agrícola en el área rural se caracteriza principalmente por el cultivo de soja, maíz, seguido por el trigo, el sorgo y el girasol. La provincia de Córdoba es una de las principales productoras de soja, sorgo granífero y trigo, y en menor medida de girasol. La actividad ganadera en esta área comprende tanto ganado vacuno como porcino y en menor medida ovino y caprino.

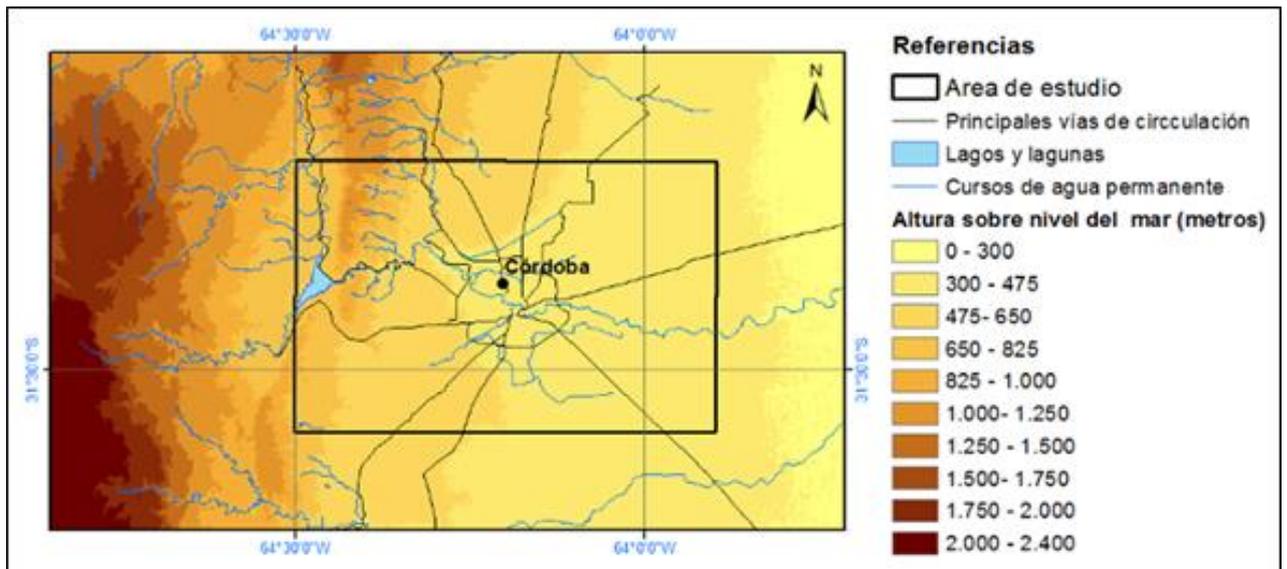


Figura 6. Relieve en el área de estudio: altura sobre el nivel del mar. Fuente: Modelo de elevación digital (DEM) de 30 m de resolución espacial del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

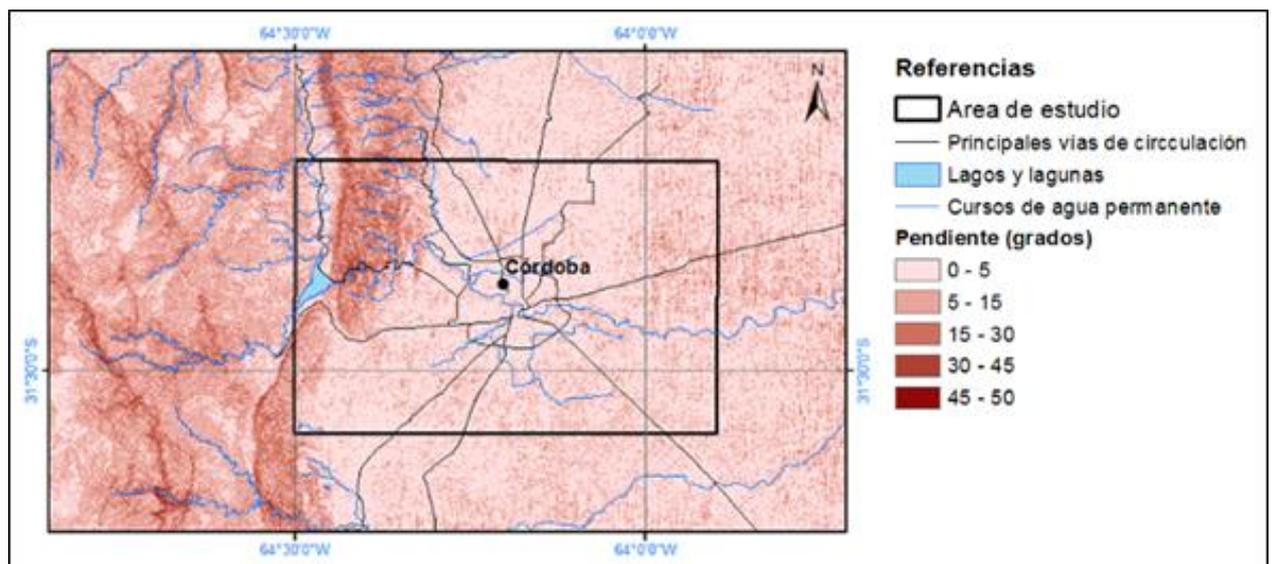


Figura 7. Relieve en el área de estudio: Pendiente en grados. Fuente: Modelo de elevación digital (DEM) de 30 m de resolución espacial del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

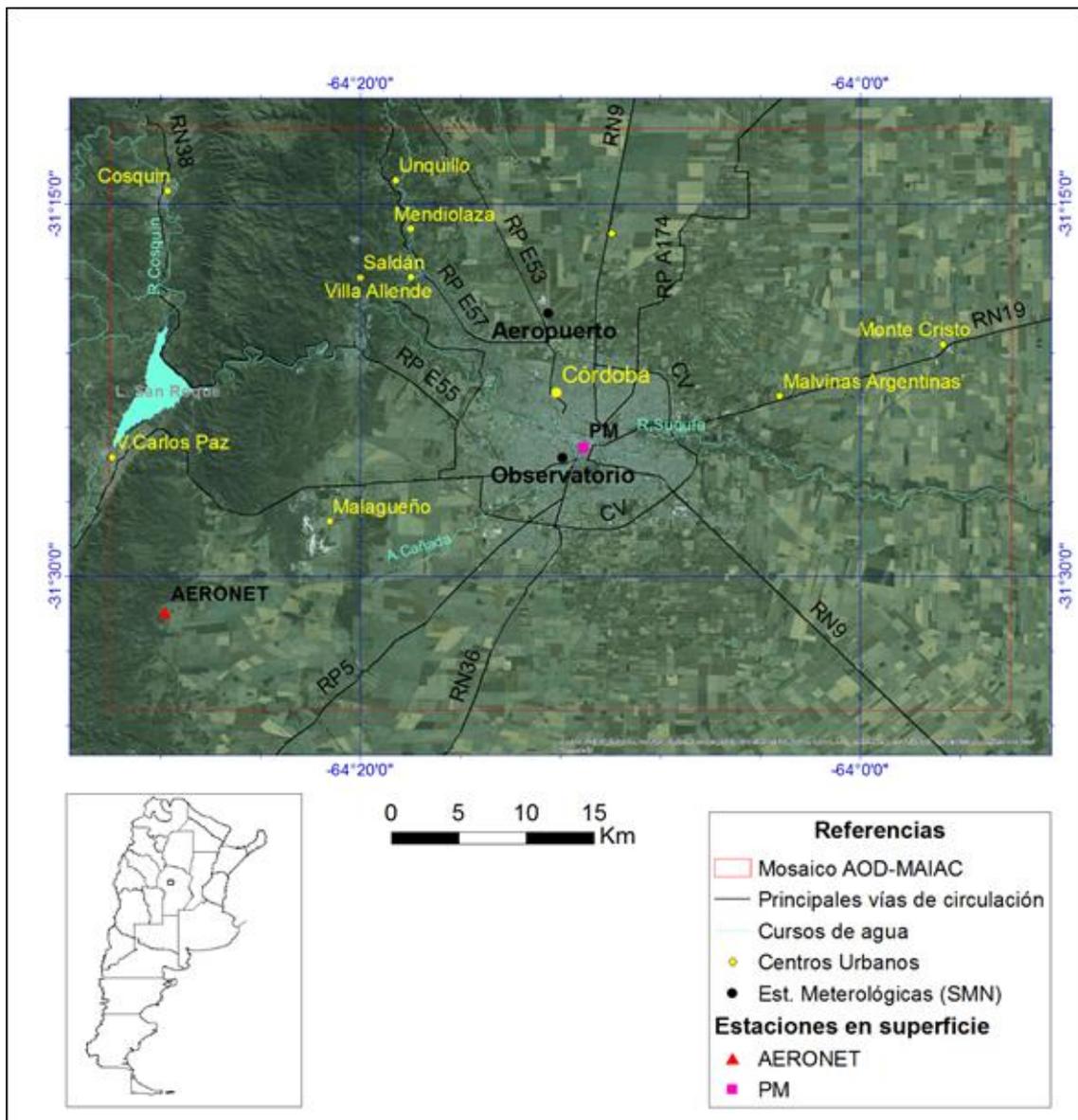


Figura 8. Principales centros urbanos, ríos, lagos y vías de circulación (RP: Ruta Provincial, RN: Ruta Nacional, CV: Circunvalación) en el área de estudio. La cobertura del producto AODMAIAC está indicada con un cuadrado colorado sobre una imagen Landsat 8 (18/01/2014, RGB: 432).

Respecto a la actividad industrial del área, se destacan la fabricación de alimentos (y la industria automotriz, complementada por la fabricación de maquinaria agrícola, fabricación de autopartes y motocicletas.

Teniendo en cuenta el uso de la tierra, la geografía y las diferentes zonas urbanas en el área de estudio, se realizó una zonificación que se presenta en la Figura 9.

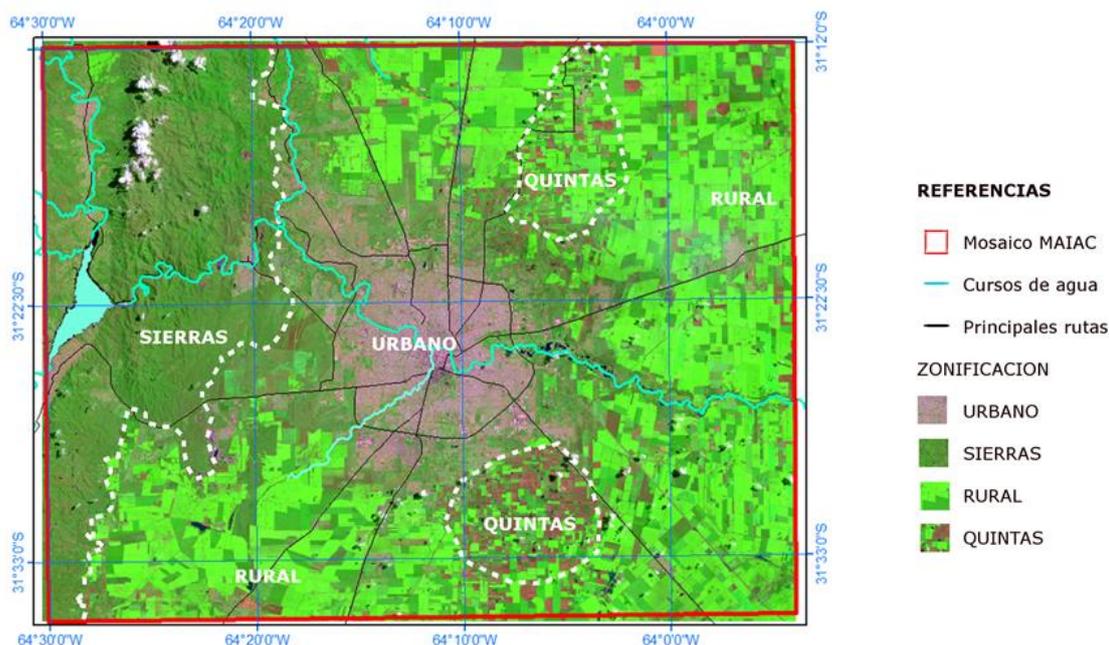


Figura 9. Zonificación del área de estudio sobre una imagen Landsat 8 (15/12/2014, RGB: 652).

2.1.1 Caracterización climática

El clima en la ciudad de Córdoba es *templado subtropical húmedo con invierno seco* también denominado *pampeano*, y presenta las cuatro estaciones bien definidas. En el área de las Sierras, puede llover más de 1200 mm/año y se observan temperaturas promedio anuales más bajas (14 °C) respecto a la ciudad. En la ciudad de Córdoba capital el promedio anual de lluvias es de 715 mm, con temperaturas promedio de 24 °C en verano y de 12 °C en invierno. Dada la extensión del área metropolitana, existe una diferencia de 5 °C o más entre el área céntrica y la periferia. El área céntrica, densamente edificada y ubicada en una depresión, se comporta como una importante isla de calor. Además, debido a las frecuentes inversiones térmicas que se producen durante el invierno, se produce un estancamiento de los contaminantes en las capas bajas de la atmosfera (Stein y Toselli, 1996; Olcese y Toselli, 2002).

La Figura 10 presenta los promedios mensuales de precipitación (P), temperatura (T°) y humedad relativa (HR) obtenidos de dos estaciones meteorológicas dependientes del Servicio Meteorológico Nacional ubicadas en el Aeropuerto (AE) y Observatorio (OBS), a 12 y 1 km del centro de la ciudad respectivamente, para el período 2002-2013.

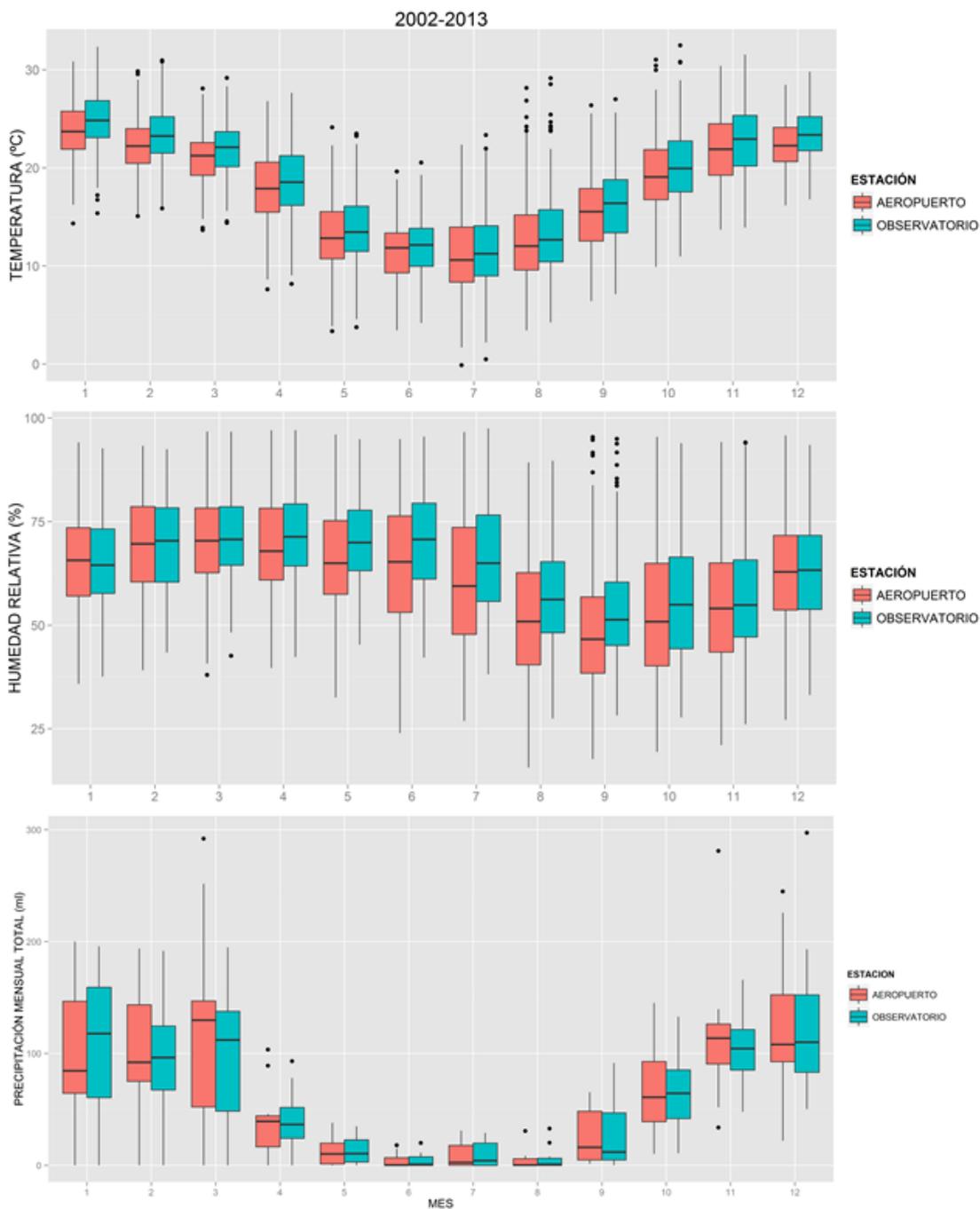


Figura 10. *Temperatura, humedad relativa y precipitaciones totales mensuales registradas en las estaciones Observatorio y Aeropuerto del Servicio Meteorológico Nacional para el período 2002-2013.*

El período más cálido, entre octubre-marzo, mostró valores de temperatura media mensuales cercanos a 20°C. La temperatura media mensual máxima corresponde al mes de enero con valores entre 23,7°C y 24,8 °C. A partir de abril la temperatura media comienza a descender hasta alcanzar un los 11-11,6°C y en julio se registraron valores

inferiores a 0°C. Cabe destacar que las temperaturas medias mensuales registradas en el área céntrica son entre 0,5 y 1°C mayores respecto a las registradas en la periferia.

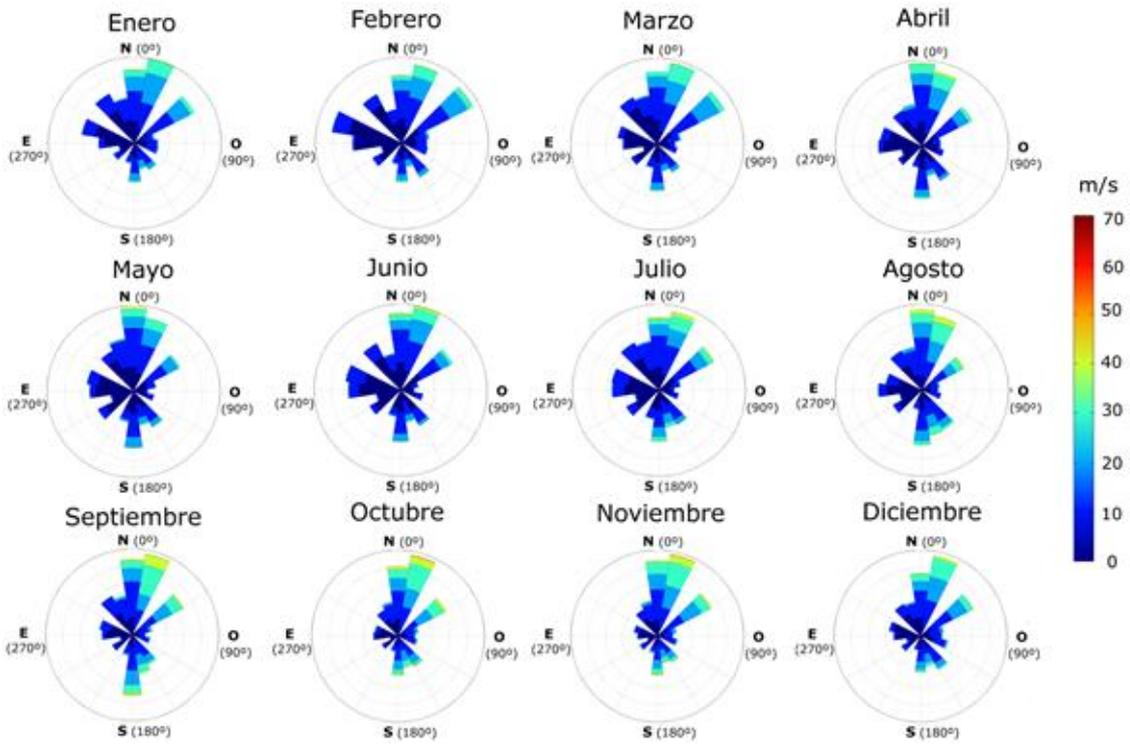
Considerando la humedad relativa (HR) se pueden definir dos períodos muy distintos durante el año: uno de menor HR entre agosto y noviembre, con un valor promedio de 50-60%, y otro de mayor HR entre diciembre y julio con valores promedio de 65 y 70%. Al igual que lo observado en la temperatura, la HR presenta, en general, valores más elevados en el área céntrica.

El promedio anual de lluvias de la ciudad de Córdoba capital es de 715 mm. Las precipitaciones principalmente se concentran entre enero-marzo y noviembre-diciembre (90-130 ml mensuales). Entre mayo y septiembre las precipitaciones registradas son muy escasas (4-25 ml mensuales).

Respecto a la dirección e intensidad de los vientos, en el área céntrica de la ciudad se registraron vientos predominantemente de dirección N-NO y con menor frecuencia e intensidad de dirección S (Figura 11). En la periferia, también predominan los vientos N-NO y S pero además se registran vientos de menor frecuencia e intensidad desde todas las direcciones. La mayor frecuencia e intensidad de los vientos desde N-NO y S ocurre entre agosto y noviembre.

A modo de resumen, en el área de estudio se observan veranos cálidos con alta humedad relativa y abundantes precipitaciones. En otoño la temperatura desciende y las precipitaciones son menos frecuentes e intensas pero la humedad relativa continúa similar a la registrada en verano. En invierno se registran bajas temperaturas, posibilidad de heladas, muy escasas precipitaciones y baja humedad relativa, siendo éste el período más seco del año. Estas condiciones favorecen los episodios de inversión térmica sobre el área urbana, que resultan en el aumento de la concentración de partículas en la baja atmósfera. Hacia la primavera aumenta la temperatura y la frecuencia e intensidad de las precipitaciones. En todas las estaciones del año predominan los vientos N y NO y con menor frecuencia los vientos S, con un notable aumento en la intensidad de los mismos durante primavera.

Rosa de los vientos - Estación AEROPUERTO 2002-2013



Rosa de los vientos - Estación OBSERVATORIO 2002-2013

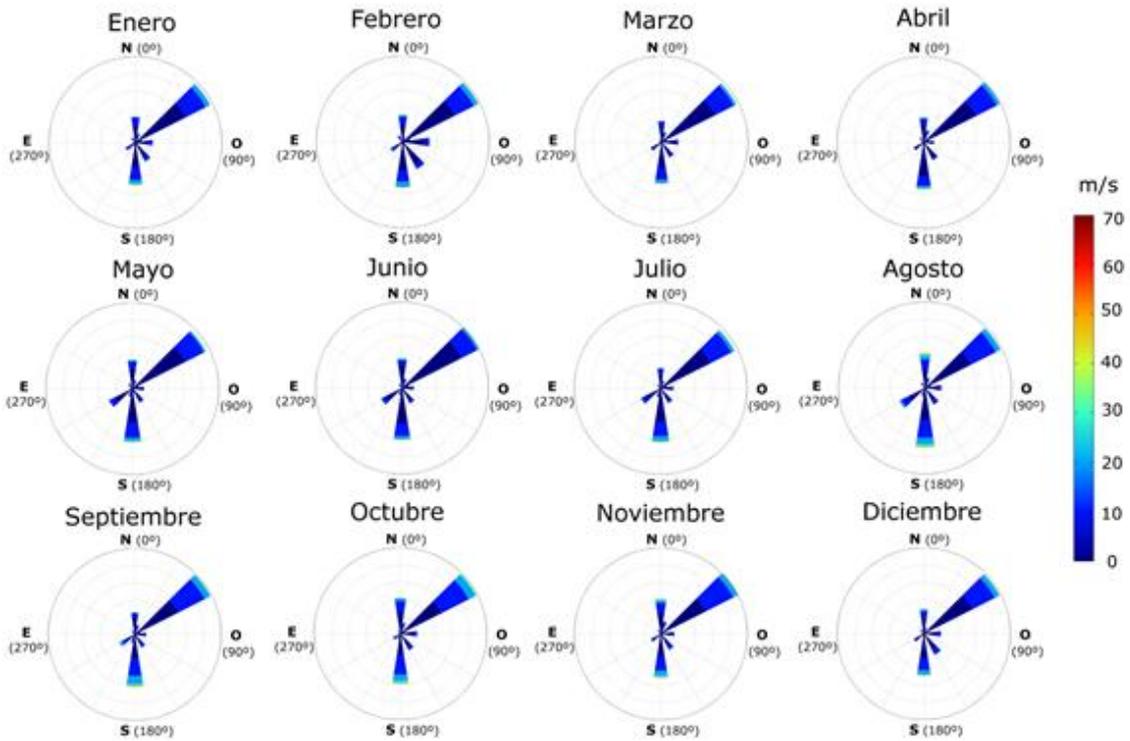


Figura 11. Rosa de los vientos para las estaciones Aeropuerto (arriba) y Observatorio (abajo) del SMN para el período 2002-2013.

2.2 Bases de datos

2.2.1 Elaboración de mapas

Los mapas elaborados en esta tesis se obtuvieron por superposición de datos raster y vectores de líneas, puntos y/o polígonos.

Los archivos tipo raster de las Figuras 8, 9 y 20 corresponden a imágenes obtenidas con el satélite Landsat 8 adquiridas de la web ‘Earth Explorer’ (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, siglas en inglés). Landsat 8 es un satélite de observación terrestre lanzado el 11 de febrero de 2013 que provee observaciones de la Tierra entera cada 16 días. Es el octavo y más reciente satélite del proyecto Landsat operado por la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio de Estados Unidos (NASA, siglas en inglés) y el USGS desde 1972. El satélite Landsat 8 transporta dos instrumentos OLI (siglas en inglés para Operational Land Imager) y TIRS (siglas en inglés para Thermal Infrared Sensor) que cubren el espectro en el rango 0.433-1.39 μm y 10.30-12.50 μm , respectivamente. Al pie de cada figura se indica la fecha de adquisición de la imagen por parte del satélite Landsat 8 y la combinación de bandas utilizada en el formato RGB:abc (donde R=canal rojo, G=canal verde y B=canal azul y a, b, c corresponden a los números de banda colocados en cada canal para la generación de la imagen).

Las Figuras 6 y 7 se obtuvieron a partir del raster Modelo Digital de Elevación (MDE) de 30 metros de resolución espacial desarrollado por la Dirección de Geodesia del Instituto Geográfico Argentino (MDE-Ar, www.ign.gob.ar). Los modelos digitales de elevación representan la superficie topográfica de la Tierra. Se desarrollan a partir de la división del territorio en celdas de un determinado tamaño que se agrupan en forma de una grilla ordenada. Cada celda tiene una ubicación georreferenciada, y a la misma se le asigna un valor de altura respecto del nivel medio del mar. De esta manera, los MDE proveen información muy valiosa y precisa sobre las alturas, pendientes y dimensiones del terreno, que se utilizan para la obtención de mapas como los mostrados en la Figuras 6 y 7.

Los vectores georreferenciados correspondiente a los principales asentamientos urbanos, vías de circulación y cuerpos de agua (ríos y lagos) fueron obtenidos de la web del Instituto Geográfico Nacional.

2.2.2 Espesor óptico de aerosoles (AOD)

Producto de AOD obtenido con el algoritmo MAIAC

Para evaluar la distribución espacio-temporal de los aerosoles en el área de estudio, se utilizó el producto AOD del sensor MODIS del satélite Aqua (NASA) que se obtiene a partir de la implementación del algoritmo de corrección atmosférica MAIAC ($\lambda=470$ nm, 1 km de resolución espacial; Lyapustin et al., 2011).

Las imágenes utilizadas en este estudio cubren la ciudad de Córdoba y alrededores (Figura 8) y fueron obtenidas por comunicación directa con el Dr. Lyapustin (miembro del equipo científico de MODIS y JPSS VIIRS y del grupo de trabajo de aerosoles GeoCAPE, NASA), ya que aún no se encuentran disponibles públicamente. Fueron utilizadas en total 4018 imágenes adquiridas por MODIS/Aqua (NASA), entre las 13 y 17 hs (hora local), abarcando el período 2003-2013 (1-2 imágenes diarias).

Tal como se describió en el Capítulo 1, dado que en presencia de nubes la señal reflejada es muy alta y la detección de aerosoles sólo es válida en condiciones de cielo despejado, el AOD no es calculado en aquellos pixeles en los que se ha detectado la presencia de nubes. En la Figura 12 se muestra el porcentaje de valores de AOD disponibles para cada mes para el período 2003-2013. Tal como era de esperar, los meses con menores precipitaciones son los que presentan más valores disponibles de AOD. A los valores de AOD obtenidos mediante sensado remoto de MODIS y el algoritmo MAIAC se hará referencia de aquí en adelante como AOD_{MAIAC}.

Producto estándar de AOD-MODIS/AQUA: MYD_04

Con el objetivo de comparar el producto estándar de AOD con el obtenido con el algoritmo MAIAC, fueron utilizados los productos de AOD ($\lambda=550$ nm, 10 km de resolución espacial) de MODIS/Aqua (MYD04_L2, Colección 5; Levy et al. 2007) del año 2004 (1-2 productos diarios) que cubren la ciudad de Córdoba y alrededores (mosaico h12-v12).

AOD (470 nm) MAIAC (Aqua) Porcentaje de datos disponibles: período 2003-2013

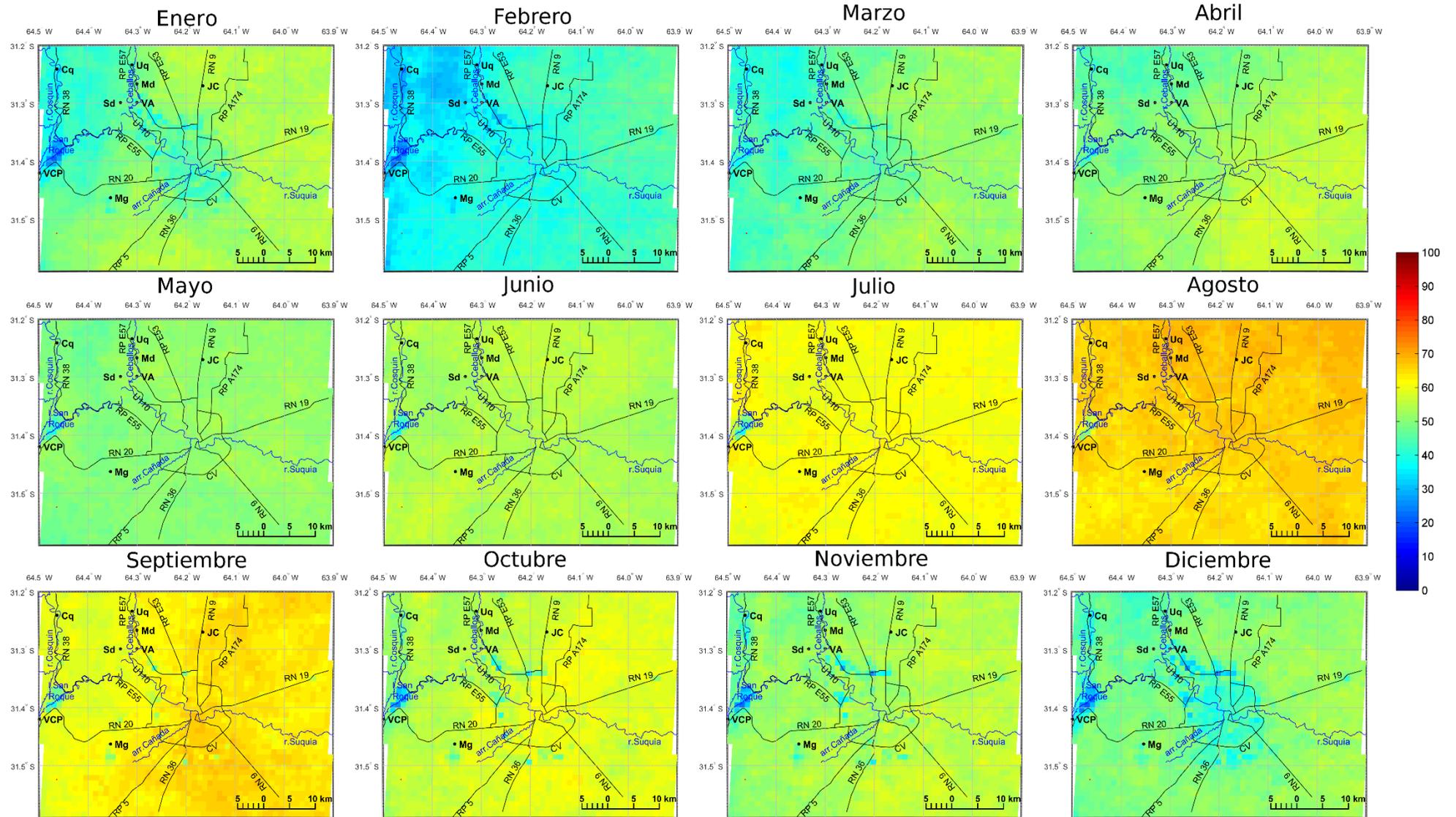


Figura 12. Porcentaje de valores de AOD disponibles para cada mes para el período 2003-2013

Red AERONET: AOD medido desde superficie

AERONET (AErosol RObotic NETwork, en inglés) es un programa llevado a cabo por NASA y PHOTONS (PHOtométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire; Univ. of Lille 1, CNES, y CNRS-INSU) que consiste en una red de fotómetros ubicados en la superficie terrestre distribuidos en distintas partes del mundo gracias a la colaboración de otras redes (por ejemplo: RIMA, AeroSpan, AEROCAN y CARSNET) y distintas agencias, instituciones, universidades. Mediante estos instrumentos se realizan mediciones de aerosoles, propiedades microfísicas atmosféricas y de radiación para su aplicación en investigaciones/estudios sobre aerosoles atmosféricos, su caracterización y validación de información obtenida de los satélites.

Los fotómetros de la red AERONET miden, entre otros parámetros, la atenuación de la luz directa del sol en ocho longitudes de onda distintas (1640, 1020, 870, 675, 500, 440, 380 y 340 nm) para obtener el espesor óptico de aerosoles a partir de la Ley de Beer-BouguertLabert (ver sección 1.5.2). Las mediciones de los fotómetros AERONET son específicas del lugar, ya que los instrumentos se fijan en un lugar, con intervalos de medición de hasta 15 minutos durante todo el período de luz natural. Los productos de AERONET están disponibles en diferentes niveles de procesamiento: nivel 1.0 (datos brutos), nivel 1.5 (datos corregidos automáticamente) y nivel 2.0 (datos de calidad garantizados).

El programa AERONET ofrece una base de datos continua, de dominio público y fácil acceso y estandariza qué tipo de instrumentos se utilizan, su calibración, el procesamiento y la distribución de los datos.

Para este estudio, se obtuvieron los datos de AOD con nivel de procesamiento 2.0 obtenidos a 440 nm de longitud de onda con frecuencia horaria de la estación AERONET Córdoba-CETT (31,52°S-64,46°O; Figura 8) que operó, a una altura de 730 m s.n.m, en la base espacial terrena de CONAE durante el período 2002-2010. Se eligieron las mediciones a la longitud de onda de 440nm por ser la más cercana a la cual se obtiene el AOD_{MAIAC} ($\lambda=470$ nm). Los datos presentan cierta discontinuidad principalmente en 2007, 2008 y 2010. La Tabla 3 muestra los meses con datos disponibles en dicho período. A los valores de AOD obtenidos de la estación AERONET Córdoba-CETT se hará referencia de aquí en adelante como $AOD_{AERONET}$.

Tabla 3. *Meses con datos de AOD disponibles (*) en el período 2002-2010 en la estación AERONET- Córdoba CETT*

AÑO	MES											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2002	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
2003			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
2004	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
2005		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
2006	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•
2007	•	•										
2008										•	•	•
2009	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
2010	•	•	•							•	•	•

2.2.3 Datos meteorológicos

La información meteorológica presentada en el punto anterior y utilizada en este estudio correspondiente al período 2002-2013 fue obtenida del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Se tomaron en cuenta dos estaciones dentro de los límites del área estudiada correspondiente al producto AOD obtenido con el algoritmo MAIAC: una ubicada en el Aeropuerto Internacional Ingeniero Ambrosio Taravella (estación n° 87344; 31,32°S 64,20°O), en las afueras de la ciudad; y otra en el Observatorio Astronómico, dentro de la ciudad (estación n° 87345; 31,42°S-64,19°O, Figura 8). Además, se obtuvo la altura de la capa límite medida por radio sondeo en la estación Aeropuerto a las 9 de la mañana, hora local. La frecuencia con que se obtuvieron los datos meteorológicos se detalla en la Tabla 4.

Tabla 4. *Frecuencia de los datos meteorológicos obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional (S.M.N) según la estación meteorológica para el período 2002-2013.*

	Estación meteorológica (código S.M.N)	
	Aeropuerto (87344)	Observatorio (87345)
	Frecuencia	
Temperatura (°C)	horaria	horaria
Humedad Relativa (%)	horaria	horaria
Viento (dirección e intensidad)	horaria	horaria
Precipitación (mL)	diaria	diaria
Altura de la capa límite (m)	diaria	-

2.2.4 Material particulado

Las mediciones de material particulado (PM_{10}) fueron obtenidas de la Secretaría de Ambiente de la Municipalidad de Córdoba con una estación de monitoreo continuo ubicada en el área céntrica de la ciudad (Av. Colón y Rivera Indarte, $31,41^{\circ}S-64,18^{\circ}O$, Figura 8). Los datos disponibles tienen frecuencia horaria y comprenden el período enero-septiembre de 2009, exceptuando junio.

2.3 Análisis estadísticos

2.3.1 Desempeño del algoritmo MAIAC

La validación de cualquier producto satelital es una tarea compleja que implica la comparación con instrumentos en superficie calibrados, cuyas mediciones se consideran la ‘verdad del suelo’. Las mediciones desde superficie y las obtenidas por sensor remoto satelital presentan algunas diferencias tales como su resolución espacial y temporal, geometrías de medición, rango de validez y fiabilidad instrumental.

La validación del espesor óptico de aerosoles obtenido por sensor remoto satelital se realiza mediante su comparación con las mediciones realizadas por las estaciones de la red AERONET (sección 2.2.1), la cual constituye una metodología de validación estándar para valores de AOD obtenidos con MODIS, empleada frecuentemente en este tipo de estudios (Ichoku et al., 2002; Remer et al., 2005)

Para ello se considera la correspondencia temporal y espacial entre los datos del satélite y de superficie, para cada punto de muestreo. Para la correspondencia espacial, se seleccionó el pixel (según su latitud y longitud geográfica) más cercano a la estación Córdoba-CETT AERONET. Sin embargo como existen antecedentes del empleo del valor promedio de AOD en una ventana de 5×5 o 10×10 pixeles alrededor del pixel más cercano a la estación AERONET (por ejemplo, Nichol y Bilal, 2016), en el presente trabajo se realizaron pruebas con distintos tamaños de ventana (3×3 , 5×5 , 10×10 pixeles). Debido a que se obtuvieron mejores coeficientes de correlación con los valores correspondientes al pixel más cercano a la estación Córdoba-CETT AERONET, sólo se presentan estos resultados.

Para la correspondencia temporal se calculó el promedio de las mediciones de AERONET en una ventana temporal de 120 minutos (± 60 minutos) respecto la hora de paso del satélite por la estación.

De este modo, se emplearon un total de 389 observaciones individuales de $AOD_{AERONET}$ y AOD_{MAIAC} con las que se realizó un primer análisis de correlación para

evaluar la asociación lineal entre estas variables y en segundo lugar un ajuste mediante un modelo de regresión lineal $AOD_{MAIAC} = a AOD_{AERONET} + b$ para evaluar con mayor detalle esta relación.

La misma metodología se aplicó para analizar como varía esta relación con diferentes condiciones meteorológicas, considerando para ello las estaciones del año. Así, se clasificaron los datos de diciembre, enero y febrero como correspondientes a verano; marzo, abril y mayo correspondientes a otoño; junio, julio y agosto correspondientes a invierno y septiembre, octubre y noviembre correspondientes a primavera. Si bien no es estrictamente la definición calendario de cada estación, se eligió definir de esta manera las estaciones debido a que es el uso más corriente en la bibliografía científica consultada (p. ej. Jeoung et al., 2014; Arvani et al., 2016) y de este modo facilita la posible comparación de nuestros resultados con otros estudios.

2.3.2 Variación espacio temporal

La variación espacio-temporal de la concentración de aerosoles se analizó calculando el promedio y desvío estándar anual, estacional y mensual del producto AOD, obtenido con el algoritmo MAIAC, píxel a píxel.

Es decir, se calculó la media aritmética mensual (y el desvío estándar) con los valores diarios de AOD_{MAIAC} correspondientes a cada píxel. La media anual se calculó a partir de las medias mensuales para cada año, no a partir de los valores diarios, para evitar que los meses que presentan más datos pesaran más en el cálculo de la media anual. Las medias estacionales se realizaron con las medias mensuales de los meses: diciembre, enero y febrero para verano; marzo, abril y mayo para otoño; junio, julio y agosto para invierno y septiembre, octubre y noviembre en el caso de primavera.

Para poder realizar esta etapa del análisis, debido a la gran cantidad de información que se debía procesar, se desarrollaron programas de software específicos.

2.3.3 Correlación y análisis de regresión lineal

Se utilizaron análisis de correlación y regresión lineal (simple y múltiple) para evaluar la relación entre el material particulado (PM_{10}) medido en superficie, el espesor óptico de aerosoles obtenido con el algoritmo MAIAC (AOD_{MAIAC}), las variables meteorológicas (temperatura: T° , humedad relativa: HR, velocidad: Vel.Viento y dirección del viento: Dir.Viento) y la altura de la capa límite (CL). Las variables meteorológicas corresponden a aquellas medidas en la estación meteorológica

Observatorio, por su mayor cercanía al sitio de muestreo de PM_{10} . En cambio, la base de datos de CL corresponde a la estación meteorológica Aeropuerto, debido a que esta medición no se realiza en la estación Observatorio y se considera importante incluirla en el análisis. Se utilizó el mismo set de datos para los modelos con el objetivo de que sean comparables entre sí. El set de datos utilizado se obtuvo al eliminar los días con algún valor faltante para alguna de las variables consideradas en el modelo. Los valores de PM_{10} y de las variables meteorológicas corresponden a ± 60 minutos la hora de pasada del satélite Aqua. Las mediciones de CL corresponden a las 9 a.m., único momento del día en que esta variable es medida.

Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa R con un nivel de significancia de 0,05. Estos resultados son presentados en el Capítulo 6.

Capítulo 3

3. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL ALGORITMO MAIAC

En este capítulo se muestra la diferencia en términos de resolución espacial entre el producto AOD obtenido mediante el algoritmo MAIAC y el producto estándar de AOD de MODIS/Aqua (denominado MYD04) sobre la ciudad de Córdoba. Además se evalúa el desempeño del algoritmo MAIAC mediante la comparación de su producto AOD con mediciones en superficie de la estación CETT-Córdoba AERONET.

3.1 Resolución espacial: producto de MODIS estándar vs producto obtenido con MAIAC

El producto estándar AOD de MODIS (MYD_04), a partir del sensor en la plataforma Aqua), que posee una resolución espacial de 10 km es frecuentemente utilizado en estudios que evalúan el comportamiento de aerosoles a escala regional y global en grandes áreas, (Glauber Lopes, 2012; Mao et al., 2014). También otros estudios han utilizado este producto para estimar y predecir las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en superficie (Lee et al., 2011; Kim et al., 2013; Yap y Hashim, 2013). Sin embargo, una resolución de 10 km no resulta adecuada para evaluar la distribución espacio-temporal de los aerosoles a escala urbana y tampoco para estudios de tipo epidemiológicos (Kloog et al, 2011 y 2012).

La implementación del algoritmo MAIAC genera un producto de AOD con mayor resolución espacial (1km) que permite evaluar la distribución de los aerosoles a menor escala, como la urbana.

En la Figura 13 se muestra el producto estándar de AOD (MYD_04) y el AOD_{MAIAC} para la ciudad de Córdoba con fecha y hora coincidentes. Es evidente que la resolución de 10 km no es suficiente para observar lo que ocurre dentro de la ciudad de Córdoba, que presenta una longitud aproximada de 30 km y sólo 3-4 píxeles del producto MYD_04 cubren el área de estudio. En cambio, el producto AOD-MAIAC permite evaluar la distribución de aerosoles atmosféricos con una mayor resolución espacial.

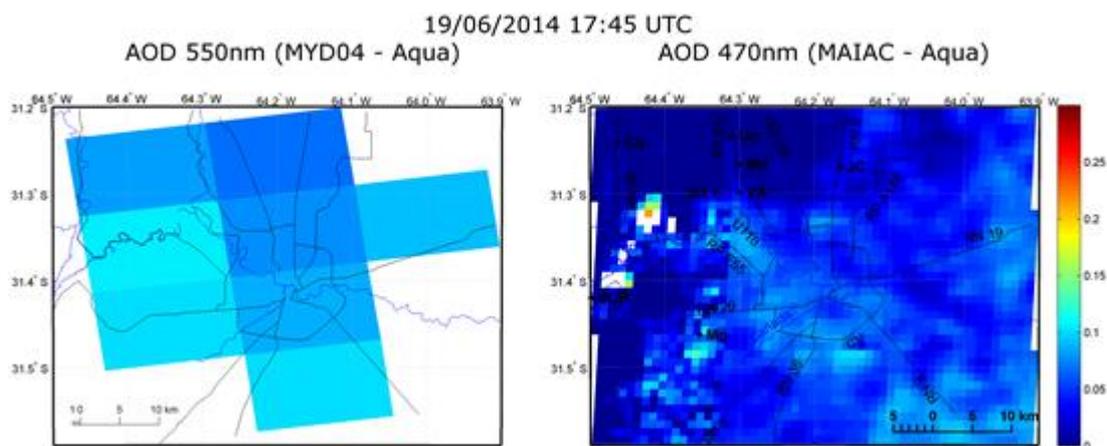


Figura 13. Producto MYD_04 (izquierda) y AOD-MAIAC (derecha) para el día 19/06/2004 sobre la ciudad de Córdoba.

3.2 Espesor óptico de aerosoles: comparación de AOD_{MAIAC} y $AOD_{AERONET}$.

Una de las formas más utilizadas en trabajos previos para evaluar el desempeño de los productos satelitales de AOD, es su comparación con mediciones realizadas en las estaciones AERONET distribuidas en el mundo (Remer et al., 2005).

Para nuestra área de estudio, los valores de AOD de AERONET disponibles corresponden a la estación Córdoba-CETT ($AOD_{AERONET}$). Se observa una marcada variación durante el día en los valores de $AOD_{AERONET}$ debido a la influencia que ejercen algunas variables meteorológicas sobre este parámetro. En la Figura 14, a modo de ejemplo, se puede apreciar la variación horaria del $AOD_{AERONET}$ medido en la estación Córdoba-CETT para los meses de abril y octubre de 2004. Entre las variables que pueden modificar los valores de este parámetro podemos mencionar la radiación, que favorece la producción de aerosoles secundarios; la dirección e intensidad de los vientos, responsables del transporte de aerosoles desde fuentes locales y regionales y la temperatura, que define la altura de la capa límite y de esta forma afecta el patrón de distribución de los aerosoles en la columna atmosférica. Por ello, con el objetivo de ajustar la comparación entre estimaciones de AOD obtenido con el algoritmo MAIAC (AOD_{MAIAC}) con valores de $AOD_{AERONET}$, se seleccionaron las mediciones de la red AERONET correspondientes a ± 60 min la hora de pasada del satélite AQUA y a la longitud de onda (λ) más cercana disponible en la base de datos, que corresponde a $\lambda=440$ nm (ver sección 2.3).

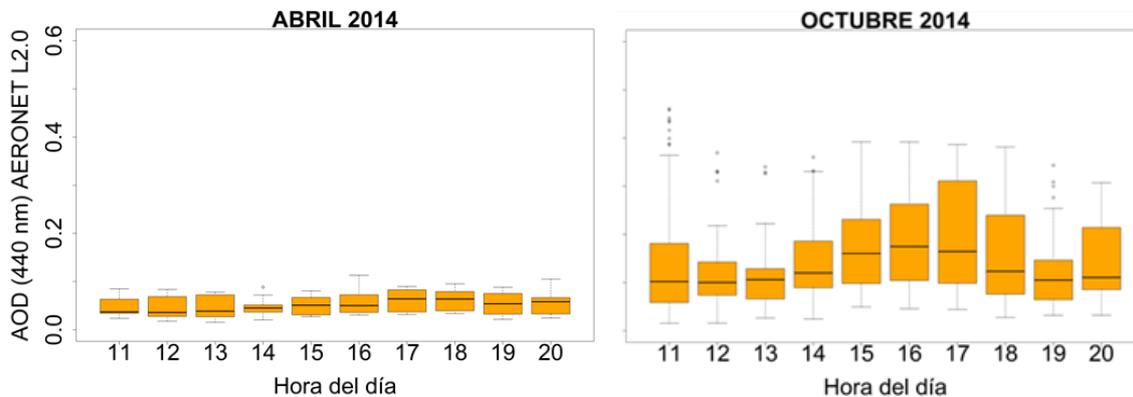


Figura 14. Variabilidad horaria de AOD medido desde superficie en la estación Córdoba-CETT de la red AERONET para abril y octubre de 2004.

Con estos datos se realizó un análisis de regresión lineal, obteniéndose un buen acuerdo entre los valores de AOD_{MAIAC} y $AOD_{AERONET}$, con un coeficiente de correlación de Pearson de 0,71. Tal como se describió en la sección 2.3, la relación $AOD_{MAIAC} - AOD_{AERONET}$ se ajustó en un modelo lineal: $AOD_{MAIAC} = 0.68 AOD_{AERONET} + 0,05$ (Figura 15), con un aceptable coeficiente de determinación ajustado ($R^2=0,51$) a un nivel de significancia del 95%, indicando un buen desempeño del producto en el área de estudio.

De la misma forma se evaluó la relación $AOD_{MAIAC} - AOD_{AERONET}$ en distintos períodos del año: verano (diciembre-marzo), otoño-invierno (abril-julio) y primavera. Se obtuvieron valores de coeficiente de correlación de Pearson de 0,79 (verano), 0,73 (primavera) y 0,67 (otoño-invierno). La gráfica de dispersión y el resultado del modelo lineal para cada período del año considerado se muestra en la Figura 16. Los resultados obtenidos muestran un mejor desempeño del algoritmo MAIAC durante los meses de verano (diciembre-marzo) y primavera (agosto-noviembre) respecto de los meses de otoño-invierno (abril-julio). Se obtuvieron coeficientes de determinación ajustado del modelo lineal correspondiente de 0,62 (verano), 0,44 (invierno) y 0,53 (primavera).

Al analizar la variación mensual $AOD_{MAIAC} - AOD_{AERONET}$ para el período 2003-2010, se observan valores AOD_{MAIAC} relativamente mayores durante los meses de abril y julio y menores durante agosto-septiembre respecto al $AOD_{AERONET}$ (Figura 17). Sin embargo, estas diferencias entre los valores mensuales no resultaron significativas al ser evaluadas mediante Kruskal-Wallis (ver sección 2.3). Estos resultados son similares a los reportados para otras plataformas satelitales en otras regiones del mundo (Yang et al., 2010; More et

al., 2013).

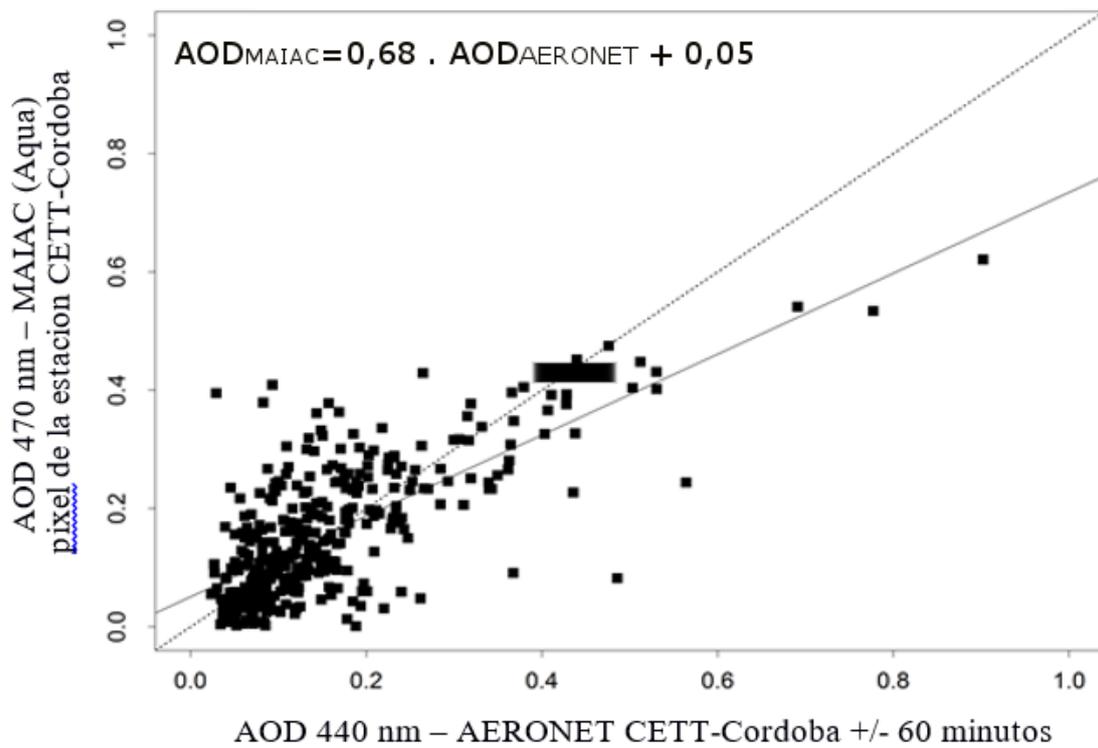


Figura 15. Relación lineal entre AOD-MAIAC el AOD medido en la estación CETT-Córdoba (AERONET) para el período 2003-2010 (línea punteada: $y=x$).

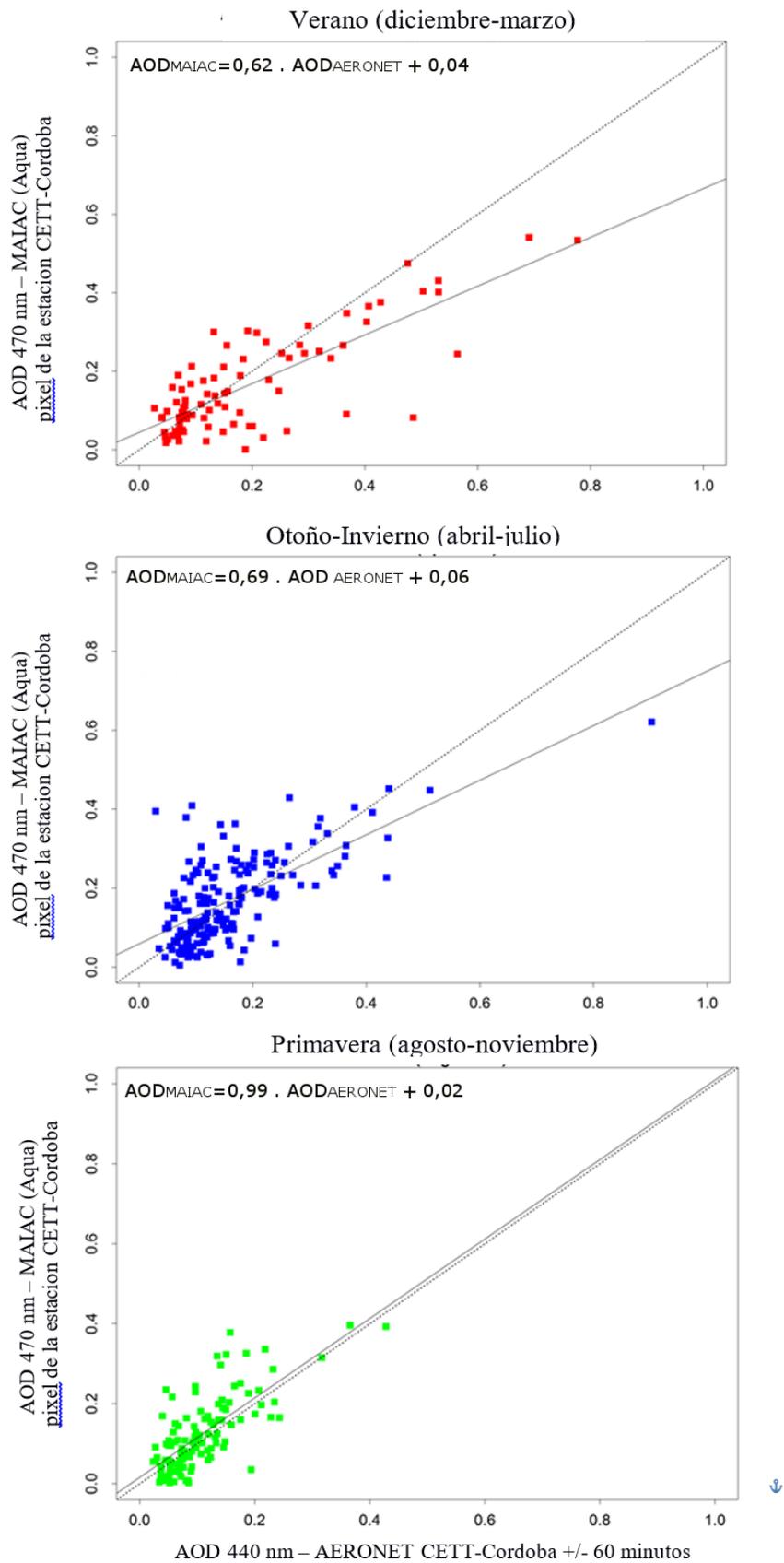


Figura 16. Relación lineal entre AOD-MAIAC el AOD medido en la estación CETT-Córdoba (AERONET) para las distintas estaciones del año en el período 2003-2010 (línea punteada: $y=x$).

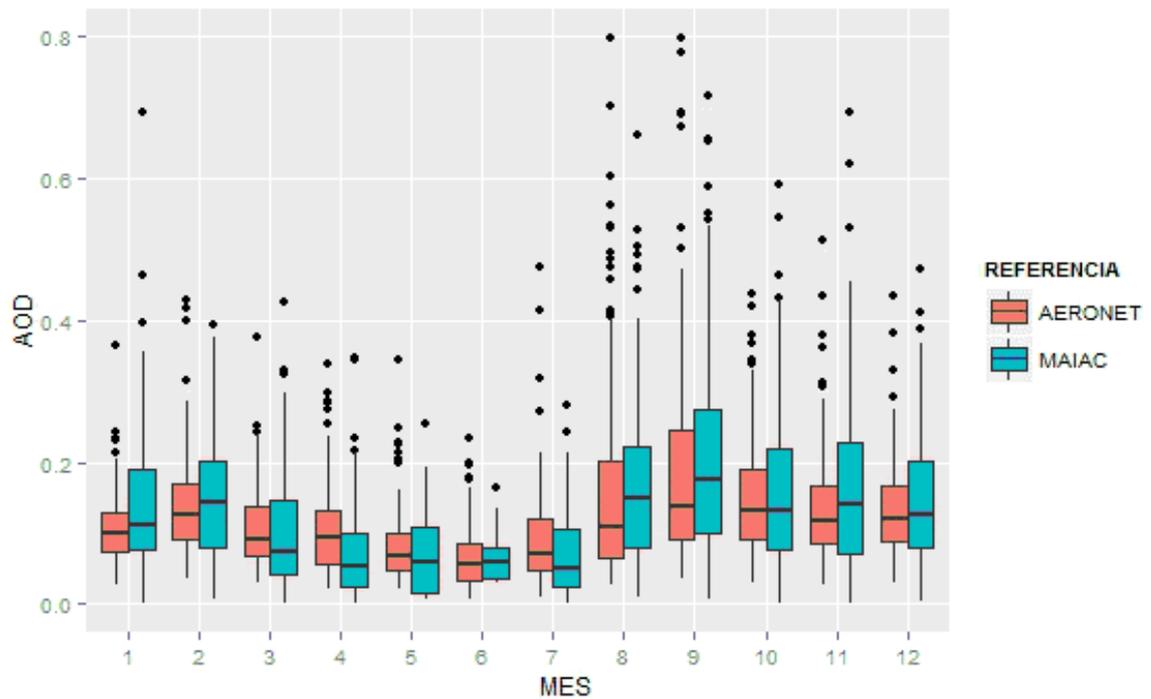


Figura 17. Variación mensual AOD de AERONET vs MAIAC para el período 2003-2010.

A modo de resumen, el algoritmo MAIAC presentó un buen desempeño en el área de estudio. Se observaron algunas diferencias respecto a la época del año: mejor desempeño en verano respecto de primavera y otoño-invierno. Por otro lado y considerando la variabilidad mensual, si bien se observan algunos meses con sobreestimación del AOD (agosto-septiembre) o subestimación de los valores obtenidos desde la estación AERONET (abril-julio), estas diferencias no resultaron significativas. El hecho que no se observaran diferencias significativas entre valores mensuales de AOD_{MAIAC} y $AOD_{AERONET}$ evidencia el buen desempeño en general del algoritmo MAIAC, con algunas diferencias estacionales. De esta forma, la implementación del algoritmo MAIAC y el consecuente aumento en la resolución espacial del producto de AOD, respecto de los productos satelitales disponibles hasta el momento, presenta un significativo potencial para mejorar el monitoreo de la calidad del aire en escalas urbanas y regionales.

Capítulo 4

4. VARIACIÓN ANUAL DE LA DISTRIBUCIÓN DE AEROSOLES

4.1 Análisis anual de AOD para el área de estudio

En la Figura 18 se presentan los valores de media anuales de AOD-MAIAC. Entre los años 2003-2006 el promedio anual de AOD-MAIAC presenta valores en el rango 0,02-0,18. Los valores más elevados de AOD se encuentran predominantemente al norte y nor-oeste de la ciudad, en áreas cercanas a una de las principales vías de circulación de tránsito: circunvalación (CV) y el camino hacia las Sierras Chicas (rutas provinciales U110-Av. Ricardo Rojas y 57, a la altura de circunvalación). Durante este período se observa un incipiente incremento del AOD en el área de estudio. Además, es evidente la disminución del AOD fuera de los límites del área urbana, en la parte externa del anillo de Circunvalación que rodea la ciudad. En el área rural y el valle de Punilla (entre Carlos Paz y Cosquín) se observan valores de AOD más bajos respecto a la zona urbana de la ciudad de Córdoba pero más elevados que en áreas más alejadas de las sierras.

En el año 2007 el AOD-MAIAC presenta un incremento generalizado con valores en el rango 0,05-0,23. El patrón de distribución de los aerosoles es similar al de años anteriores, con los valores más bajos en el área de las sierras. Este incremento muy marcado en el promedio anual de AOD durante el año 2007 se debe a los valores muy altos observados durante septiembre de ese año, relacionados con la ocurrencia de un gran número de incendios forestales en la provincia de Córdoba. Este evento será analizado con detalle en el Capítulo 5.

Entre los años 2008-2013 también se observan valores de AOD-MAIAC incrementados respecto del período 2003-2006, en el rango 0,02-0,23. Sin embargo, a diferencia de lo observado en el año 2007, no se observa la misma tendencia en toda el área de estudio. Los valores más elevados se observan en toda la circunferencia que corresponde al anillo de Circunvalación, evidenciando el aporte del tráfico a la carga de aerosoles atmosféricos. También durante este período se observa un incremento del AOD dentro de la ciudad de Córdoba, respecto del período 2003-2006, principalmente en la franja norte y oeste.

AOD (470 nm) MAIAC (Aqua) - Media aritmética

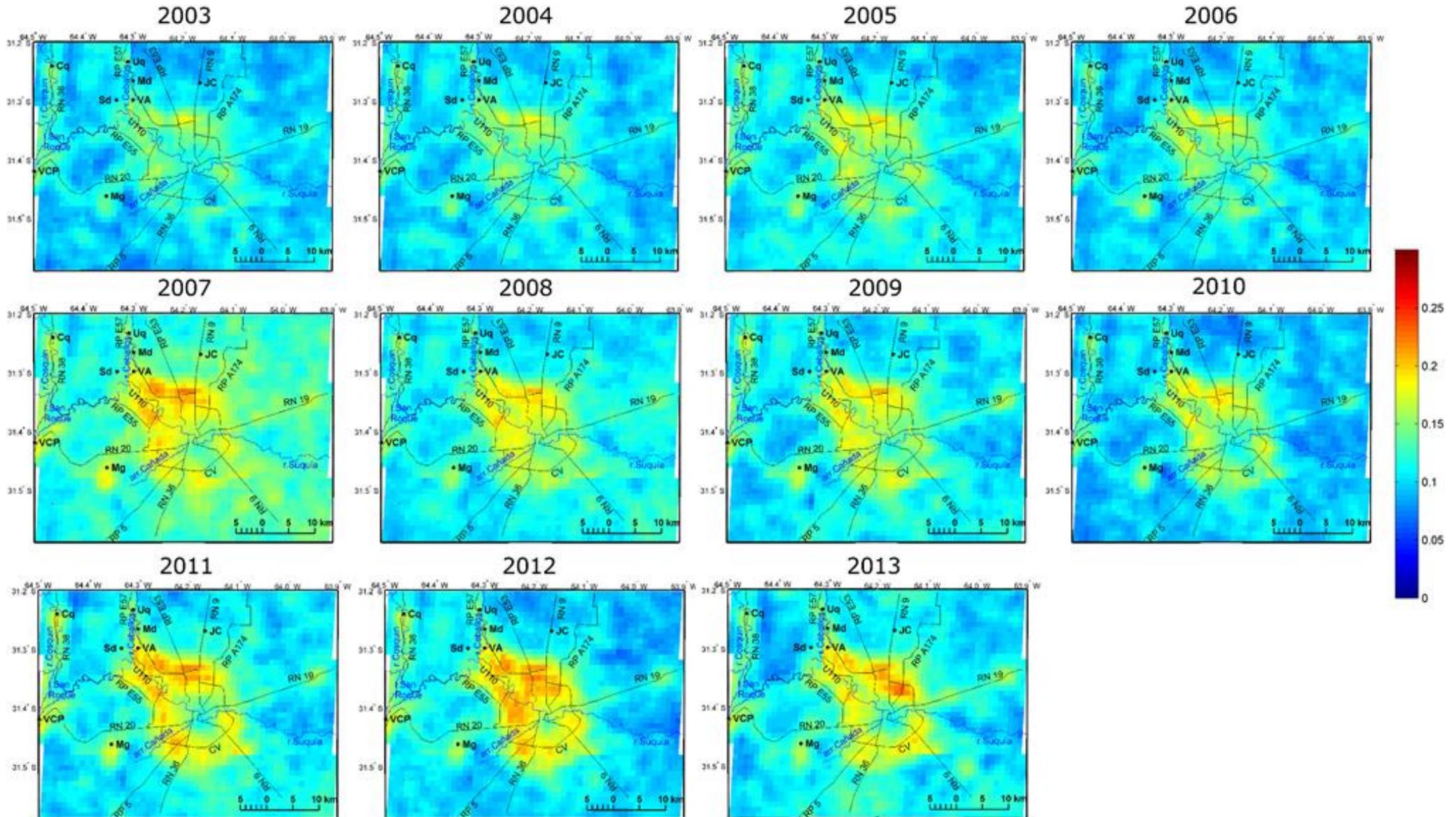


Figura 18. Media aritmética de AOD-MAIAC (447 nm) para los años 2003-2013 en la ciudad de Córdoba y alrededores (Mg: Malagueño, VCP: Villa Carlos Paz, Cq: Cosquín, Un: Unquillo, Md: Mendiolaza, VA: Villa Allende, JC: Juárez Celman, Sd: Saldán).

AOD (470 nm) MAIAC (Aqua) - Coeficiente de variación

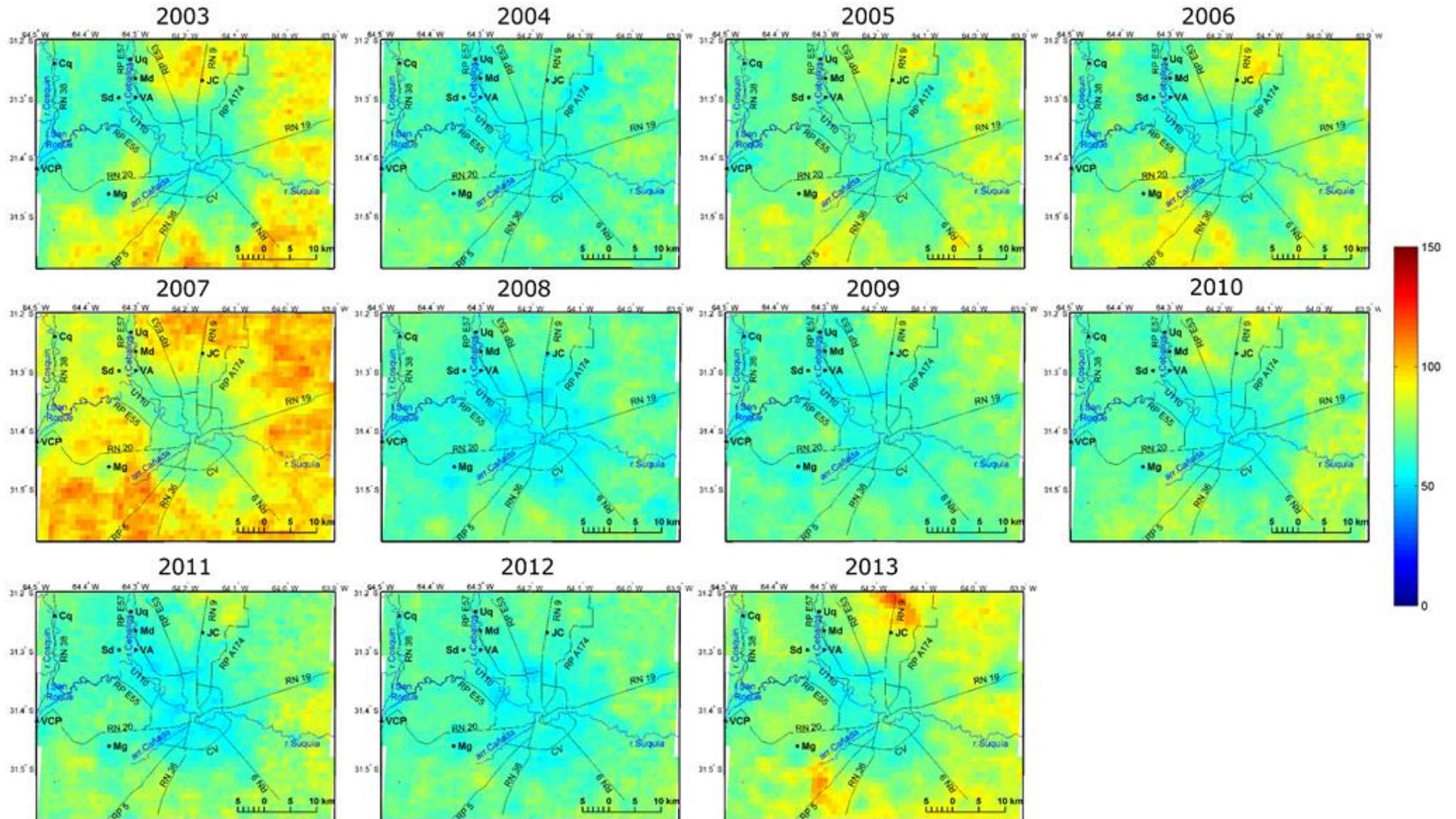


Figura 19. Coeficiente de variación ($\sigma/\bar{x} * 100$) de AOD-MAIAC (470 nm) para los años 2003-2013 en la ciudad de Córdoba y alrededores (Mg: Malagueño, VCP: Villa Carlos Paz, Cq: Cosquín, Un: Unquillo, Md: Mendiolaza, VA: Villa Allende, JC: Juárez Celman, Sd: Saldán).

Para analizar la dispersión de los valores medios anuales, se calculó el *coeficiente de variación* (Coef.Var.=desvío estándar/ media * 100) que expresa la desviación estándar como porcentaje de la media aritmética. De esta manera, mejora la interpretación de la variabilidad de los datos ya que presenta menor influencia de los valores extremos (Figura 19). Los resultados obtenidos muestran, en general, desvíos entre el 50-100 % respecto a la media aritmética en el área de estudio. Se observó un mayor porcentaje de variabilidad en áreas rurales, correspondientes a zonas cultivadas o zonas de bosque serrano. Durante 2003 y 2007 la variabilidad fue mayor, con algunas áreas que presentaron valores de hasta 125 % en la zona rural. Los resultados obtenidos a partir del coeficiente de variación evidencian la variabilidad intra-anual de los valores de AOD que será analizada en el próximo Capítulo.

Para estudiar la tendencia creciente observada en los valores de AOD y analizar la posible influencia de diferentes usos de la tierra en el área de estudio, se calcularon los promedios anuales de AOD para cada una de estas áreas, tomando un sitio representativo de las zonas de sierras y rural y discriminando los distintos centros urbanos dentro del área de estudio según los ejidos urbanos (Instituto Geográfico Nacional de Argentina, IGN) (Fig. 20). Los resultados se presentan en la Figura 21.

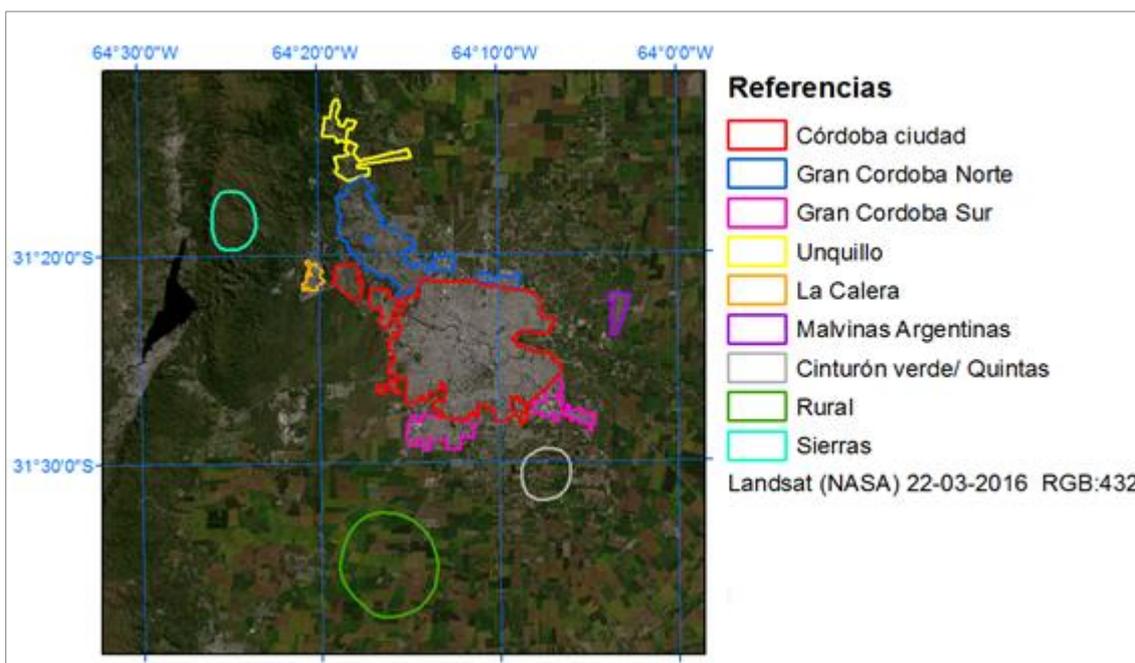


Figura 20. Zonas urbanas, sierras, rural y de quintas tenidas en cuenta para el análisis anual.

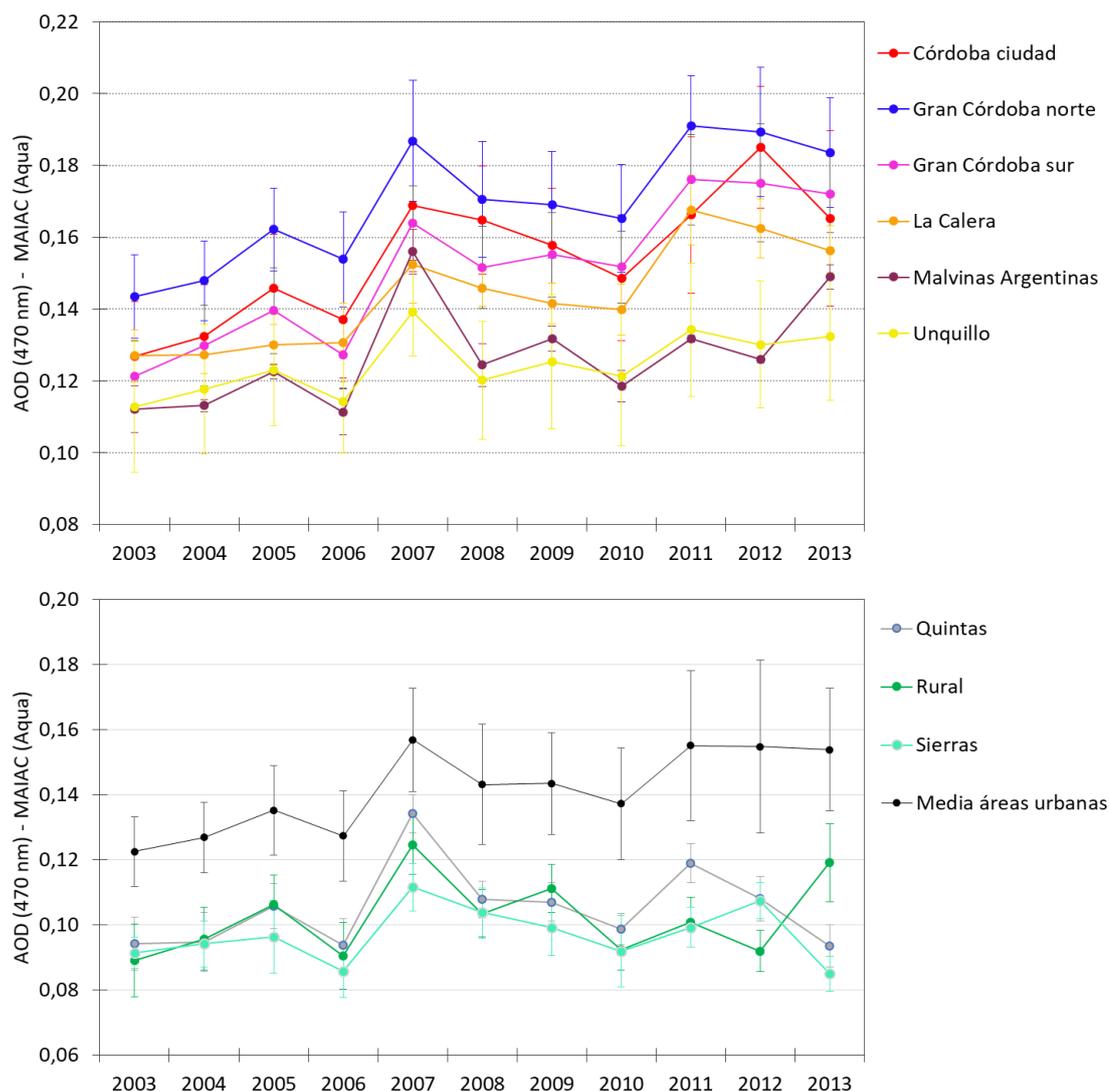


Figura 21. Variación anual de AOD-MAIAC para las zonas indicadas en Figura 20.

En general, en las zonas que corresponden a áreas urbanas (Figura 21- superior) se observa un incremento en los valores medio anuales de AOD. En contraste, en las zonas que corresponden a sierras, zonas rurales o cinturón verde/quintas se observan valores más elevados en algunos años respecto de otros pero no se evidencia una clara tendencia de incremento de AOD en el período estudiado (Figura 21 - inferior). En todas las zonas se observa un gran incremento de AOD durante el año 2007.

Tal como se analizará en el siguiente capítulo, la mayoría de los incendios en la provincia de Córdoba, y en general en Sudamérica, ocurren en el mes de septiembre. Por este motivo y con el fin de analizar la tendencia temporal en los niveles de aerosoles en la atmosfera se calcularon los valores promedio anual para cada zona excluyendo el mes de septiembre. (Figura 22). Si bien durante los años 2006, 2010 y 2013 se observa un

valor medio anual de AOD inferior al año precedente, la tendencia de incremento de AOD a lo largo del período de estudio sigue siendo evidente en todas las zonas urbanas analizadas.

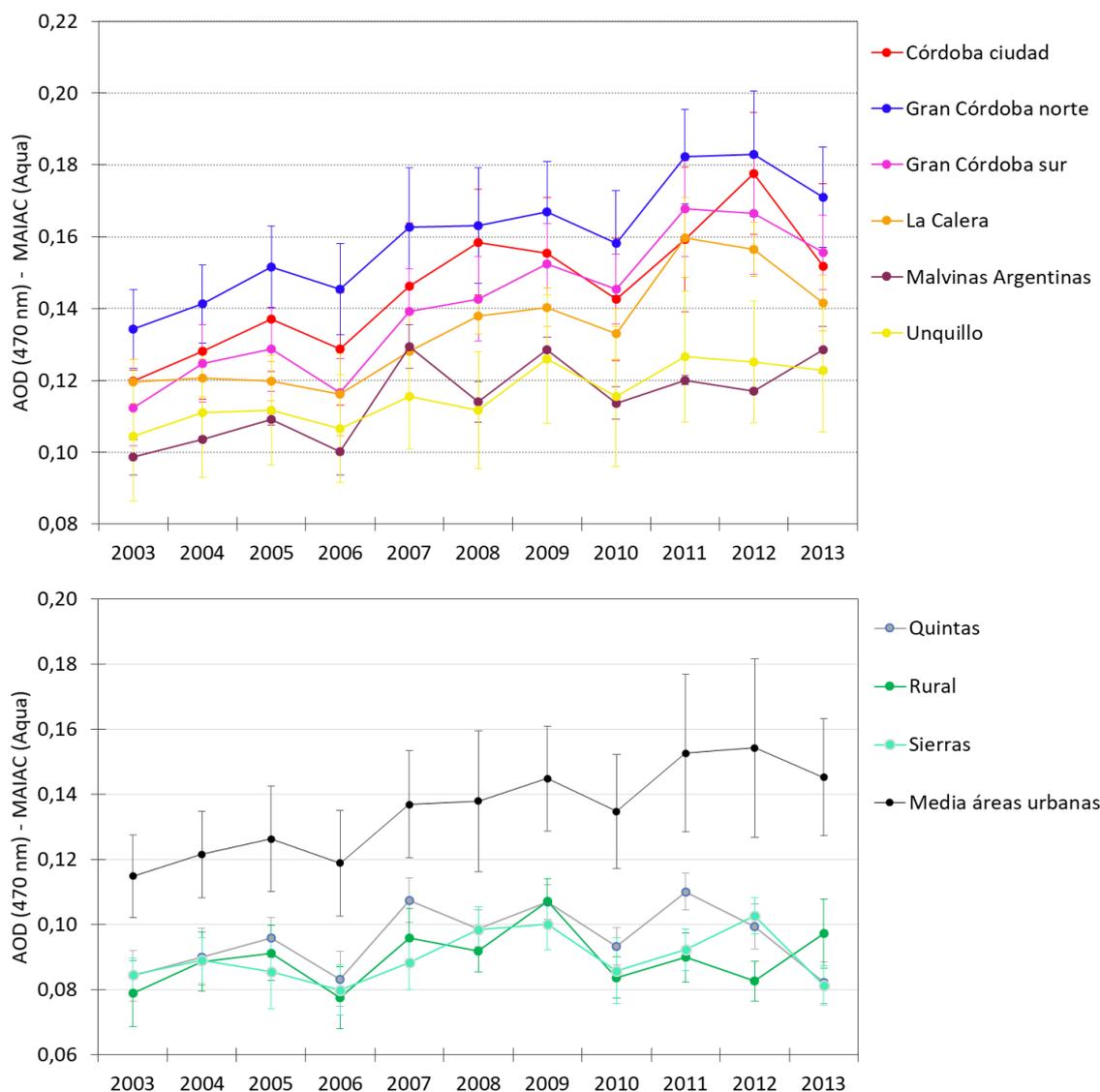


Figura 22. Variación anual de AOD-MAIAC para las zonas indicadas en Figura 20, excluyendo el mes de septiembre de la media aritmética.

El análisis del valor medio de AOD según el día de la semana para el mes de marzo en el período 2003-2006 muestra valores más elevados durante los días hábiles (lunes a viernes), en los cuales hay mayor circulación vehicular, respecto de los sábados y domingos. Si bien estas diferencias no resultaron significativas, esta tendencia indica la posible incidencia del aporte del tránsito en el incremento de esta variable (Figura 23), tal

como ha sido reportado para otras ciudades del mundo (Baumer et al., 2008, Xia et al., 2008)

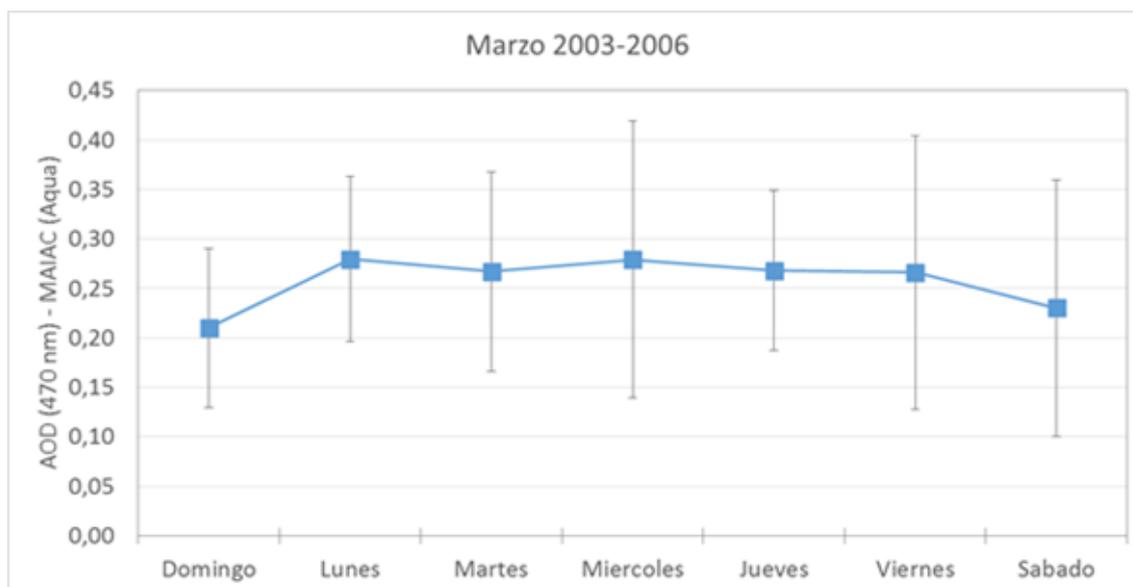


Figura 23. Variación semanal del AOD en el centro de la ciudad de Córdoba (valor medio de 25x25 pixeles cubriendo el ejido urbano, las barras corresponden a (valor medio – desvío estándar) y (valor medio + desvío estándar)) para el mes de marzo en el período 2000-2006.

Los valores promedio de AOD hallados en este estudio son bajos respecto a los reportados para sitios con grandes problemas de contaminación atmosférica de partículas como por ejemplo China e India que reportan valores de AOD en el rango 0.5-0.69 y 0.15-0.6, respectivamente (Xin et al., 2007; Di Girolamo et al., 2004). Sin embargo, es notable el incremento del 20-40% en los valores de AOD en Córdoba capital y sus alrededores en el período 2003-2013, lo que indica una clara tendencia de aumento de la carga de aerosoles a la atmósfera principalmente en las áreas urbanas.

Un estudio realizado previamente en la ciudad de Córdoba sobre composición y concentración de material particulado concluye que los mayores contribuyentes de material particulado fino son las emisiones provenientes del tráfico vehicular y material proveniente de la construcción de caminos (López et al., 2011). En el caso de la zona que corresponde al acceso a Sierras Chicas (zona Córdoba nor-oeste y Gran Córdoba Norte),

el incremento observado podría estar relacionado al gran crecimiento poblacional y desarrollo urbano de las localidades ubicadas hacia el norte y noroeste de la ciudad (Villa Allende, Mendiolaza, Unquillo, Río Ceballos, Salsipuedes, Saldán) entre 2001-2010 y el consecuente aumento del tránsito que circula hacia y desde la ciudad de Córdoba. Según información proporcionada por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC), la población en algunas localidades de Sierras Chicas se ha incrementado hasta un 145% entre 2001-2010 (Tabla 5). Otra posible fuente de material particulado en la zona, es la obra de ampliación de la RP U110 (de 1 a 3 carriles), que comenzó a principios de 2011 e incluyó además tareas de demolición y remoción de escombros. Por otro lado, en 2011 se habilitó un tramo nuevo de la Av. Circunvalación que conectó el acceso a la ruta E53 con el acceso denominado Mujer Urbana, donde confluyen importantes avenidas como Recta Martinoli, Rafael Núñez, Pedro Laplace y Circunvalación, todas con un alto nivel diario de tránsito.

Tabla 5. *Crecimiento poblacional en localidades de las Sierras Chicas y ciudad de Córdoba, para los años 2001 y 2010 (INDEC).*

Localidad	Censo 2001 (hab.)	Censo 2010 (hab.)	% crecimiento
Córdoba capital	1.284.582	1.329.604	3,5
Unquillo	15.369	18.483	20
Río Ceballos	16.632	20.242	21
La Calera	24.796	32.227	30
Mendiolaza	4.202	10.271	144

Por otro lado, según datos oficiales de la Municipalidad de Córdoba, el parque automotor en la ciudad ha experimentado un crecimiento de 92% entre los años 2002-2012 (Figura 24; Fuente: Secretaría de Economía y Finanzas, Municipalidad de Córdoba en Municipalidad de Córdoba, 2012). La antigüedad de los vehículos es un factor importante a la hora de evaluar la emisión de contaminantes a la atmósfera por parte del parque automotor; otros factores son: tamaño del motor, el sistema de control de emisiones y el tipo de combustible consumido (Korc et al., 2000). Si bien las tecnologías empleadas actualmente en la fabricación de automóviles hacen que éstos emitan cada vez menos sustancias peligrosas, el 33% del parque automotor de la ciudad de Córdoba presenta una antigüedad superior a 10 años en 2012 (Figura 25).

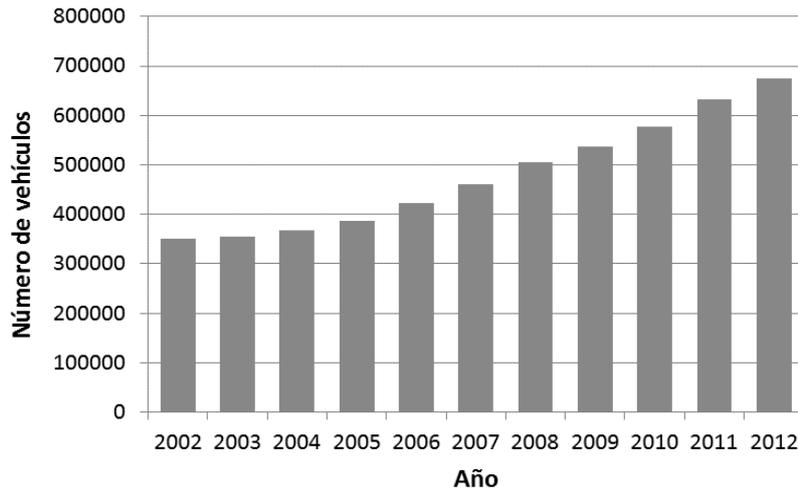


Figura 24. Evolución del parque automotor en la ciudad de Córdoba. Fuente: Secretaría de Economía y Finanzas, Municipalidad de Córdoba en Municipalidad de Córdoba, 2012.

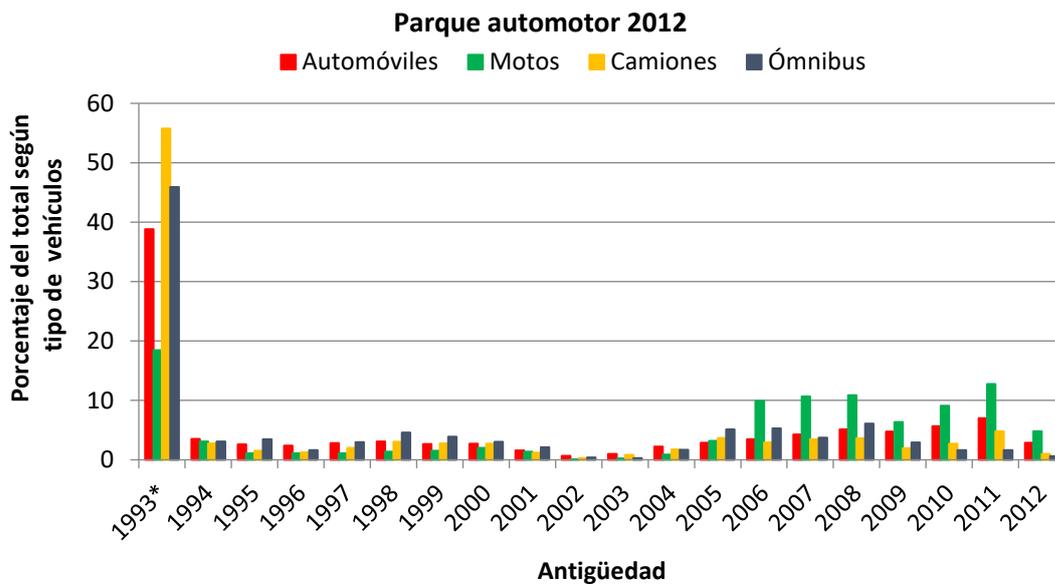


Figura 25. Antigüedad del parque automotor en la ciudad de Córdoba según tipo de vehículo en el año 2012 (1993*: 1993 y años anteriores). Fuente: Secretaría de Economía y Finanzas, Municipalidad de Córdoba en Municipalidad de Córdoba, 2012.

Los resultados presentados en este capítulo muestran una clara tendencia de incremento de los aerosoles atmosféricos en la ciudad de Córdoba a lo largo del tiempo, principalmente en las áreas urbanas. En general, el patrón de distribución de los aerosoles atmosféricos en el área de estudio presenta los valores más elevados de AOD en cercanías a las grandes vías de circulación de tránsito (p. ej. Avenida Circunvalación), lo cual evidencia la importancia de la circulación vehicular como fuente de aerosoles

atmosféricos. Asimismo, se observó cierta tendencia a un incremento del AOD durante los días hábiles, en los cuales el tránsito vehicular es mayor, respecto de sábados y domingos en los cuales el tránsito desciende. De esta manera, el incremento del AOD observado en la zona que corresponde al acceso a Sierras Chicas podría estar vinculado al gran incremento poblacional en las localidades de Sierras Chicas y su consecuente aumento de la circulación de vehículos hacia y desde esta zona. Por otro lado, cabe destacar que el parque automotor de la ciudad de Córdoba se ha duplicado en el período de estudio.

Capítulo 5

5. VARIACIÓN ESTACIONAL Y MENSUAL DE LA DISTRIBUCIÓN DE AEROSOLES ATMOSFÉRICOS

5.1 Análisis estacional y mensual de la distribución de aerosoles

En la Figura 26 se presentan los valores de media aritmética y coeficiente de variación de AOD-MAIAC correspondiente a todo el período de estudio para cada estación del año. Además, para realizar un análisis más exhaustivo de la variación intra-anual de los aerosoles se realizaron las medias aritméticas y coeficiente de variación mensuales de AOD (Figuras 27 y 28).

Durante el período estival (diciembre - marzo) el AOD presenta valores en el rango 0,02-0,24; los valores más elevados se observan en las zonas urbanas, particularmente en el área norte y oeste de la ciudad de Córdoba, y en las cercanías de las principales rutas del área de estudio. Se observan además valores más elevados en los alrededores del lago San Roque y en todo el Valle de Punilla en general (Villa Carlos Paz a Cosquín, RN 38). El coeficiente de variación muestra una mayor desviación de los valores en el área rural (40-60%) respecto del área de Sierras y áreas urbanas (<30%).

El análisis de las medias mensuales de los meses que componen el verano (diciembre-marzo), muestra cierta variabilidad en la distribución de aerosoles, siendo enero y febrero los meses con mayor similitud (Figura 27). Los valores más elevados de AOD concentrados en las cercanías de las principales vías de circulación y en el área del Valle de Punilla podrían estar vinculados al aporte de aerosoles del tránsito, que se incrementa en esta época debido al turismo. De hecho la provincia de Córdoba recibe un 20% del turismo total del país, siendo enero y febrero los meses de mayor afluencia de turistas. Por otro lado, durante esta época del año, debido a las altas temperaturas, mayor radiación solar incidente y consecuentemente mayor actividad fotoquímica, se favorece la formación de aerosoles de origen secundario, que pueden contribuir hasta un 30% al total de aerosoles atmosféricos en áreas urbanas (Ma y Birmili, 2015). El incremento observado en el AOD durante esta estación del año podría deberse en gran medida al incremento de aerosoles atmosféricos de origen secundario. A partir de marzo, cuando

AOD (470 nm) - MAIAC (Aqua) Estacional: período 2003-2013

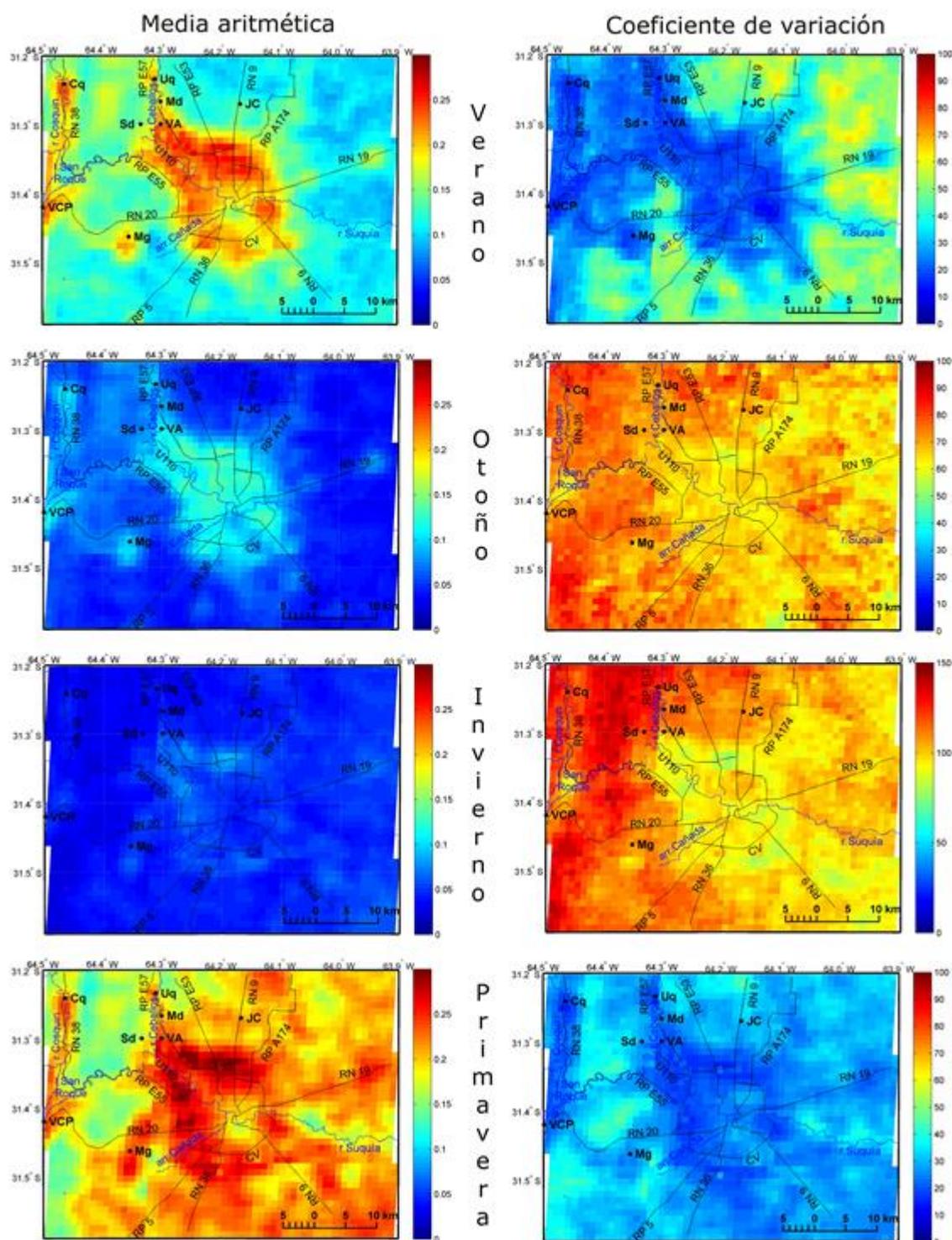


Figura 26. Media Aritmética (izquierda) y coeficiente de variación¹(derecha) de AOD-MAIAC para cada estación del año para el período 2003-2013 en la ciudad de Córdoba y alrededores (Mg: Malagueño, VCP: Villa Carlos Paz, Cq: Cosquín, Un: Unquillo, Md: Mendiolaza, VA: Villa Allende, JC: Juárez Celman, Sd: Saldán).

¹ Nótese el cambio de escala en el coeficiente de variación para invierno

comienza el otoño, se observa una disminución de los valores de AOD tanto en las áreas urbanas como en el Valle de Punilla, el área rural y de sierras con valores en el rango 0,02-0,22; posiblemente relacionado a la reducción en la afluencia turística y menor temperatura y radiación que resultan en la disminución de la producción secundaria de aerosoles.

A pesar de este notable descenso respecto a los valores de enero y febrero, continúan observándose valores de AOD elevados ($\sim 0,2$) en el área urbana y en las áreas correspondientes a las principales vías de circulación, en particular en el anillo de circunvalación.

Durante el otoño (marzo- mayo) se observa una caída de los valores de AOD, con valores en el rango 0,01-0,13 en las áreas urbanas y alrededor de las principales vías de circulación; y valores muy bajos ($< 0,1$) en las áreas correspondientes a las Sierras y rurales (Figura 26). A diferencia de lo observado durante el verano, los valores de AOD mostraron una alta desviación respecto a la media tanto en el área urbana ($> 60\%$) como en las áreas de sierras y rural ($> 80\%$). Lo mismo se observa durante invierno, los valores medios en esta estación son muy bajos (rango 0,01-0,12) y la desviación respecto a la media muy alta ($> 80\%$).

En la Figura 27 puede apreciarse que mayo, junio y julio corresponden a los meses con valores de AOD más bajos ($< 0,1$) y coeficiente de variación más alto de todo el año. En este período hay que tener en cuenta la subestimación de valores de AOD obtenidos con MAIAC respecto de los medidos por la estación AERONET, descrita en la sección 3.2, para los meses de invierno. En la Figura 29 se presentan estos mismos meses con otra escala de colores para poder apreciar mejor la distribución espacial del parámetro AOD. A pesar de que los valores de AOD observados en este período son muy bajos (rango: 0,01-0,04), se observa un patrón de distribución de los aerosoles similar en estos meses con valores levemente incrementados en el área rural y de sierras, y a su vez de mayor variabilidad, y valores más bajos en el área urbana.

En primavera se observa una distribución espacial de los aerosoles similar a la observada durante el verano, pero con mayor extensión de los valores elevados que ya no se concentran solo en las áreas urbanas y alrededor de las principales vías de circulación sino que además presentan una distribución más homogénea en el área rural (Figura 25). En todas las áreas se observa un gran incremento en los valores de AOD respecto al resto de las estaciones del año.

AOD (470 nm) MAIAC (Aqua) Media aritmética: período 2003-2013

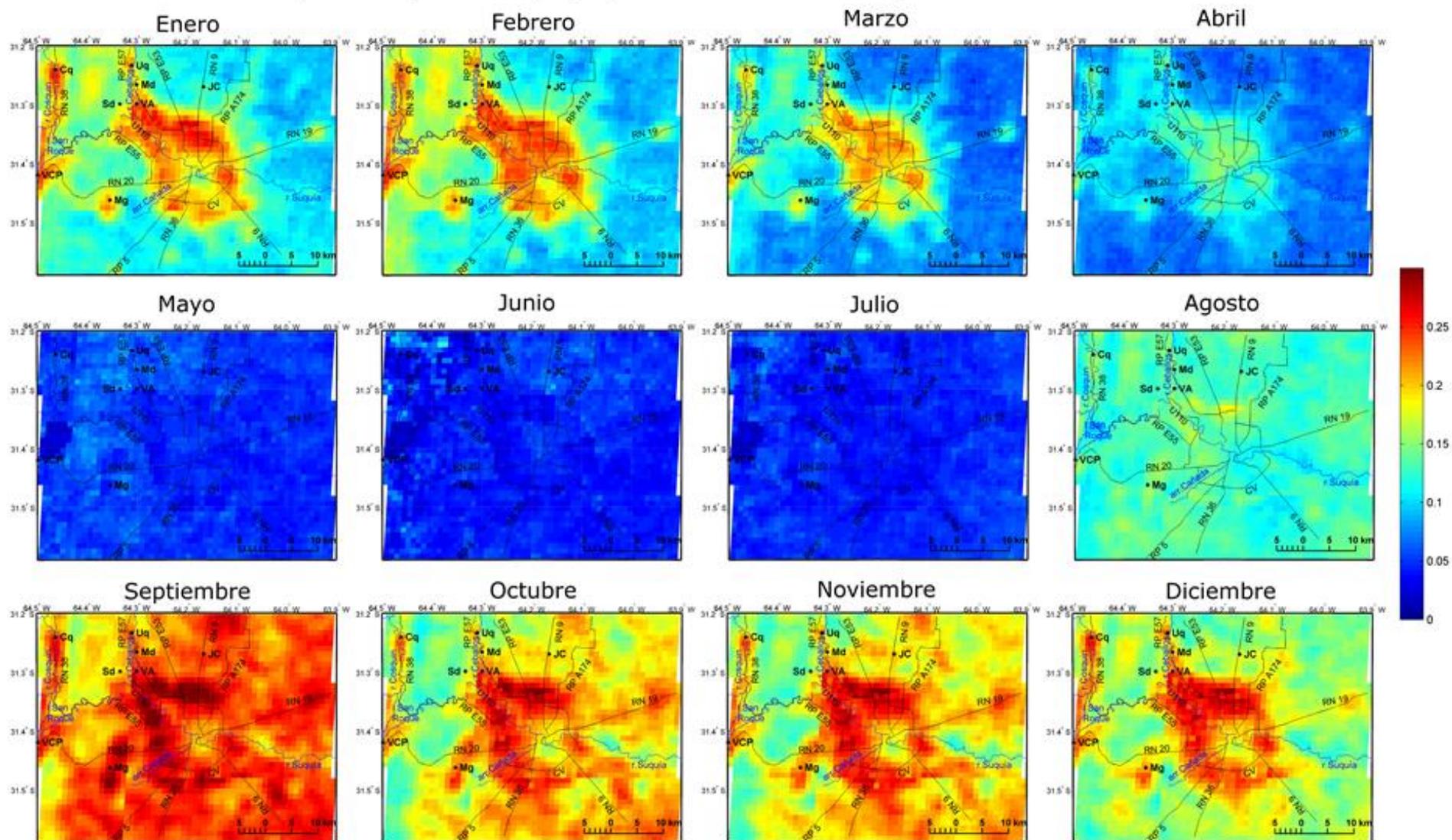


Figura 27. Media Aritmética de AOD-MAIAC (470 nm) para cada mes del año para el período 2003-2013 en la ciudad de Córdoba y alrededores (Mg: Malagueño, VCP: Villa Carlos Paz, Cq: Cosquín, Un: Unquillo, Md: Mendiolaza, VA: Villa Allende, JC: Juárez Celman, Sd: Saldán).

AOD (470 nm) MAIAC (Aqua) Coeficiente de variación: período 2003-2013

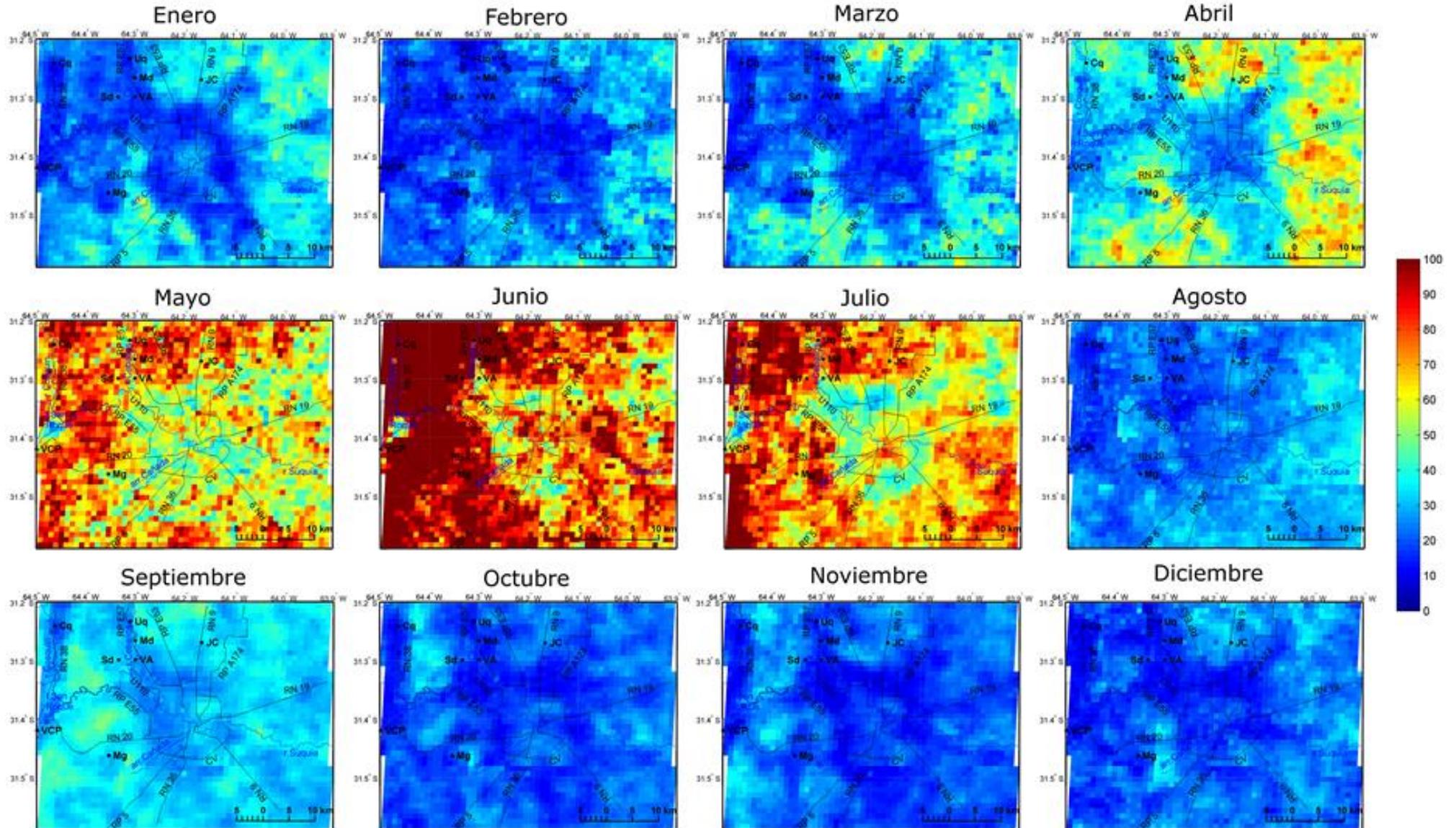


Figura 28. Coeficiente de variación ($\sigma/\bar{x} * 100$) de AOD-MAIAC (470 nm) para cada mes del año para el período 2003-2013 en la ciudad de Córdoba y alrededores (Mg: Malagueño, VCP: Villa Carlos Paz, Cq: Cosquín, Un: Unquillo, Md: Mendiolaza, VA: Villa Allende, JC: Juárez Celman, Sd: Saldán).

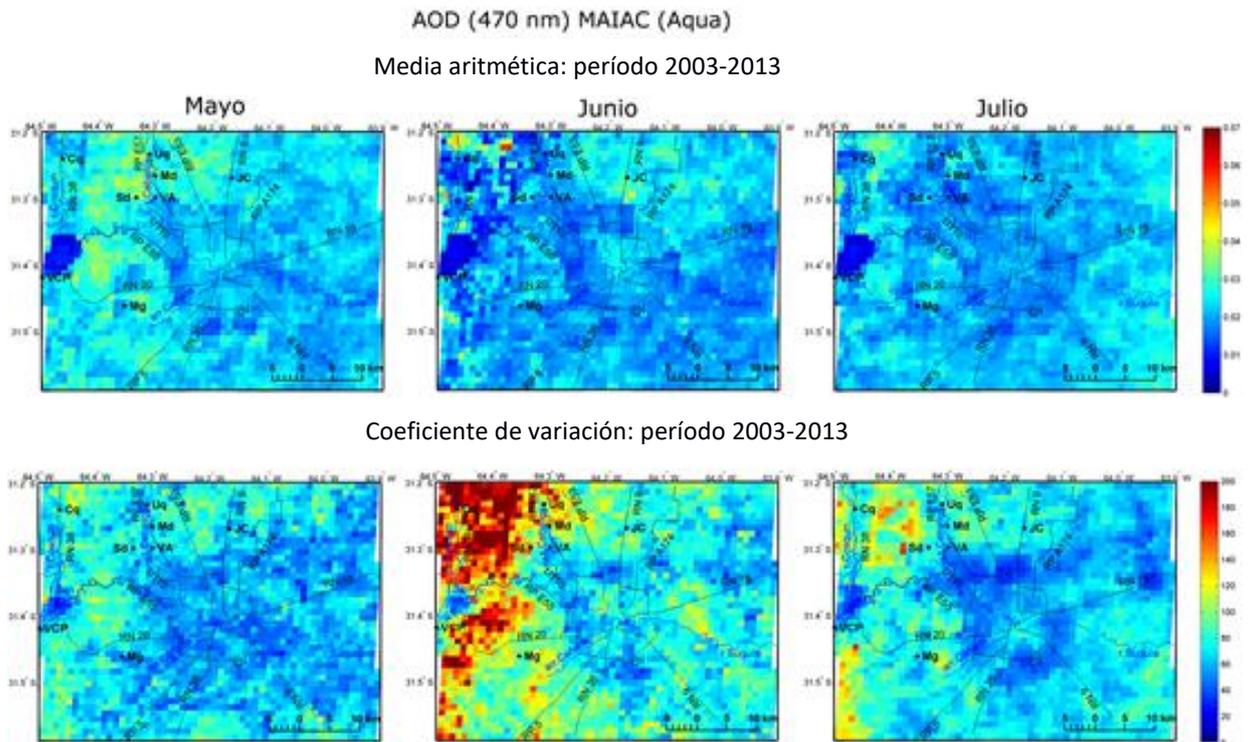


Figura 29. Media aritmética (arriba) y coeficiente de variación ($\sigma/\bar{x} * 100$, abajo) de AOD-MAIAC para mayo, junio y julio para el período 2003-2013 en la ciudad de Córdoba y alrededores (Mg: Malagueño, VCP: Villa Carlos Paz, Cq: Cosquín, Un: Unquillo, Md: Mendiolaza, VA: Villa Allende, JC: Juarez Celman, Sd: Saldán).

En particular, durante agosto se observa una distribución muy homogénea del AOD que presenta valores en el 0,07-0,18. En septiembre se observa un gran incremento del AOD en toda el área de estudio, con valores en el rango 0,14-0,21 en el área de las sierras y en el rango 0,18-0,42 en áreas urbanas y rurales. Este mes es el que presenta los valores más altos de AOD de todo el año y coincide con la época de mayor número de incendios forestales, tanto en la Provincia de Córdoba como en la mayor parte de Sudamérica (ver sección 5.2).

A partir de octubre se observa una disminución en la carga de aerosoles atmosféricos respecto a septiembre, pero aún elevados respecto a los demás meses del año, particularmente en el área rural. octubre y noviembre presentan valores en el rango 0.09-0.24. La menor frecuencia de incendios y el aumento en la intensidad y frecuencia de las precipitaciones (Figura 10) que comienzan a partir de este período del año podrían colaborar con la deposición húmeda del material particulado y el descenso en los valores de AOD respecto a septiembre. Respecto a la distribución espacial de los aerosoles durante estos meses, al igual que en verano, los valores más elevados se observan en la zona norte y oeste de la ciudad, en el acceso a Sierras Chicas y en el área circundante a

Circunvalación. En contraste con lo observado durante los meses de verano, en este período, las sierras presentan valores de AOD relativamente más bajos (máximo en verano 0,15; en oct-nov 0,13) y en el área rural se observan valores más elevados (máximo en verano 0,12; en oct-nov 0,19). Los valores más elevados en el área rural podrían estar vinculados a las actividades agrícolas que se desarrollan durante este período del año (p.ej. siembra de soja, principal actividad económica del área rural).

5.2 Focos de incendios en Córdoba y Sudamérica: estación de quema de biomasa.

La quema de biomasa es una de las principales fuentes de aerosoles atmosféricos en Latinoamérica (Castro-Videla et al., 2013; Freitas et al., 2005) los cuales representan una amenaza a la salud de la población, como ha sido demostrado por estudios realizados en distintas regiones del mundo (Harrison y Yin, 2000; De Sario et al., 2013, Kim et al., 2015). El aumento de la concentración de aerosoles en el corto plazo ha sido asociado con aumentos en la mortalidad por causas respiratorias y cardiovasculares (Anderson, 2005; Kan et al., 2012, OMS, 2005). Además, la quema de biomasa como práctica agrícola o durante incendios forestales, causa la irritación de ojos y vías respiratorias, provocando un aumento de ingresos hospitalarios (Naeher et al., 2007; Sigsgaard et al., 2015; Liu et al., 2015).

Tal como se describió en la sección 2.1, debido a las muy escasas precipitaciones que ocurren entre mayo-agosto, este período corresponde a la época más seca del año. A partir de agosto se observa además un descenso de la humedad relativa y un aumento en la frecuencia e intensidad de vientos, principalmente de dirección N-NO. Estas condiciones meteorológicas contribuyen a una mayor frecuencia de incendios forestales entre agosto y octubre tanto en la provincia de Córdoba como en el norte de Argentina. En otras regiones de Sudamérica, esta época del año también es conocida como *estación de quema de biomasa*, donde los incendios locales son una importante fuente de aerosoles atmosféricos en todo el continente Sudamericano. Más aún, la contribución de material proveniente de incendios ocurridos en regiones lejanas y transportados por los vientos puede ser comparable al aporte de los incendios locales (Castro-Videla et al., 2013). Así por ejemplo, se estima que durante la estación seca, debido al patrón de circulación continental típico, más del 30% del AOD en Paraguay y norte de Argentina proviene de los incendios de las regiones Amazonia y Cerrado de Brasil (Castro-Videla et al., 2013). La presencia de cenizas provenientes de la quema de biomasa en áreas cercanas y remotas

de Sudamérica podría explicar el gran incremento en los valores de AOD y la distribución homogénea de los aerosoles durante la primavera en el área de estudio.

Siguiendo la propuesta de Castro Videla et al. (2013) para el análisis de los focos de incendios a nivel regional algunos estudios definen cinco regiones dentro del continente sudamericano (Figura 30.a): la región de Venezuela-Colombia (área A), la región Amazonas-Cerrado (área B), la región este de Brasil-Caatinga (área C), la región de Paraguay-Argentina norte (área D1) y la región sur de Argentina (área D2). Estas regiones fueron definidas teniendo en cuenta el comportamiento típico estacional de los focos de calor, las diferencias en el uso del suelo sobre el continente y la elección hecha por estudios anteriores sobre el tema con el fin de facilitar la comparación con resultados disponibles en la bibliografía (Ichoku y Kaufman, 2005, Pereira et al., 2009).

El área A, correspondiente a Venezuela-Colombia, comprende todos los incendios producidos desde el ecuador hacia el norte del continente, más precisamente en la región de la selva de Guayana y la región de sabanas de los Llanos donde los agricultores utilizan el fuego como una forma de obtener pasturas frescas para su ganado y limpiar terrenos para cultivar (Armenteras et al., 2005). En esta área, a diferencia del resto, los incendios ocurren con mayor frecuencia en diciembre-mayo, coincidiendo con la estación seca del hemisferio norte.

El área B, correspondiente a Amazonia-Cerrado, incluye incendios producidos en la selva tropical de la Amazonía y en la sabana de la región Cerrado. El régimen de incendios está fuertemente relacionado con la estación seca en el hemisferio sur y presenta una mayor frecuencia en agosto-septiembre. En este área se utiliza el fuego como práctica para el desmonte de tierras para pastura, expansión de los cultivos y la tala de bosques (Aragao et al., 2008).

El área C, incluye los incendios producidos en los montes del este de la región Caatinga y noreste de la región del Cerrado, en Brasil. El régimen de incendios es similar al observado en el área B pero con una gran proporción de incendios en octubre-noviembre en el norte y noreste de Brasil, relacionado con un retraso en el inicio de la estación seca (Shaffer et al., 2008).

El área D1 incluye Paraguay y el norte de Argentina, en el que se encuentran el bosque chaqueño y parte de la llanura chacopampeana, con una estacionalidad similar a las del área B y C. En esta región el fuego ha sido utilizado para la expansión de los cultivos de soja y la cosecha de la caña de azúcar en la última década.

El área D2 incluye el centro y sur de Argentina. La estacionalidad en este área es similar a la observada en el área A debido a que los incendios en el área cordillerana de Patagonia ocurren principalmente durante los primeros meses del año, aunque en menor número y frecuencia que en el resto de las áreas.

Se utilizó el producto satelital *Locación Global y Mensual de Fuego* (Global Monthly Fire Location Product - MCD14ML) del sensor MODIS/Aqua (Giglio et al, 2003) para realizar el recuento del número de focos de calor en las distintas regiones de Sudamérica descriptas anteriormente. En la Figura 30.b se muestra la variación mensual del número de incendios para cada área del continente durante todo el periodo 2003-2013 y la Figura 30.c muestra el recuento de focos de incendio para cada mes del período de estudio.

El hecho de que el incremento en el número de incendios para las áreas B, C y fundamentalmente D1, sea durante los meses de septiembre, de manera coincidente con los valores máximos de AOD en el área de estudio (Figura 26), sugiere una importante contribución externa de aerosoles que son transportados largas distancias desde su fuente de emisión y llegan al área de estudio favorecidos por los vientos predominantes con dirección N- NO.

En la Figura 31 se muestra la variación mensual de AOD-MAIAC de cada año para las zonas indicadas en la Figura 20; para el área urbana se calculó un promedio.

Durante el año 2007 se observa un incremento de AOD en todas las zonas estudiadas (Figura 31) que coincide con los picos máximos del número de focos de incendio de las áreas B, C y D1. Si bien en el año 2010 también se observan valores elevados de focos de incendio en las áreas B y C, el AOD de las zonas estudiadas no se incrementa tanto como en el 2007 posiblemente debido a que el número de incendios en el área D1, la que contiene el área de estudio, resultó uno de los más bajos del período.

El mismo patrón de estacionalidad del AOD, así como el pico de AOD en septiembre de 2007, es reportado por otros sensores en distintos satélites (Figura 32).

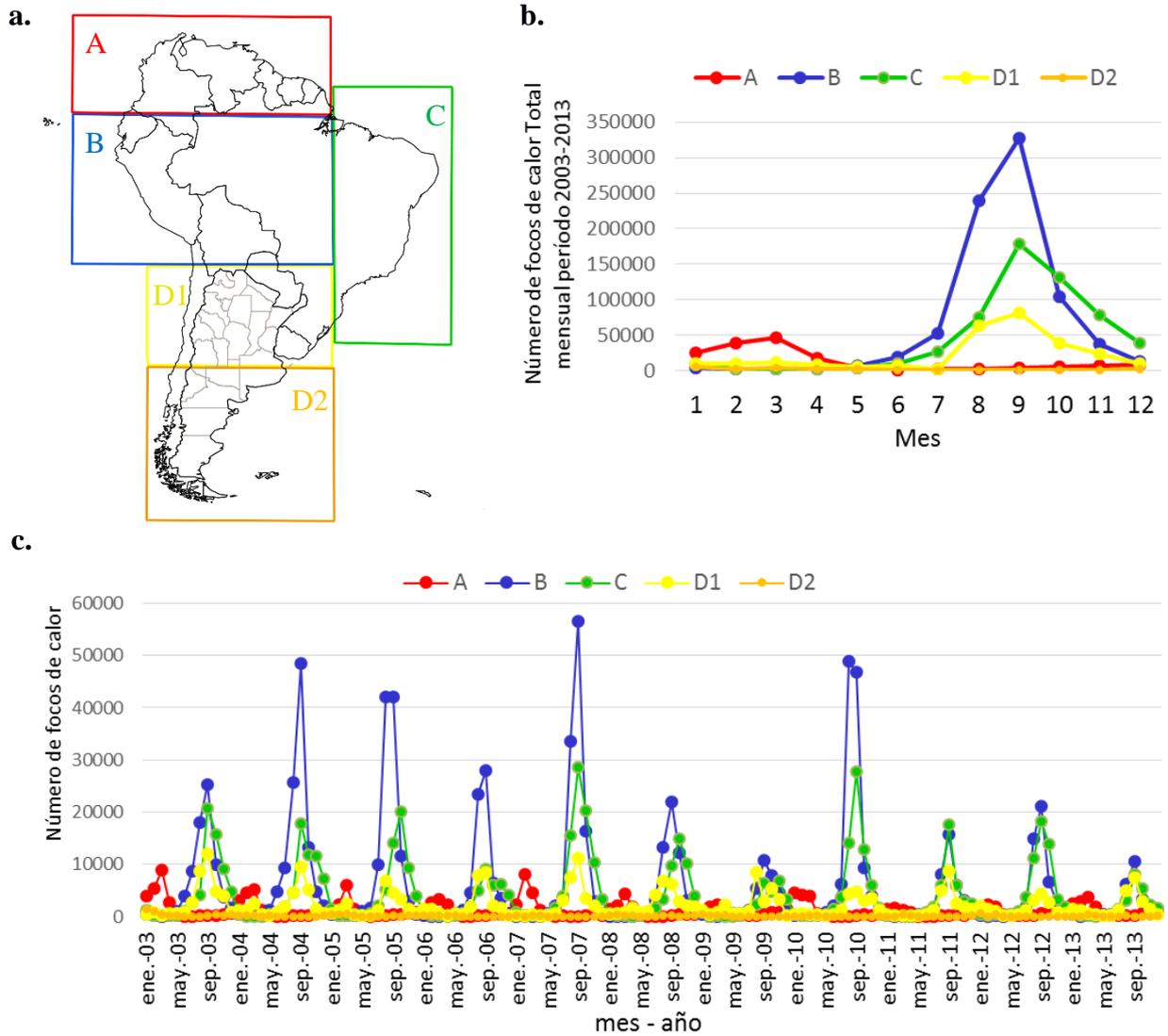


Figura 30. Estacionalidad de incendios en distintas áreas de Sudamérica para el período 2003-2013.

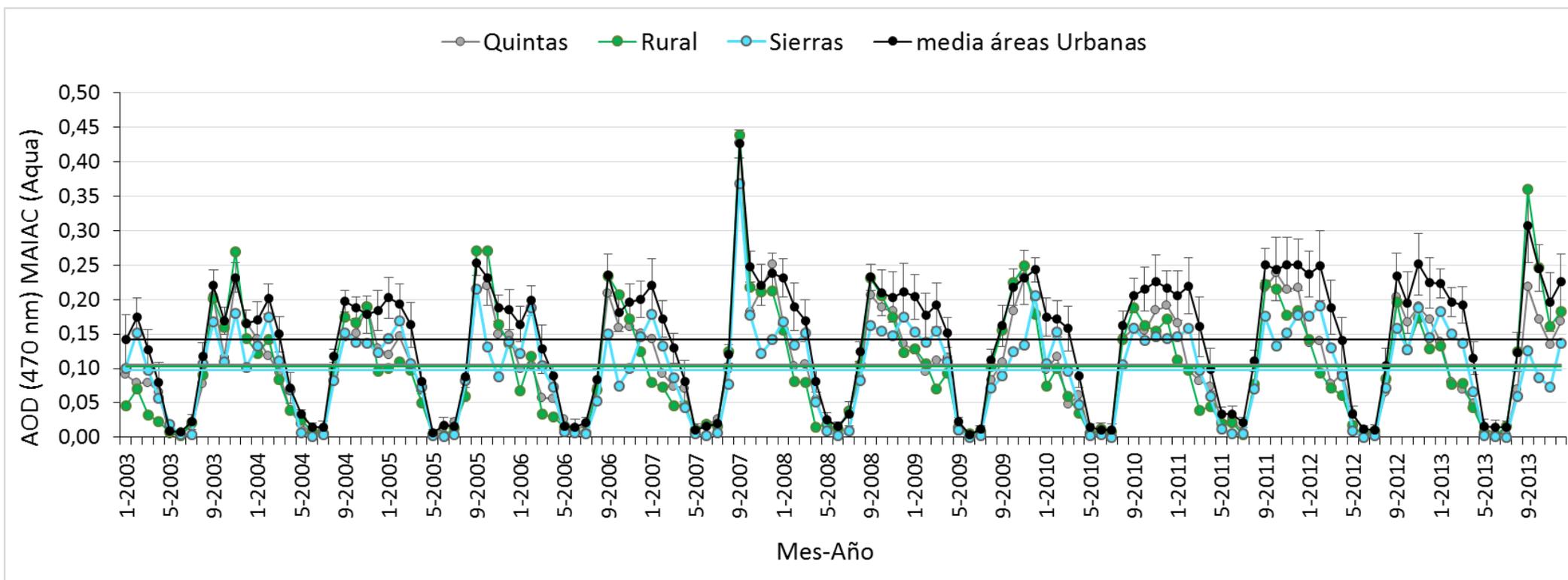


Figura 31. Variación mensual de AOD-MAIAC para las zonas indicadas en Figura 19

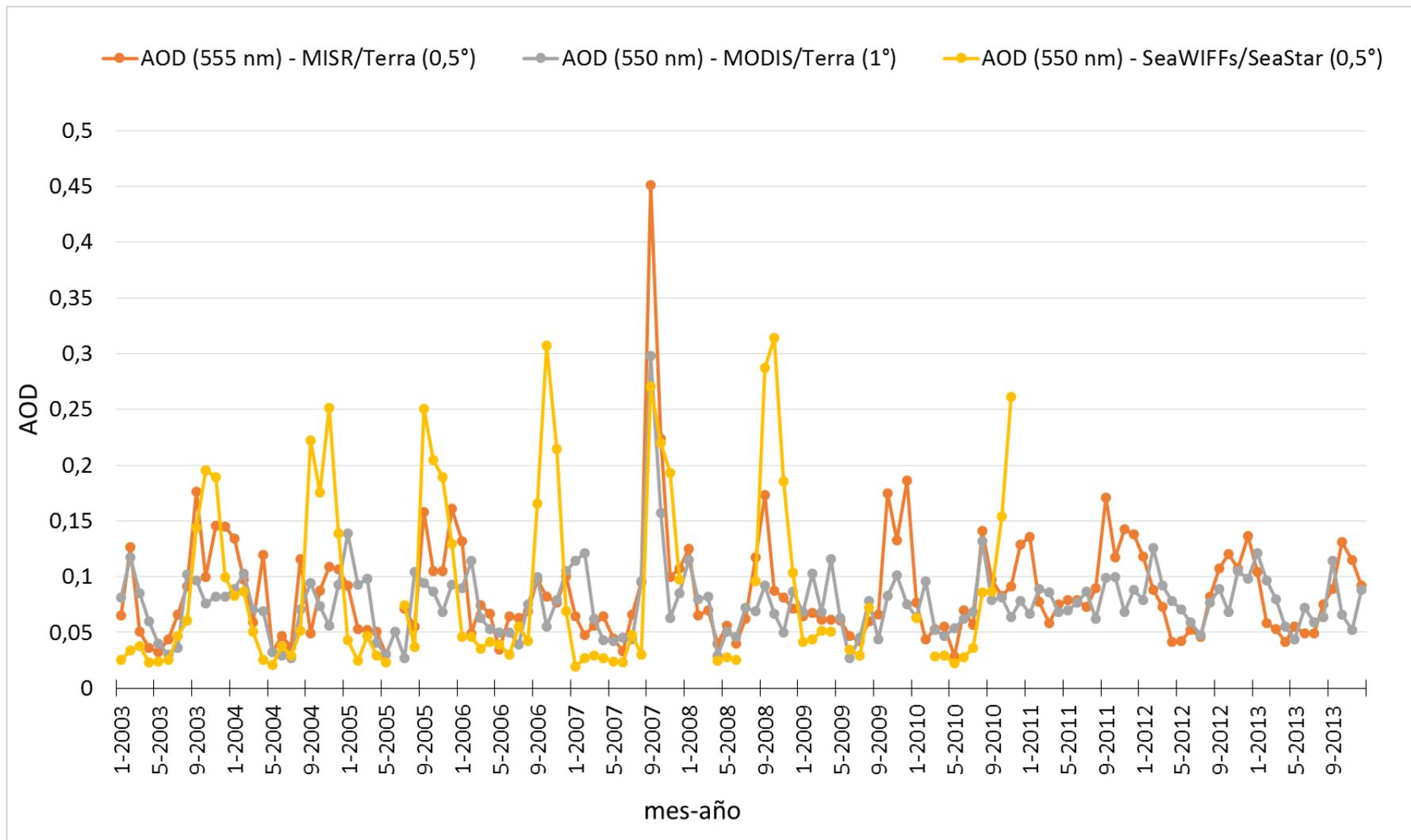


Figura 32. Variación mensual de AOD obtenido de distintos sensores. Leyenda: AOD (λ) – SENSOR/Satélite (resolución espacial).
 Fuente: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>

5.3 Caso de estudio: Incendios forestales ocurridos en el Valle de Calamuchita en el período 19-31 agosto de 2009²

A finales de agosto de 2009 se produjeron numerosos incendios en las Sierras de Córdoba, 80 km al Suroeste de la ciudad, que afectaron a numerosas poblaciones serranas e incluso a la misma ciudad de Córdoba, con humo muy intenso y cenizas, debiendo ser evacuadas casi 2.000 personas .

La Figura 33 muestra las “cicatrices” (en color rojo oscuro) producidas por los incendios ocurridos hasta el 12 de septiembre (los focos de calor muestran los incendios activos para los días 28, 29 y 30 de agosto). Particularmente, durante estos días los incendios forestales se extendieron unas 23 mil hectáreas aproximadamente, siendo el día 29 el de mayor intensidad. Los vientos en la región tuvieron dirección N-NO hasta la mañana del día 30, que rotaron a dirección S (Figura 34). Así, parte del humo originado en los incendios alcanzó a la ciudad de Córdoba y sus alrededores.

En la Figura 35 se muestra la serie temporal del parámetro AOD obtenidas con MAIAC y con otros sensores satelitales: MODIS/Aqua (MYD04_3k), SeaWIFS/SeaStar y OMI/Aura, tres misiones de la agencia espacial NASA (estos últimos obtenidos de <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) durante la última semana de agosto de 2009. Además, se muestran los datos de campo de la estación de monitoreo continuo de PM₁₀, ubicada en el centro de la ciudad de Córdoba (ver Sección 2.2.3), y mediciones de AOD de la estación AERONET CETT-Córdoba (Sección 2.2.1).

A simple vista, se observa una tendencia similar a lo largo del tiempo entre lo registrado por los distintos sensores satelitales y las estaciones en superficie, con un marcado incremento el día 30 en todos los casos, provocado por la dirección de los vientos. Tal como puede observarse en la Figura 34, hasta el día 30 de agosto la dirección del viento predominante era de dirección Norte, a partir de dicha fecha la dirección cambia y comienzan a soplar vientos con dirección Sur, es decir desde el área donde ocurren los incendios. Así, el incremento de AOD registrado en la estación AERONET y de material particulado en el centro de la ciudad el día 30 ocurre debido al cambio en la dirección del viento, que también puede observarse mediante las distintas plataformas satelitales mencionadas.

² Parte de la información presentada en esta sección corresponde al trabajo ‘Integración de datos espaciales para el monitoreo de contaminantes atmosféricos durante incendios’ presentado en IEEE ARGENCON 2016, Buenos Aires (Autores: Della Ceca L.S, Gracia Ferreyra M.F, Diez S., Scavuzzo C.M.).

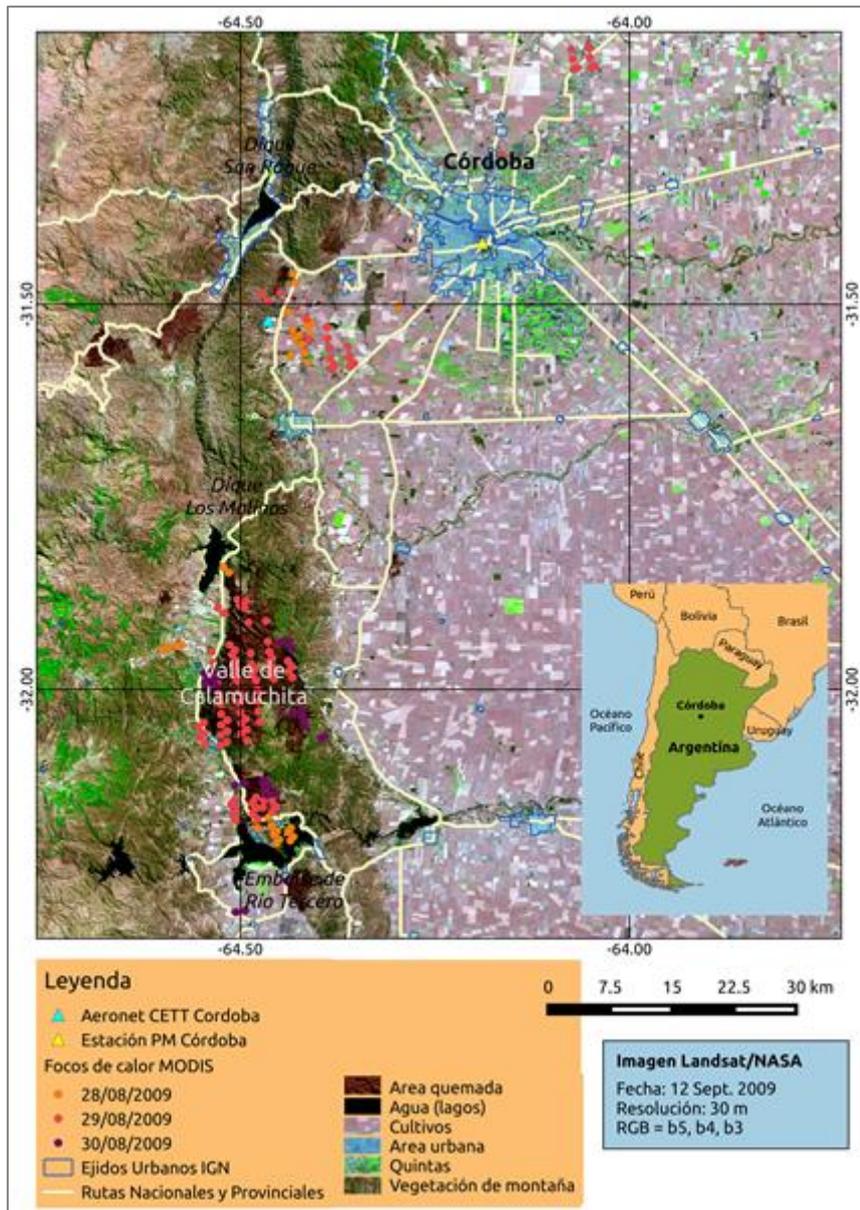


Figura 33. Incendios ocurridos en la Provincia de Córdoba. Imagen Landsat5 del 12 de septiembre. Focos de calor MODIS para los días del evento principal: 28, 29 y 30 de agosto.

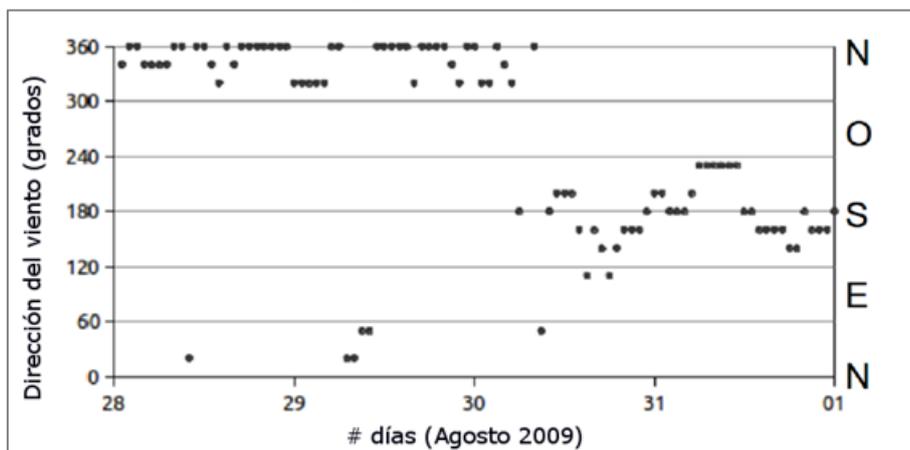


Figura 34. Dirección del viento en la ciudad de Córdoba.

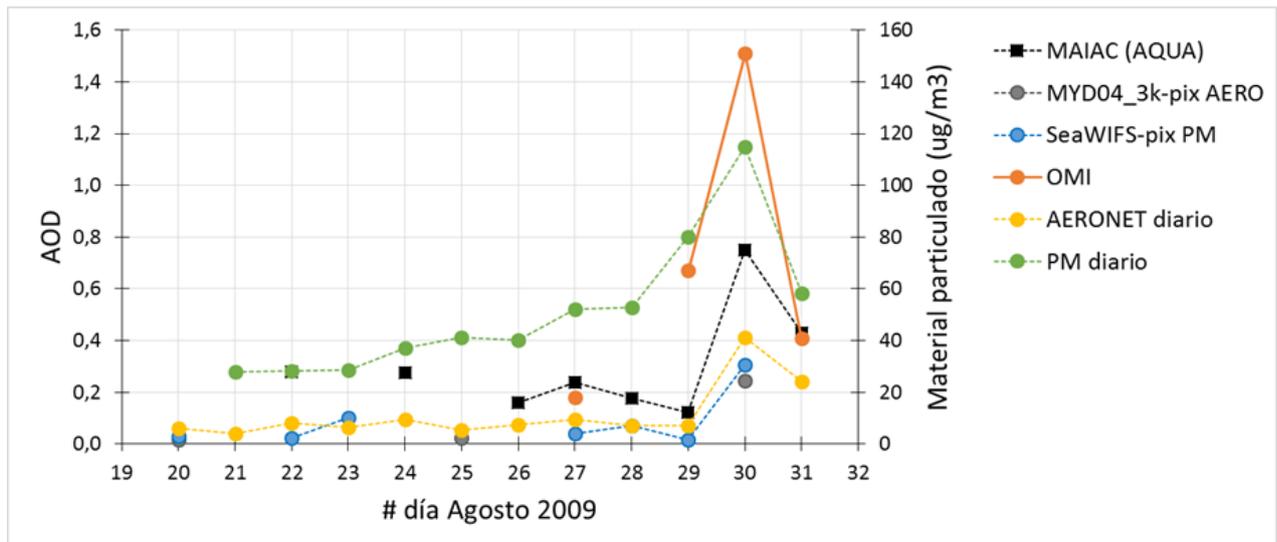


Figura 35. Valor medio diario de AOD obtenido a partir de distintos productos satelitales (MAIAC, MYD03_3k, SEAWIFS, OMI) y la estación de AERONET Córdoba-CETT (AERONET) y de material particulado (PM) medido en la estación de la Municipalidad de Córdoba para el período 20-31 de agosto de 2009.

En la Figura 36 se evalúa el desempeño de las plataformas satelitales para el período de estudio, en general se observa una buena performance para todas las plataformas satelitales. Cabe destacar que para este análisis el número de datos es muy reducido. Sin embargo, muestran que durante el evento en particular analizado en esta sección la performance de los satélites es aceptable.

En la Figura 37 se presentan los resultados de la relación entre los valores de PM₁₀ medidos desde superficie en el centro de la ciudad y los valores de AOD satelitales del pixel correspondiente. No se incluye a MODIS en este análisis debido a la poca cantidad de datos. Aun cuando se utilizan los datos de los días cercanos al evento de incendio es posible observar una correspondencia con las mediciones de PM₁₀ para los mismos días.

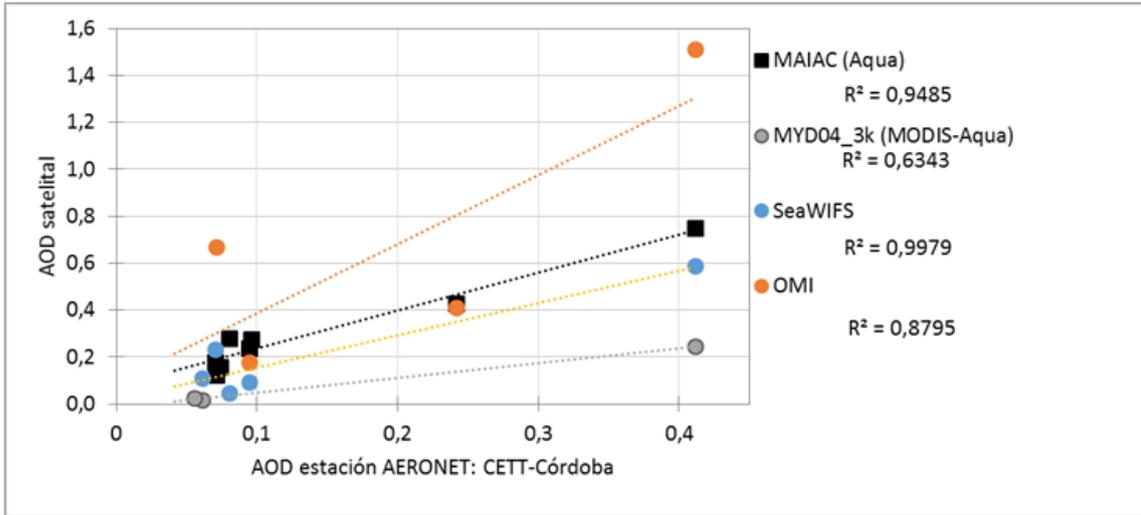


Figura 36. AOD AERONET vs AOD satelital durante los días del evento de incendios.

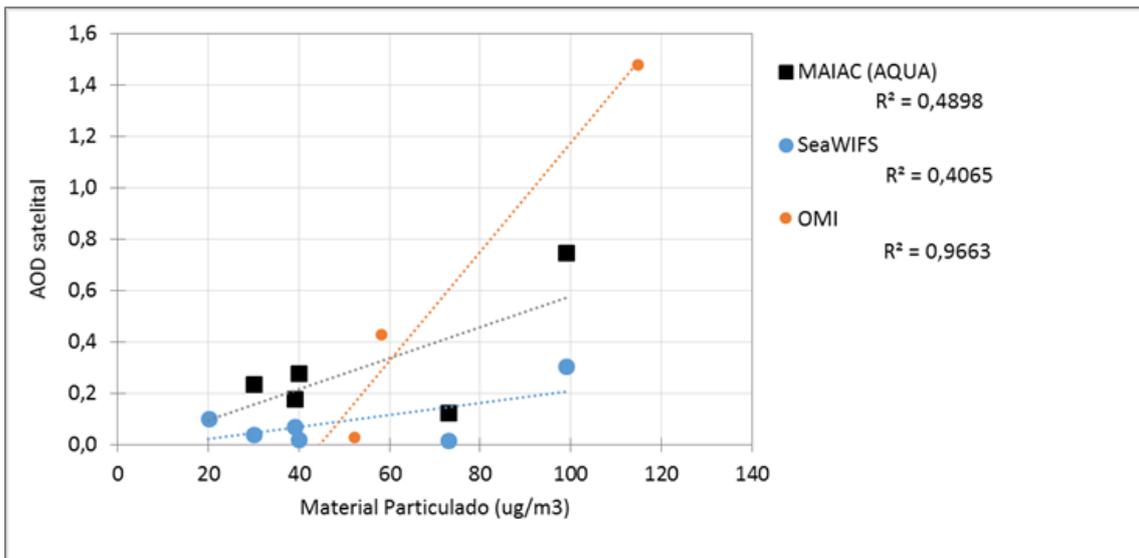


Figura 37. PM10 [$\mu\text{g}=\text{m}^3$] vs AOD satelital durante los días del evento de incendios.

Capítulo 6

6. RELACIÓN ENTRE EL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOLES Y MATERIAL PARTICULADO MEDIDO EN SUPERFICIE

Las estaciones de monitoreo puntuales, como las utilizadas por la Municipalidad de Córdoba para el monitoreo del material particulado en el centro de la ciudad durante 2009, presentan un área de cobertura espacial limitada y se encuentran influenciadas por fuentes de partículas cercanas al sensor. La principal diferencia entre las mediciones realizadas por estos muestreadores y las estimaciones realizadas a partir de AOD es que este último parámetro tiene en cuenta toda la columna atmosférica mientras que el monitor de PM realiza mediciones que corresponden a un área limitada circundante al sensor. Además, el AOD es un parámetro adimensional que da una idea de la cantidad de aerosoles en la atmósfera pero no un valor de su concentración, mientras que el monitor en superficie mide la concentración de partículas en, por ejemplo, unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

A pesar de estas diferencias, numerosos estudios han desarrollado modelos estadísticos para establecer una relación cuantitativa entre concentraciones de PM obtenidas en la superficie terrestre y mediciones de AOD satelitales, para así poder obtener valores estimados de PM en superficie a partir del AOD satelital (Schafer et al., 2008; Wallace y Kanaroglou, 2007; Gupta y Christopher, 2009). Esto resulta de gran relevancia, principalmente, en aquellas áreas en las que la red de monitores de PM en superficie no es muy amplia.

La relación PM superficial – AOD satelital es compleja debido a que es afectada por una gran cantidad de variables (altura de la capa límite, condiciones meteorológicas, distribución vertical de los aerosoles, entre otras). Por otro lado, un modelo que explique esta relación y que resulte adecuado para un área, puede no serlo para otra. La integración de parámetros satelitales, de superficie y meteorológicos a escalas temporales y espaciales similares es uno de los pasos importantes hacia el desarrollo y análisis de un modelo estadístico. El método ampliamente utilizado para predecir la concentración de PM a partir de datos satelitales es mediante el análisis empírico, en el que la medición *in situ* de PM se correlaciona linealmente con el correspondiente valor de AOD satelital. Con el fin de mejorar la capacidad predictiva de los modelos de regresión lineal, se incorporan a los modelos lineales parámetros tales como la meteorología local e información sobre el

uso de la tierra (Liu et al., 2009). Entre los modelos desarrollados para distintos sitios se encuentran modelos de regresión múltiple (Gupta y Christopher, 2009), de redes neuronales (Gupta y Christopher, 2009b) y de efectos mixtos (Lee et al., 2011).

En este Capítulo se realiza primero una descripción de los valores de PM_{10} obtenidos por la Secretaría de Ambiente de la Municipalidad de Córdoba durante 2009 y luego un análisis de la relación entre estos valores y los valores de AOD obtenidos a partir del algoritmo MAIAC para el mismo período incorporando además algunas variables meteorológicas para estudiar cuáles y en qué medida contribuyen a la variación de PM_{10} medida en superficie.

6.1 Variación del material particulado en el centro de Córdoba

Tal como se describió en la sección 2.2.3, los datos disponibles de material particulado en la ciudad de Córdoba corresponden a valores horarios de PM_{10} obtenidos por la Secretaría de Ambiente de la Municipalidad de Córdoba en la estación localizada en un área céntrica de la ciudad (Figura 8). Los datos disponibles corresponden al período enero-agosto de 2009, pero durante enero y junio el muestreo ha sido discontinuo y sólo se obtuvieron datos de 10 y 2 días respectivamente (Figura 38). El valor medio de PM_{10} para el período de estudio es de $33,56 \pm 29,98 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

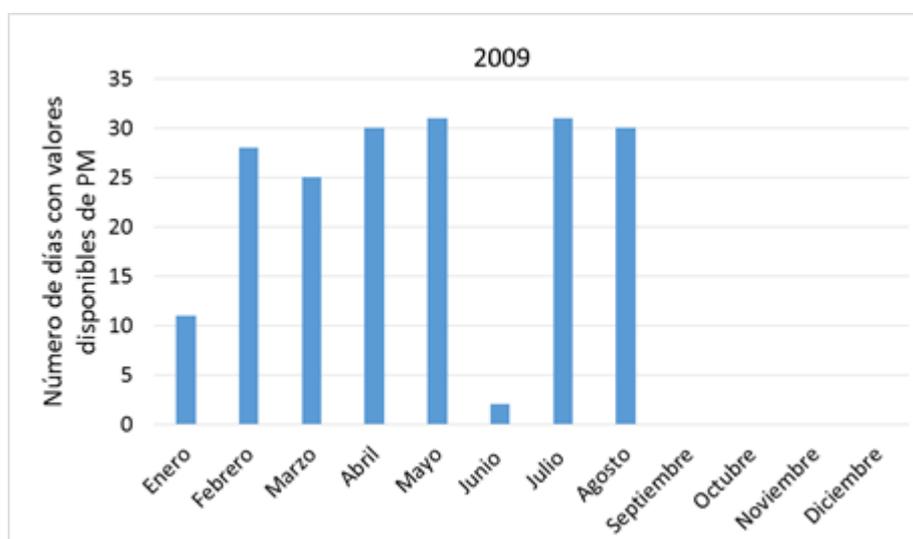


Figura 38. Número de días con valores de PM_{10} en la ciudad de Córdoba disponibles para el período enero-agosto 2009.

La variación horaria de los valores de PM_{10} en Córdoba muestra un claro perfil urbano, con valores más altos de material particulado alrededor de las 10 y las 20 hs (hora local), momentos de máximo tránsito vehicular en la ciudad, y valores mínimos durante la madrugada (4-6 hs; Figura 39). Este perfil evidencia por un lado la dinámica de la

concentración de aerosoles a lo largo de un día y por otro la importancia del tránsito como fuente de aerosoles atmosféricos en el área urbana.

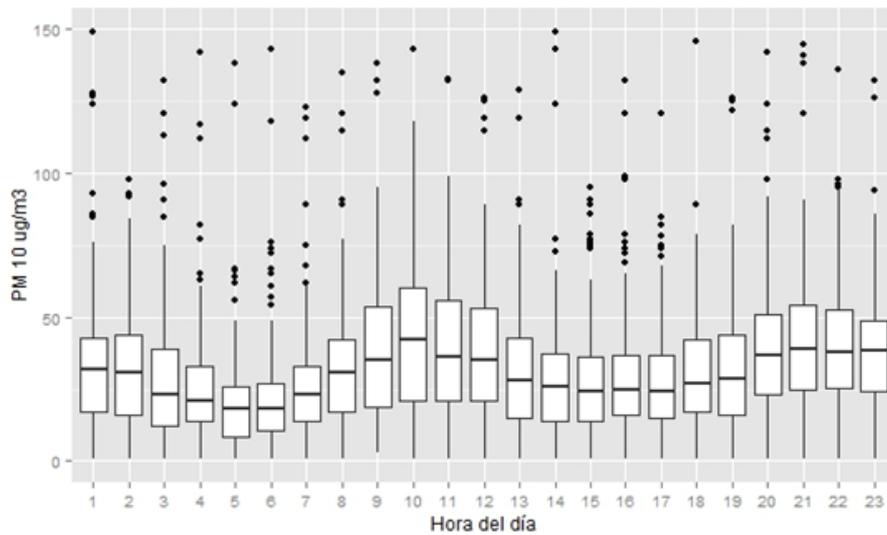


Figura 39. Variación horaria de PM10 en la ciudad de Córdoba para el período enero-agosto de 2009.

La Figura 40 presenta los valores promedio de PM₁₀ para cada día de la semana de marzo de 2009. Al igual que lo mencionado para el AOD en la sección 4.1 y Figura 23, se observa que el PM₁₀ presenta valores medios más elevados durante los días hábiles y valores más bajos los días de fin de semana. Estas diferencias también estarían relacionadas al mayor tránsito vehicular que circula en el área céntrica de lunes a viernes respecto de los sábados y domingos.

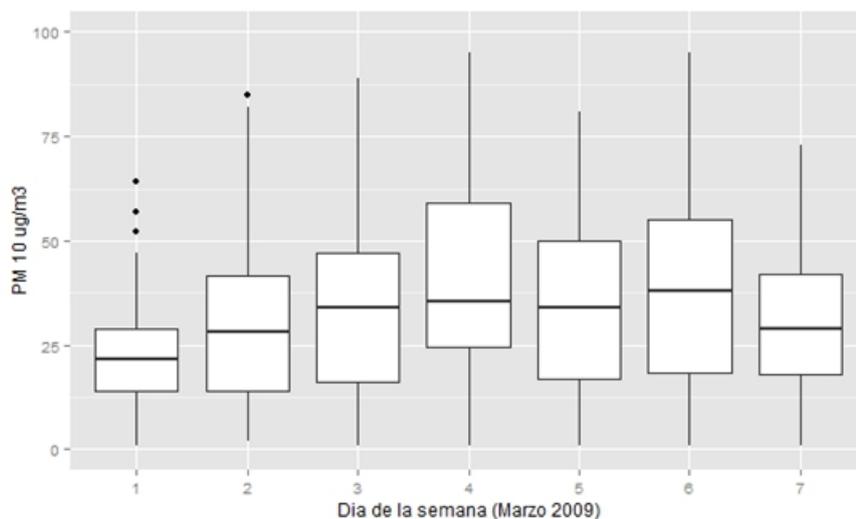


Figura 40. Valores de PM₁₀ en la ciudad de Córdoba según el día de la semana durante marzo de 2009 (día 1 corresponde a domingo y día 7 a sábado)

La variación mensual del PM_{10} en 2009, con valores más elevados durante los meses de verano y durante agosto y más bajos hacia los meses de invierno (mayo-julio), muestra una tendencia similar a la observada para el AOD y descrita en el Capítulo 5 (Figura 41). Sin embargo se observa una gran variación en los valores de PM_{10} y abril presenta valores similares a enero, lo cual no coincide con lo observado para el AOD obtenido con el algoritmo MAIAC. Lamentablemente no se dispone de información sobre PM_{10} para septiembre, mes en el cual en AOD presentó los valores más altos en todos los años del período estudiado.

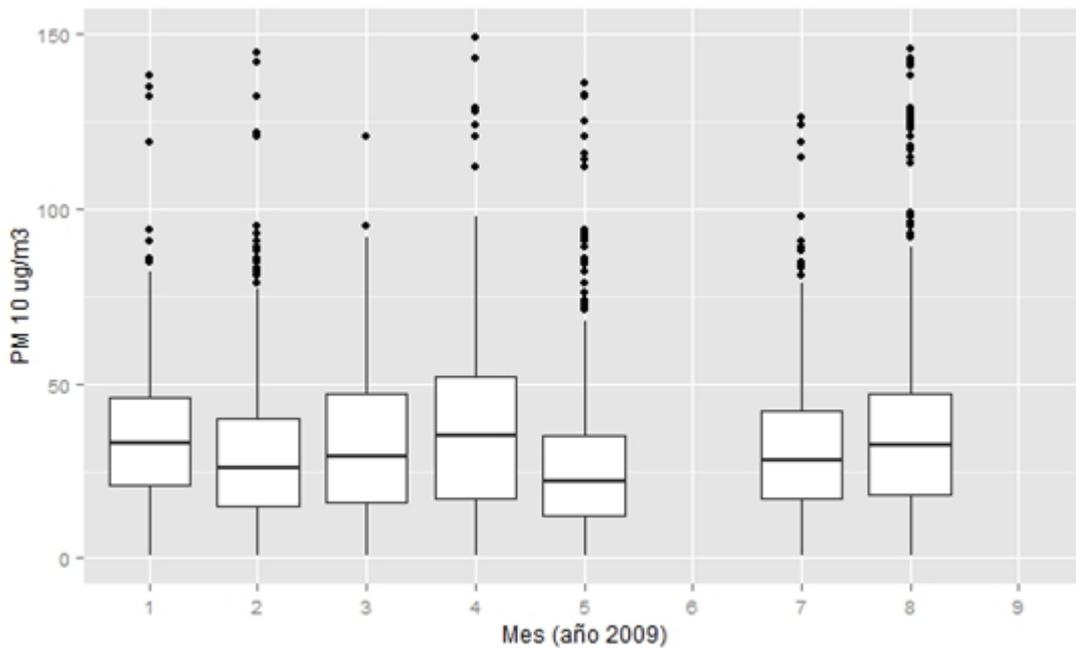


Figura 41. Variación mensual de valores de PM_{10} en la ciudad de Córdoba para el período enero-agosto de 2009 (se excluye junio por escasez de datos disponibles).

6.2 Relación PM_{10} -AOD

La relación PM_{10} -AOD se evaluó mediante regresión lineal simple y múltiple, incorporando variables meteorológicas disponibles (descritas en la sección 2.2.2). Se utilizó el mismo set de datos para todos los modelos con el objetivo de que los modelos sean comparables entre sí. El set de datos utilizado se obtuvo al eliminar los días con algún valor faltante para alguna de las siguientes variables: material particulado (PM_{10}), espesor óptico de aerosoles (AOD), temperatura (T), humedad relativa (HR), altura de la capa límite (CL), velocidad (Vel.Viento) y dirección del viento (Dir.Viento). El total de

días con datos de las variables consideradas es de $n=53$. Se decidió no considerar la variable Precipitación dado que sólo 4 días del conjunto de datos utilizados presentaban dato de esta variable y el conjunto de datos se reduciría a $n=4$.

Los valores utilizados para evaluar la relación PM_{10} -AOD corresponden a la media aritmética de aquellos medidos dentro de los ± 60 minutos la hora de pasada del satélite, tanto para PM_{10} como para las variables meteorológicas registradas en la estación Observatorio del SMN (Figura 8). En la Figura 42 se muestra la distribución de frecuencias de los valores correspondientes a cada variable utilizada en los modelos de regresión.

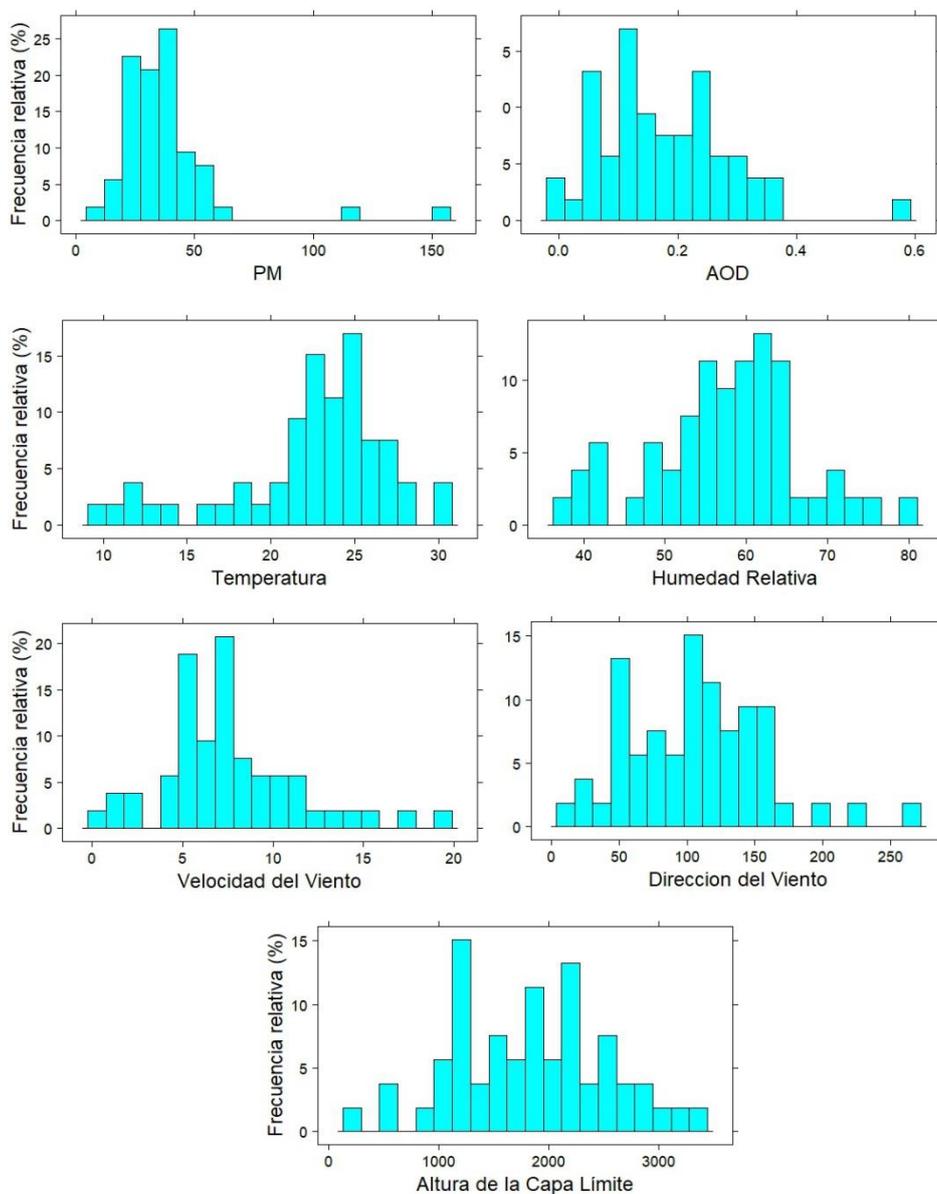


Figura 42. Distribución de frecuencias de las variables tenidas en cuenta en el modelo lineal.

6.2.1 Regresión simple: PM₁₀-AOD

Según el modelo de regresión simple PM₁₀-AOD obtenido, la recta que mejor ajusta los pares de datos corresponde a: $PM_{10} = 106,65 * AOD + 18,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($R^2_{\text{ajust}}=0,26$; valor $p < 0,01$) y explica el 26% de la variabilidad total del conjunto de datos (variación de PM₁₀ observada; Figura 43). Los intervalos de confianza con un nivel de significancia de 95% para la pendiente y ordenada al origen son 58,37–154,92 y 8,80–28,88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

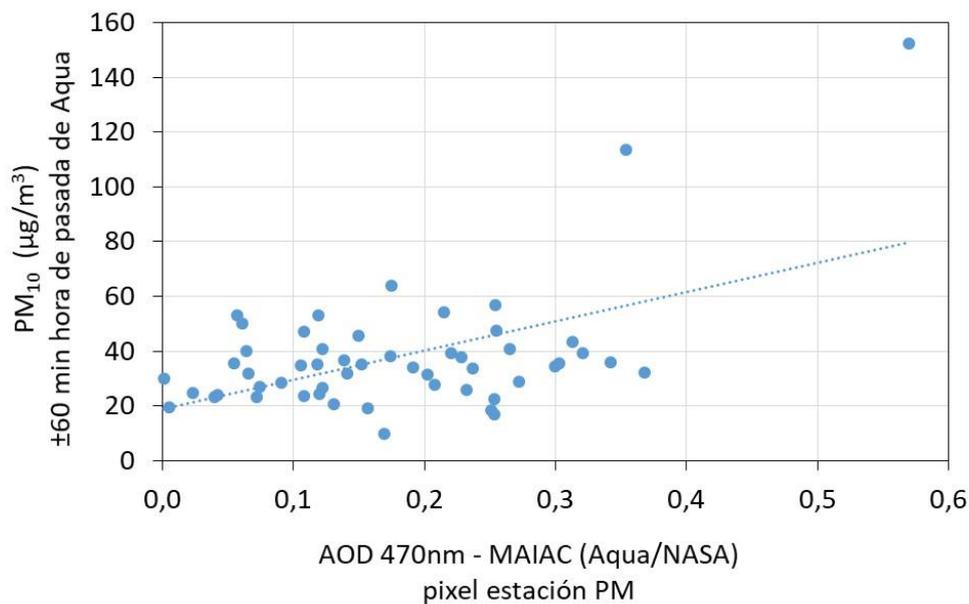


Figura 43. Modelo de regresión lineal simple: AOD_{MAIAC} vs PM_{10} .

En la Figura 44 se grafican los valores predichos vs los valores observados y la Figura 45 muestra la distribución de los residuos resultantes del modelo, en ésta última se observa una distribución asimétrica (valor mínimo: -28, 93; primer cuartil: -12, 22; mediana: -0,25; tercer cuartil: 8,84; valor máximo: 72,56; Figura 45). Estos resultados evidencian que el modelo predice ciertos valores que están muy lejos de los valores reales observados.

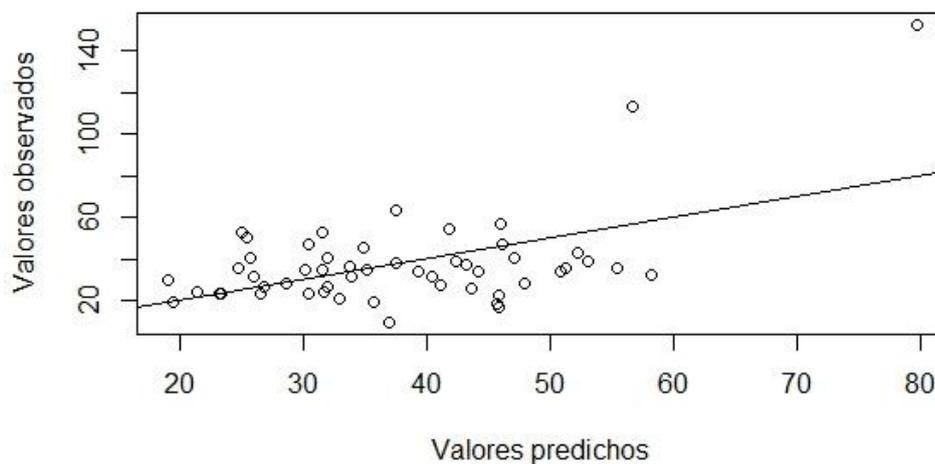


Figura 44. Valores predichos vs Valores observados resultante del modelo de regresión lineal simple $PM_{10} = 106,65 * AOD + 18.85 \text{ ug/m}^3$

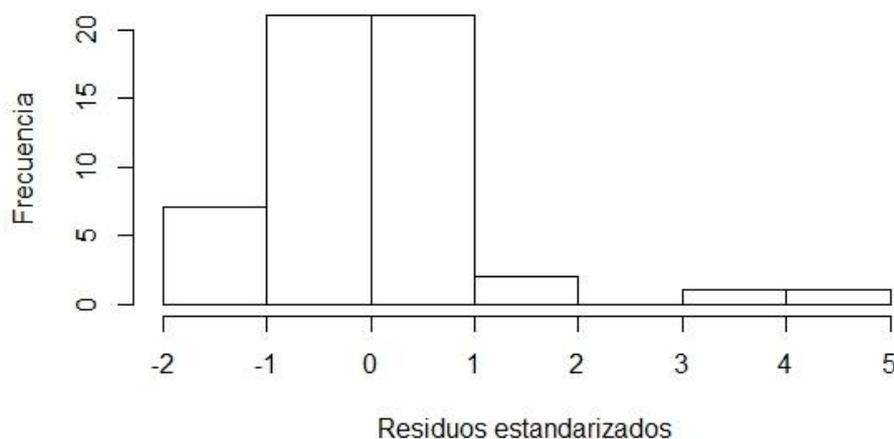


Figura 45. Histograma de frecuencias de los residuos estandarizados del modelo de regresión lineal simple $PM_{10} = 106,65 * AOD + 18.85 \text{ ug/m}^3$

El error estándar residual del modelo es de 19.17 (con 51 grados de libertad), es decir, este modelo presenta un error porcentual de 38,34%.

Como prueba de utilidad del modelo se realizó una prueba de ANOVA, que permite contrastar si el modelo es significativo o no. Los resultados obtenidos (estadístico $F=19,67$; con 51 grados de libertad y valor $p= 4.921 \times 10^{-5}$) indican que la pendiente del modelo es significativamente distinta de cero (se rechaza la hipótesis nula: H_0 pendiente=0) con un nivel de significancia de 0,05.

6.2.2 Regresión múltiple: incorporación de variables meteorológicas

En la Tabla 6 se muestran los resultados del análisis de correlación realizado para evaluar la covariación de las variables consideradas en el modelo de regresión múltiple. Se observó una correlación positiva entre: AOD y PM, Capa Límite y Temperatura. Tal como se describió en la sección 1.1, la capa límite presenta mayores alturas a temperaturas más elevadas.

Tabla 6. Coeficiente de correlación entre las variables tenidas en cuenta en los modelos lineales (PM10: material particulado, AOD: espesor óptico de aerosoles obtenido con MAIAC, CL: capa límite, T°: temperatura, HR: humedad relativa, Vel.Viento: velocidad del viento, Dir.Viento: dirección del viento).

	AOD							
AOD	1	PM₁₀						
PM₁₀	0,53	1	CL					
CL	-0,02	-0,13	1	T°				
T°	0,36	0,17	0,43	1	HR			
HR	0,19	-0,02	-0,26	0,16	1	DIR.VIENTO		
DIR.VIENTO	0,09	0,04	-0,17	0,03	-0,21	1	VEL.VIENTO	
VEL.VIENTO	-0,05	-0,10	-0,23	-0,21	-0,10	0,55	1	

En un primer modelo de regresión múltiple se incorporaron las variables meteorológicas mencionadas anteriormente y, debido a que tanto las variables meteorológicas como el AOD y el PM presentan una marcada variabilidad estacional (ver Figura 10), se decidió incorporar otra variable que discrimine dos períodos del año: estación seca (mayo-agosto; n=11) y estación húmeda (enero-abril; n=42). El modelo lineal múltiple que incorpora todas estas variables presentó un $R^2_{aj}=0,24$ y un $p=0,005$, es decir que explica un 24% de la variabilidad de PM₁₀ observada, un valor relativamente menor respecto del modelo lineal simple. Los coeficientes resultantes del modelo y sus respectivos intervalos de confianza (con un nivel de significancia de 0,05) para cada variable se muestran en la Tabla 7. Se observa que la única variable cuya contribución resulta significativa es el AOD. Por otro lado, con la prueba ANOVA del modelo se obtuvo un $F=3.38$ (con 45 grados de libertad) que indica que este modelo no resulta significativo.

Tabla 7. Coeficientes e intervalos de confianza obtenidos para las variables consideradas en el modelo de regresión lineal múltiple para cada variable (AOD: espesor óptico de aerosoles obtenido con MAIAC, CL: capa límite, T°: temperatura, HR: humedad relativa, VEL.VIENTO: velocidad del viento, DIR.VIENTO: dirección del viento, EST: período del año).

Variable	Coeficiente	valor p (del coeficiente)	Intervalo de confianza (95%) lím. inferior ; lím. superior
Ordenada al origen	73,94	0,1	-15,71 ; 163,6
AOD	106,08	0,0002	51,87 ; 160,3
T°	0,19	0,86	-2,07 ; 2,46
HR	-0,58	0,11	-1,29 ; 0,14
VEL.VIENTO	-0,7	0,43	-2,51 ; 1,1
DIR.VIENTO	-0,01	0,85	-0,15 ; 0,13
CL	-0,008	0,12	-0,02 ; 0
ESTACION	-3,95	0,74	-27,79;19,89

Las Figuras 46 y 47 grafican los ‘Valores predichos’ vs ‘Valores observados’ y la distribución de los residuos resultantes del modelo, respectivamente. Al igual que en el modelo lineal simple descrito en la sección 6.2.1, se observa una distribución asimétrica de los residuos (valor mínimo: -33,07; primer cuartil: -11,57; mediana: -1,29; tercer cuartil: 7,23; valor máximo: 64,81). Estos resultados indican que el modelo predice ciertos valores que están muy lejos de los valores reales observados.

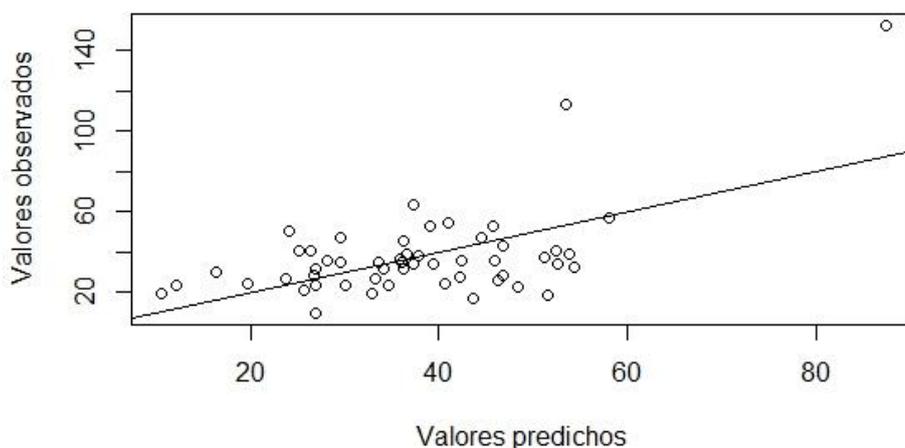


Figura 46. Valores predichos vs Valores observados resultante del modelo de regresión múltiple que incorpora las variables temperatura, humedad relativa, altura de la capa límite, velocidad y dirección del viento (descrito en el texto).

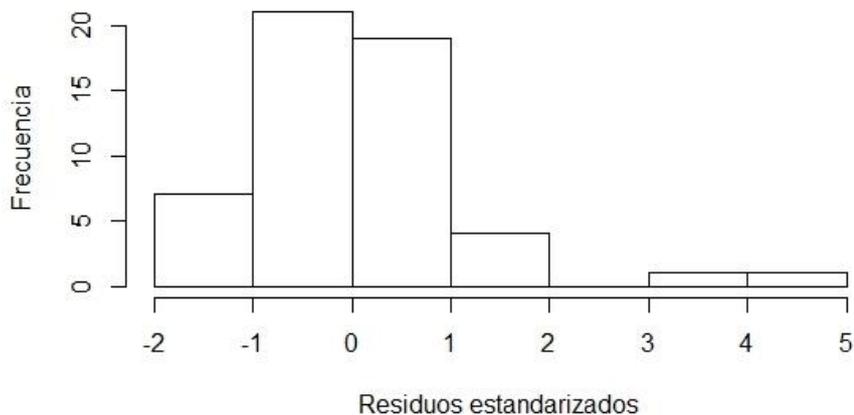


Figura 47. *Histograma de frecuencias de los residuos estandarizados del modelo de regresión múltiple que incorpora las variables temperatura, humedad relativa, altura de la capa límite, velocidad y dirección del viento (descrito en el texto).*

Para evaluar si alguna combinación de variables podría resultar en un modelo lineal múltiple más adecuado, se aplicó el criterio de información de Akaike (AIC), una medida de la calidad relativa de un modelo estadístico que tiene en cuenta la bondad de ajuste y la complejidad del modelo. Se utilizó una función del software R que realiza la selección del modelo paso a paso y va descartando o seleccionando las variables según el AIC (a menor valor del AIC, más adecuado el modelo). Como modelo final resultante, este proceso descartó todas las variables meteorológicas y la variable período del año, indicando el modelo con menor AIC se obtiene considerando únicamente el AOD como variable predictora. Los valores de AIC obtenidos en cada paso del análisis se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. *Valores AIC para selección del modelo lineal múltiple más adecuado.*

Paso del análisis	Variable que se descarta	AIC
1		321,88
2	T°	319,91
3	DIR.VIENTO	317,93
4	ESTACION	316,51
5	VEL.VIENTO	315,89
6	HR	315,86
7	CL	314,99

Los modelos de regresión lineal desarrollados en este estudio no son suficientes para explicar la variabilidad de los datos de PM medidos en superficie a partir de los valores satelitales de AOD y las variables meteorológicas. Sin embargo, los resultados presentados constituyen un primer estudio exploratorio para la ciudad de Córdoba. Se evidencian algunas limitaciones en el cálculo de los modelos, relacionadas principalmente con las bases de datos a las que se ha tenido acceso: la discontinuidad y escasez de datos de PM₁₀, la diferencia horaria entre el dato de altura de capa límite (9 hs) y la hora de pasada del satélite (entre las 13 y las 15 hs hora local), la altura de la capa límite es obtenida en la estación meteorológica localizada en el aeropuerto y la estación de PM₁₀ se encuentra en el centro de la ciudad. La incorporación de otras variables tales como tipo de uso del suelo en el área urbana, tipo de aerosol dominante (fino o grueso, polvo, cenizas, etc.) y el desarrollo de modelos más complejos que incorporen, por ejemplo, modelos químicos de dispersión podrían resultar en una mejor aproximación del PM₁₀ a partir del AOD. Cabe destacar que, además de otras variables, debe considerarse disponer de una base de datos de PM medido en superficie de mayor tamaño, ya que un n=53 (como el analizado en este estudio) no es suficiente para obtener un modelo predictivo. La base de datos de PM, para que pueda ser representativa debería cubrir al menos dos ciclos anuales, considerando las variaciones a lo largo del año observadas para el AOD.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo de tesis se estudió la variabilidad espacial y temporal de los aerosoles atmosféricos sobre la ciudad de Córdoba y sus alrededores a partir de datos de espesor óptico de aerosoles (AOD) obtenidos con el algoritmo MAIAC (Implementación del Algoritmo de Corrección Atmosférica Multi-ángulo) desarrollado para el sensor MODIS/Aqua (NASA) L2 de 1 km de resolución espacial y frecuencia diaria.

En primera medida, se realizó la comparación de los valores satelitales de AOD-MAIAC con valores de AOD obtenidos por la red de fotómetros AERONET/NASA para evaluar el desempeño del algoritmo en el área de estudio (Capítulo 3). Se construyeron mapas resumen de estadísticos básicos como la media y el coeficiente de variación para cada año de toda la serie de tiempo (2003-2013), a fin de caracterizar la variabilidad interanual del parámetro en cuestión (Capítulo 4). Además, se estudió la variabilidad espacial con frecuencia mensual y estacional evaluando diferencias entre distintas zonas dentro del área de estudio (urbanas, rurales, sierras) (Capítulo 5). Por último, se analizó la relación entre el AOD y mediciones en superficie de material particulado (PM₁₀) mediante modelos de regresión lineales simples y múltiples, incorporando variables meteorológicas (Capítulo 6). Los análisis realizados y los resultados obtenidos respondieron al objetivo principal del presente trabajo: estudiar la variabilidad espacio-temporal de los aerosoles atmosféricos sobre la ciudad de Córdoba y sus alrededores mediante el uso del producto satelital AOD/MAIAC (Aqua-NASA).

Hasta el momento, este trabajo de tesis constituye el primer estudio que utiliza el producto AOD/MAIAC (Aqua-NASA) con una resolución espacial de 1 km y temporal de 1 día (L2) de MODIS/Aqua para caracterizar la variabilidad espacio-temporal de los aerosoles atmosféricos en una ciudad de Argentina. Además, es la primera vez que se analiza una serie de tiempo que llega casi hasta la actualidad. Los 11 años de datos analizados en este trabajo proveen una visión general de la variabilidad temporal y de la dinámica espacio-temporal de los aerosoles atmosféricos en el área de estudio.

Se observó que el algoritmo MAIAC, a pesar de presentar diferencias en el desempeño respecto a la época del año, en general, presentó un buen comportamiento en el área de estudio considerando utilizando datos de la estación Córdoba-CETT de AERONET para esta evaluación.

Los resultados hallados en este estudio reflejaron una clara tendencia de incremento de los aerosoles atmosféricos a lo largo del tiempo en las zonas urbanas del área de

estudio. En la ciudad de Córdoba, el patrón de distribución de los aerosoles atmosféricos en el área de estudio presenta los valores más elevados de AOD en cercanías a las grandes vías de circulación de tránsito (p. ej. Avenida Circunvalación), reflejando la importancia de la circulación vehicular como fuente de aerosoles atmosféricos.

Además, se observó en toda el área de estudio un marcado ciclo anual de aerosoles atmosféricos con los valores más altos en primavera y los más bajos en invierno. Durante el verano también se observan valores altos pero, a diferencia de la primavera momento en el cual los valores altos presentan una mayor expansión en el espacio, éstos se concentran en las áreas urbanas y las principales vías de circulación. Este ciclo evidencia que las variables climáticas juegan un rol fundamental en la dinámica anual de los aerosoles atmosféricos. Además, se observó que la quema de biomasa en la provincia de Córdoba, el norte argentino y otras regiones de Sudamérica, tales como la Amazonia y Cerrado de Brasil, son una fuente importante de aerosoles atmosféricos. Por lo tanto, el transporte atmosférico a escala local y regional pero también continental juega un rol fundamental en la concentración de aerosoles en el área de estudio durante el fin del invierno y comienzo de la primavera. En el caso particular de los incendios ocurridos en cercanías a la ciudad de Córdoba durante agosto de 2009, se demostró cómo a partir del cambio de dirección del viento en dirección a la ciudad de Córdoba, se incrementan los valores de material particulado registrados en el centro de la ciudad por la estación de monitoreo de la Municipalidad y cómo además este incremento es registrado por el producto AOD obtenido con el algoritmo MAIAC y otros productos satelitales.

Si bien el algoritmo MAIAC presenta grandes ventajas en estudios de la calidad del aire a escala urbana y regional y se han logrado resultados prometedores en el uso del AOD_{MAIAC} para estudios de contaminación por material particulado (p. ej. Kloog et al., 2015), no se pueden pasar por alto sus limitaciones. La relación AOD-PM presenta aún incertidumbres debido a varios factores. Por ejemplo, la distribución vertical de los aerosoles afecta fuertemente la relación de AOD-PM. Si altas concentraciones de aerosoles se encuentran distribuidos en las capas más altas de la atmósfera se incrementará el AOD pero esto no será detectado por los monitores de superficie (Engel Cox et al., 2006; Schafer et al., 2008). Además, la mayoría de las mediciones *in situ* se realizan en condiciones relativamente secas, mientras que los satélites proporcionan información bajo cualquier condición de humedad atmosférica, por lo que los cambios en la propiedad de los aerosoles asociados con el aumento de la humedad relativa también puede dar a lugar a discrepancias entre AOD y PM (van Donkelaar et al., 2010; Shinozuka

et al., 2007; Crumeyrolle et al., 2014). Además, las incertidumbres y limitaciones inherentes a la obtención del AOD satelital aumentan la dificultad de predecir los valores de PM en superficie. La comparación del AOD_{MAIAC} con mediciones en superficie de la red AERONET reveló algunas diferencias respecto a la época del año: algunos meses con sobreestimación del AOD (agosto-septiembre) o subestimación (abril-julio) de los valores obtenidos desde la estación AERONET. Sin embargo, estas diferencias no resultaron significativas. Las diferencias observadas pueden deberse a distintas fuentes de incertidumbre entre las cuales pueden mencionarse: la calibración, la contaminación por nubes de los píxeles así como los supuestos considerados en los modelos utilizados para los algoritmos de obtención del AOD.

Aun teniendo en cuenta estas limitaciones, se considera que la implementación del algoritmo MAIAC, que brinda un aumento en la resolución espacial del producto de AOD respecto de los productos satelitales disponibles hasta el momento, presenta un significativo potencial para mejorar el monitoreo de la calidad del aire en escalas urbanas y regionales de Argentina, sobre todo teniendo en cuenta la falta de información continua de estaciones superficiales y la fragmentación espacial en los estudios sobre aerosoles en Argentina (Bilos et al, 2001; Dos Santos et al., 2009; Magallanes et al., 2008; Morata et al., 2008; Murumi et al., 2009; Reich et al., 2008; Lopez et al., 2011). La falta de información sobre los niveles, tipos y fuentes de aerosoles no permite prevenir o tomar medidas de mitigación respecto los problemas en los que este tipo de contaminantes incide significativamente, como los relacionados con la salud de la población, el cambio climático, la preservación de edificios y obras de arte, entre otros.

El análisis del AOD_{MAIAC} sobre la ciudad de Córdoba y sus alrededores permitió realizar un análisis sistemático del comportamiento espacio-temporal del particulado atmosférico en un período de 11 años (2003-2013), posibilitando futuras intercomparaciones en distintas áreas de nuestro país. A pesar de que los datos satelitales no pueden reemplazar los datos de mayor precisión que pueden obtenerse desde monitores superficiales, en este estudio se logró estudiar el comportamiento de los aerosoles en un área y durante un período de tiempo para el cual existen muy escasos datos de PM₁₀.

Este estudio constituye, de este modo, una primera aproximación al problema y sientan las bases para continuar investigando la aplicación de información satelital para estudiar la distribución de aerosoles a escala urbana, principalmente en sitios sin redes de monitoreo en superficie.

Considerando el objetivo general de la Maestría en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias, es decir la formación de recursos humanos en el uso de tecnologías e información de origen espacial para la gestión de emergencias y para aplicaciones en salud, la presente tesis hace un importante aporte al estudio de la dinámica de los aerosoles atmosféricos en áreas urbanas mediante el uso de información satelital, una disciplina que en nuestro país no ha sido aún muy desarrollada.

7.1 Proyecciones a futuro

Sería interesante, como futuras líneas de investigación a partir de este trabajo, el desarrollo de un modelo adecuado para poder estimar PM en superficie a partir de AOD satelital. Para ello, se precisaría mejorar la validación con un mayor número de datos de AOD medidos con precisión en superficie (idealmente en distintas zonas de la ciudad y también en el área rural) en un período de tiempo considerable (dos años al menos). En segundo lugar, habiendo obtenido una validación aceptable, sería importante también contar con datos de material particulado medido desde superficie (también en distintas áreas de la ciudad y el área rural) en un período de tiempo considerable (cubriendo al menos un ciclo anual) y con frecuencia horaria. A partir de una buena validación y los datos de material particulado medidos en distintas áreas de la ciudad, se debería desarrollar un modelo más complejo que incorpore la contribución de otras variables, además de las meteorológicas tales como usos de suelo, intensidad de tránsito, inventarios de emisión, tipos de aerosoles predominantes, modelos de dispersión química, entre otras.

Otra importante línea de investigación es la de realizar estudios similares en otras ciudades de Argentina y comparar sus resultados. Además, se considera interesante el estudio del transporte de aerosoles atmosféricos a escala continental, particularmente durante la época de quema de biomasa y el estudio de la incidencia de este transporte a la carga de aerosoles en la ciudad de Córdoba. Finalmente, sería de gran interés evaluar la relación entre los niveles de aerosoles estimados mediante AOD y enfermedades relacionadas con el particulado atmosférico.

Por otro lado, siendo los aerosoles atmosféricos uno de los principales contaminantes considerados en estudios de calidad del aire, por sus efectos en la salud humana, esta tesis sienta las bases para futuros estudios epidemiológicos y de gestión de emergencias ante eventos de quema de biomasa en áreas cercanas a asentamientos urbanos.

Bibliografía

- Anderson, H. 1999. Health effects of air pollution episodes, K. H. M. R. E. Samet, J., Ed. Air Pollution and Health. Academic Press, London.
- Aragao, L.E., Malhi, Y., Barbier, N., Lima, A., Shimabukuro, Y., Anderson, L., Saatchi, S., 2008. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363, 1779–1785.
- Armenteras, D., Romero, M., Galindo, G., 2005. Vegetation fire in the savannas of the Llanos Orientales of Colombia. *World Resources Rev.*, 17 (4), 531–543.
- Arvani, B; Pierce, RB; Lyapustin, AI; Wang, YJ; Ghermandi, G; Teggi, S (2016). Seasonal monitoring and estimation of regional aerosol distribution over Po valley, northern Italy, using a high-resolution MAIAC product. *Atmospheric Environment*, 141, 106-121
- Asmi, E. y Kondratyev, V. and Brus, D. and Laurila, T. and Lihavainen, H. and Backman, J. and Vakkari, V. and Aurela, M. and Hatakka, J. and Viisanen, Y. and Uttal, T. and Ivakhov, V. and Makshtas, A. 2016. Aerosol size distribution seasonal characteristics measured in Tiksi, Russian Arctic. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 1271–1287.
- Barnaba, F., Putaud, J. P., Gruening, C., dell' Acqua, A., Dos Santos, S. 2010. Annual cycle in co-located in situ total-column, and height-resolved aerosol observations in the Po Valley (Italy): Implications for ground-level particulate matter mass concentration estimation from remote sensing. *Journal of Geophysical Research* 115.
- Baumer, D., Rinke, R., Vogel, B. 2008. Weekly periodicities of Aerosol Optical Thickness over Central Europe – evidence of an anthropogenic direct aerosol effect. *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 83–90.
- Bilos, C., Colombo, J.C., Skorupka, C.N., Rodriguez Presa, M.J. 2001. Sources, distribution and variability of airborne trace metals in La Plata City area, Argentina. *Environmental Pollution*, 111, 149-158.
- Bogo, H., Otero, M., Castro, P., Ozafran, M.J., Kreiner, A., Calvo, E.J., Negri, R.M. 2003. Study of atmospheric particulate matter in Buenos Aires city, *Atmospheric Environment*, 37, 1135–1147.
- Carreras, H.A., Pignata, M.L. 2002. Biomonitoring of heavy metals and air quality in Cordoba City, Argentina, using transplanted lichens. *Environmental Pollution*, 117 77–87.
- Carreras, H.A., Pignata, M.L., Saldiva, P.H.N. 2006. In situ monitoring of urban air in Córdoba, Argentina using the *Tradescantia-micronucleus* (Trad-MCN) bioassay. *Atmospheric Environment*, 40, 7824–7830.
- Castro-Videla, F., Barnaba, F., Angelini, F., Cremades, P., Gobbi, G.P. 2013. The relative role of Amazonian and non-Amazonian fires in building up the aerosol optical depth in South America: A five year study (2005-2009). *Atmospheric Research*, 122, 298–309.
- Cheung, H.C., Wang, T., Baumann, K. and Guo, H. 2005. Influence of regional pollution outflow on the concentrations of fine particulate matter and visibility in the coastal area of southern China. *Atmospheric Environment*, 39, 6463–6474.
- Chudnovsky, A.A., Koutrakis, P., Kloog, I., Melly, S., Nordio, F., Lyapustin, A., Wang, Y., Schwartz J. 2014. Fine particulate matter predictions using high resolution Aerosol Optical Depth (AOD) retrievals. *Atmospheric Environment*, 89, 189-198.
- Chuvieco, E. 2010. *Teledetección Ambiental*, 3a Edición. Ed. Ariel.

- Crumeyrolle, S., Chen, G., Ziemba, L., Beyersdorf, A., Thornhill, L., Winstead, E., Moore, R.H., Shook, M.A., Hudgins, C., Anderson, B.E. 2014. Factors that influence surface PM_{2.5} values inferred from satellite observations: perspective gained for the US Baltimore–Washington metropolitan area during DISCOVER-AQ. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(4), 2139–2153.
- Davies, S.J., Unam, L. 1999. Smoke-haze from the 1997 Indonesian forest fires: effects on pollution levels, local climate, atmospheric CO₂ concentrations, and tree photosynthesis. *Forest Ecology and Management*, 124 (2–3), 137–144.
- De Sario, M., Katsouyanni, K., Michelozzi, P. 2013. Climate change, extreme weather events, air pollution and respiratory health in Europe, *European Respiratory Journal*, 42 (3), 826–843.
- Di Girolamo, L., T. C. Bond, D. Bramer, D. J. Diner, F. Fetting, R. A. Kahn, J. V. Martonchik, M. V. Ramana, V. Ramanathan, and P. J. Rasch. 2004. Analysis of Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) aerosol optical depths over greater India during winter 2001–2004, *Geophysics Research Letters*, 31.
- Dos Santos, M., Gómez, D., Dawidowski, L., Gautier, E., Smichowski, P. 2009. Determination of water-soluble and insoluble compounds in size classified airborne particulate matter, *Microchemical Journal*, 91, 133–139.
- Engel-Cox, J.A, Hoff, R.M, Rogers, R., Dimmick, F., Rush, A.C, JSzykman, J.J, Al-Saadi, J, Chu, D.A, Zell, E.R. 2006. Integrating lidar and satellite optical depth with ambient monitoring for 3-dimensional particulate characterization. *Atmospheric Environment*, 40 (40), 8056–8067.
- Engel-Cox, J. A., Holloman, C. H., Coutant, B. W., Hoff, R. M. 2014. Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality. *Atmospheric Environment*, 38, 2495–2509.
- Finlayson-Pitts, B. J. y Pitts, J. 2000. Theory, experiments, and applications, in: *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*, primera edición, San Diego, Academic Press.
- Freitas, S.R., Longo, K.M., Diasb, M.A.F.S., Diasb, P.L.S., Chatfield, R., Prins, E., Artaxo, P., Grell, G. A., Recuero, F.S. 2005. Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America,” *Environmental Fluid Mechanics*, 5 (1-2), 135–167.
- García Ferreyra M.F. 2014. Obtención de mapas de calidad de aire, a través de la implementación y primera aplicación del modelo de transporte químico CHIMERE sobre Argentina. Tesis: Magíster en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias (Instituto de Altos estudios Espaciales ‘Mario Gulich’, CONAE-FAMAF/UNC).
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C.O., Kaufman, Y.J. 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS Remote Sensing of Environment, 87 273–282.
- Glauber Lopes, M. 2012. Southern Brazil: analysis of aerosols from different sources through the sensors MODIS and CALIOP. *Revista Boliviana de Física*, 20 (20), 21–23.
- Grantz, D.A., Garner, J.H.B., Johnson, D.W. 2003. Ecological effects of particulate matter. *Environment International*, 29: 213–219.
- Griggs, M. 1975. Measurements of atmospheric aerosol optical thickness over water using ERTS-1 data. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 25: 622–626.
- Gueymard, C.A. y George, R. 2005. Gridded aerosol optical depth climatological datasets over continents for solar radiation modeling. Solar World Congress, Orlando, FL, International Solar Energy Society.
- Gupta, P., y Christopher, S.A. 2009. Particulate matter air quality assessment using integrated surface, satellite, and meteorological products: Multiple regression approach. *Journal of Geophysical Research*, 114, D14205.

- Harrison, R.M., Yin, J. 2000. Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health? *Science of the Total Environment*, 249 (1–3), 85–101.
- Herman, J.R., P.K. Bhartia, O. Torres, C. Hsu, C. Seftor y E. Celarier. 1997. Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data. *Journal of Geophysics. Research*, 102 (14), 16911-16922.
- Higurashi, A. y Nakajima, T. 1999. Development of a two channel aerosol retrieval algorithm on global scale using NOAA AVHRR. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56: 924–941.
- Hoff, R.M, y Christopher, S.A. 2009. Remote Sensing of Particulate Pollution from Space: Have We Reached the Promised Land? *Journal of the Air & Waste Management Association*, 59, 645– 675.
- Hsu, N.C., Tsay, S.-C., King, M.D., and Herman, J.R. 2004. Aerosol properties over bright-reflecting source regions, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42, 557–569.
- Hui Li, Fazlay Faruque, Worth Williams, Mohammad Al-Hamdan, Jeffrey Luvall, William Crosson, Douglas Rickman, Ashutosh Limaye, Optimal temporal scale for the correlation of AOD and ground measurements of PM_{2.5} in a real-time air quality estimation system, *Atmospheric Environment*, Volume 43, Issue 28, September 2009, Pages 4303-4310.
- IARC- International Agency for Research on Cancer, 2013. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: Outdoor air pollution. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer.
- Ichoku, C. D., Chu, A., Mattoo, S., Kaufman, Y. J., Remer, L. A., Tanre, D., Slutsker, I., and Holben, B. N. , 2002. A spatial-temporal approach for global validation and analysis of MODIS aerosol products, *Geophys. Res. Lett.*, 29(12), 8006.
- Ichoku, C., Kaufman, Y.J., 2005. A method to derive smoke emission rates from MODIS fire radiative energy measurements. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 43 (11), 2636–2649.
- INDEC. 2010. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas. <http://www.indec.gov.ar/>
- IPC 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., and Miller H.L.. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996. ISBN 978 0521 88009-1.
- Jeong, M.J., Li, Z., Chu, D.A., Tsay, S.C. 2005. Quality and compatibility analyses of global aerosol products derived from the advanced very high resolution radiometer and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. *Journal of Geophysics Research*, 110 (D10).
- Jeoung, H., Chung, C.E, Noije, T.V., Takemurawayoung T. 2014. Relationship between fine-mode AOD and precipitation on seasonal and interannual time scales. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* Vol. 66 (1).
- Jerrett, M., Burnett, R.T., Ma, R., Pope, C.A., Krewski, D., Newbold, K.B, Thurston, G., Shi, Y., Finkelstein, N., Calle, E.E., Thun, M.J. 2005. Spatial Analysis of Air Pollution and Mortality in Los Angeles. *Epidemiology*, 16, 727–736.
- Jia, X., Cheng, T., Chen, J., Xu, J., Chen, Y. 2012. Columnar Optical Depth and Vertical Distribution of Aerosols over Shanghai. *Aerosol and Air Quality Research*, 12, 320–330.
- Kan, H., Chen, R., Tong, S.2012. Ambient air pollution, climate change, and population health in China. *Environment International*, 42, 10–19.
- Kaufman, Y.J., Tanr, D., Gordon, H.R., Nakajima, T., Lenoble, J., Frouins, R., Grass, H., Herman, B.M., King, M.D., Teillet, P.M. 1997. Passive remote sensing of tropospheric aerosol and

- atmospheric correction for the aerosol effect. *Journal of Geophysical Research*, 102 (14), 815-830.
- Kim, M., Zhang, X., Holt, J.B, Liu, Y. 2013. Spatio-Temporal Variations in the Associations between hourly PM_{2.5} and Aerosol Optical Depth (AOD) from MODIS Sensors on Terra and Aqua. *Health*, 5, 8-13.
- Kim, K.H., Kabir, E., Kabir, S. 2015. A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International*, 74, 136–143.
- King, M.D., Kaufman, Y.J., Tanré, D., Nakajima, T. 1999. Remote Sensing of Tropospheric Aerosols from Space: Past, Present, and Future. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80 (11), 2229-2259.
- Kloog, I., Koutrakis, P., Coull, B.A., Lee, H.J., Schwartz, J. 2011. Assessing temporally and spatially resolved PM_{2.5} exposures for epidemiological studies using satellite aerosol optical depth measurements. *Atmospheric Environment*, 45 (35), 6267-6275.
- Kloog, I., Coull, B.A., Zanobetti, A., Koutrakis, P., Schwartz, J.D. 2012. Acute and chronic effects of particles on hospital admissions in New-England. *PLoS One*, 7 (4), e34664.
- Kloog, I., Sorek-Hamer, M., Lyapustin, A., Coull, B., Wang, Y., Just, A.C., Schwartz, J., Broday, D.M. 2015. Estimating daily PM_{2.5} and PM₁₀ across the complex geo-climate region of Israel using MAIAC satellite-based AOD data. *Atmospheric Environment*, 122, 409-416.
- Kokhanovsky, A.A., Breon, F.M., Cacciari, A., Carboni, E., Diner, D., Nicolantonio, W.D., Grainger, R.G., Grey, W.M.F., Holler, R., Lee, K.H., Li, Z., North, P.R.J., Sayer, A., Thomas, G. von Hoyningen-Huene, W. 2007. Aerosol remote sensing over land: Satellite retrievals using different algorithms and instruments. *Atmospheric Research*, 85, 372–394.
- Korc, M.E., Figari Bello, A., Bravo Ordóñez, A., Pareja, J.I. 2000. Diagnóstico de las emisiones del parque automotor del área metropolitana de Lima y Callao. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- Kumar, A. 2015. Spatio-temporal synoptic variability of aerosol optical depth and cloud properties over the Central North region of India through MODIS collection V satellite sensors. *Indian Journal of Physics*, 90 (6), 613–625.
- Larrieu, S., Jusot, J.F., Blanchard, M., Prouvost, H., Declercq, C., Fabre, P., Pascal, L., Le Tertre, A., Wagner, V., Rivière, S., Chardon, B., Borrelli, D., Cassadou, S., Eilstein, D., Lefranc A. 2007. Short term effects of air pollution on hospitalizations for cardiovascular diseases in eight French cities: The PSAS program. *Science of the Total Environment*, 387, 105–112.
- Lee, H. J., Liu, Y., Coull, B. A., Schwartz, J., Koutrakis, P. 2011. A novel calibration approach of MODIS AOD data to predict PM_{2.5} concentrations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 7991–8002.
- Levy, R. C., Remer, L. A., Mattoo, S., Vermote, E. F., Kaufman, Y.J. 2007. Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance *Journal of Geophysics Research*, 112.
- Levy, R.C., Mattoo, S., Munchak, L.A., Remer, L.A., Sayer, A.M., Patadia, F., Hsu¹, N.C. 2009. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmospheric Measurements Techniques*, 6, 2989-3034.
- Lijteroff, R., Cortinez, V., Raba, J. 1999. Urban Development and Air Quality in San Luis City, Argentina, *Environmental Monitoring and Assessment*, 57 (2), 169-182.
- Liu, Y., Paciorek, C.J., Koutrakis, P. 2009. Estimating Regional Spatial and Temporal Variability of PM_{2.5} Concentrations Using Satellite Data, Meteorology, and Land Use Information. *Environmental Health Perspectives*, 117 (6), 886-892.

- Liu, J.C., Pereira, G., Uhl, S.A., Bravo, M.A., Bell, M. L. 2015. A systematic review of the physical health impacts from non-occupational exposure to wildfire smoke. *Environmental Research*, 136, 120–132.
- Lohmann, U. y Feichter J. 2005. Global indirect aerosol effects: a review. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 715–737.
- López, M.L., Ceppi, S., Palancar, G.G, Olcese, L.E., Tirao, G., Toselli, B.M. 2011. Elemental concentration and source identification of PM10 and PM2.5 by SR-XRF in Córdoba City, Argentina. *Atmospheric Environment*, 45 (31), 5450-5457.
- Lyapustin, A. I., Wang, Y., Laszlo, I., Kahn, R., Korkin, S., Remer, L., Levy, R., Reid, J.S. 2011. Multi-angle implementation of atmospheric correction for MODIS (MAIAC): 2. Aerosol algorithm. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 116.
- Lyapustin, A., Wang, Y., Laszlo, I., Korkin S. 2012. Improved cloud and snow screening in MAIAC aerosol retrievals using spectral and spatial analysis. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5 (4), 843-850.
- Ma, N. y Birmili, W. 2015. Estimating the contribution of photochemical particle formation to ultrafine particle number averages in an urban atmosphere, *Science of the Total Environment*, 512/513, 154–166.
- Magallanes, J.F., Murruni, L., Gómez, D., Smichowski, P., Gettar, R. 2008. An approach to air pollution source–receptor solution by angular distances. *Water, Air, Soil Pollution* 188, 235–245.
- Mao, Y. H., Li, Q. B., Chen, D., Zhang, L., Hao, W.-M., Liou, K.-N. 2014. Top-down estimates of biomass burning emissions of black carbon in the Western United States. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 7195-7211.
- Martonchik, J.V., Diner, D.J., Pinty, B., Verstraete, M.M., Myneni, R.B., Knyazikhin, Y., Gordon, H.R. 1998. Determination of Land and Ocean Reflective, Radiative, and Biophysical Properties Using Multiangle Imaging. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36 (4), 1266-1281.
- Martonchik, J.V., D.J. Diner, K.A. Crean and M.A. Bull. 2002. Regional Aerosol Retrieval Results from MISR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, 1520-1531.
- Mészáros E. 2000. *Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry*. Akadémiai Kiadó, Budapest. 308. ISBN 9630576246.
- Morata, D., Polvé, M., Valdés, A., Belmar, M., Dinator, M.I., Silva, M., Leiva, M.A., Aigouy, T., Morales, J.R. 2008. Characterization of aerosol from Santiago, Chile: an integrated PIXE–SEM–EDX study, *Environ. Geol.* 56, 81–95.
- More, S., Pradeep Kumar, P., Gupta, P., Devara, P.C.S., Aher, G.R. 2013. Comparison of Aerosol Products Retrieved from AERONET, MICROTOPS and MODIS over a Tropical Urban City, Pune, India. *Aerosol and Air Quality Research*, 13, 107–121.
- Municipalidad de Bahía Blanca, Subsecretaría de Gestión Ambiental, Comité Técnico Ejecutivo (Ley 12.530). Programa Integral de Monitoreo Polo Petroquímico y Área Portuaria del Distrito de Bahía Blanca (2002-2005). Sexta Auditoría.
- Municipalidad de Córdoba, 2012. *Guía Estadística 2012 - Córdoba una ciudad de cifras*
- Murruni, L.G., Solanes, V., Debray, M., Kreiner, A.J., Davidson, J., Davidson, M., Vázquez, M., Ozafrán, M. 2009. Concentrations and elemental composition of particulate matter in the Buenos Aires underground system, *Atmospheric Environment* 43, 4577–4583.
- Naeher, L., Brauer, M., Lipsett, M., Zelikoff, J., Simpson, C., Koenig, J., Smith, K. 2007. Woodsmoke health effects: a review. *Inhalation Toxicology*, 19 (1), 67–106.

- Nichol, J.E., Bilal, M., 2016. Validation of MODIS 3 km Resolution Aerosol Optical Depth Retrievals Over Asia. *Remote Sensing* 8(4), 328.
- Olcese, L.E., Toselli, B.M. 2002. Some aspects of air pollution in Córdoba, Argentina. *Atmospheric Environment*, 36, 299–306.
- OMS, 2005. WHO: World Health Organization. “Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide –Global Update 2005”.WHO Press.
- OMS, 2014. WHO: WHO’s Ambient Air Pollution database. Public Health, Social and Environmental Determinants of Health Department. WHO Press. <http://www.who.int/phe>.
- Pereira, G., Freitas, S.R., Moraes, E.C., Ferreira, N.J., Shimabukuro, Y., Rao, V., Longo, K.M., 2009. Estimating trace gas and aerosol emissions over South America: relationship between fire radiative energy released and aerosol optical depth observations. *Atmospheric Environment*, 43, 6388–6397.
- Petrenko, M., Kahn, R., Chin, M., Soja, A., Kucsera, T., Harshvardhan. 2012. The use of satellite-measured aerosol optical depth to constrain biomass burning emissions source strength in the global model GOCART. *Journal of Geophysics Research*, 117, D18212.
- Pope III C. A., Dockery D. W. 2006. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56, 709–742.
- Puliafito, S.E., Allende, D. 2007. Patrones de emisión de la contaminación urbana. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 42, 38-56.
- Rai, P.K, Panda L.L.S. 2014. Leaf dust deposition and its impact on biochemical aspect of some roadside plants of Aizawl, Mizoram, North East India. *International Research Journal of Environment Sciences*, 3(11), 14-19.
- Reich, S., Robledo, F., Gómez, D., Smichowski, P. 2008. Air pollution sources of PM10 in Buenos Aires City, *Environmental Monitoring Assessment*, 155, 191–204.
- Remer, L. A, Kaufman, Y. J., Tanré, D., Mattoo, S., Chu, D. A., Martins, J. V., Li, R., Ichoku, C., Levy, R.C., Kleidman, R.G., Eck, T.F., Vermote, E., Holben, B.N. 2005. The MODIS Aerosol Algorithm, Products, and Validation. *Journal of The Atmospheric Sciences - Special Section*, 62, 947-973.
- Sabbioni, C. 1995. Contribution of atmospheric deposition to the formation of damage layers. *Science of the Total Environment*, 167 (1), 49-55.
- Schafer, J.S., Eck, T.F., Holben, B.N., Artaxo, P., Duarte, A.F., 2008. Characterization of the optical properties of atmospheric aerosols in Amazonia from long-term AERONET monitoring (1993–1995 and 1999–2006). *Journal of Geophysics Research*, 113.
- Seinfeld, J. H. y Pandis, S. N. 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, John Wiley, New York.
- Shinozuka, Y., Clarke, A.D., Howell, S.G., Kapustin, V.N., McNaughton, C.S., Zhou, J., Anderson, B.E. 2007. Aircraft profiles of aerosol microphysics and optical properties over North America: aerosol optical depth and its association with PM2.5 and water uptake. *Journal of Geophysics. Research*, 112 (D12).
- Shrey, K., Suchit, A., Deepika, D., Shruti, K., Vibha, R. 2011. Air pollutants: The key stages in the pathway towards the development of cardiovascular disorders. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 31, 1–9.
- Sigsgaard, T., Forsberg, B., Annesi-Maesano, I., Blomberg, A., Bolling, A., Boman, C., Bonlokke, J., Brauer, M., Bruce, N., Heroux, M.-E., Hirvonen, M.-R., Kelly, F., Lundback, B., Moshhammer, H., Noonan, J., Pagels, G., Sallsten, J.-P., Sculier, M., Brunekreef, B. 2015. Health impacts of anthropogenic biomass burning in the developed world. *European Respiratory Journal*, 46(6), 1577–88.

- Spurny, K.R. 2000. *Aerosol Chemical Processes in the Environment*. Boca Raton, Florida, Lewis Publishers.
- Stein, A.F., Toselli, B.M., 1996. Street level air pollution in Córdoba City, Argentina. *Atmospheric Environment*, 30, 3491–3495.
- van Donkelaar, A., Martin, R.V., Brauer, M., Kahn, R., Levy, R., Verduzco, C., Villeneuve, P.J. 2010. Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application. *Environ Health Perspectives*, 118(6), 847-55.
- Wallace, J. y Kanaroglou, P. 2007. An investigation of air pollution in southern Ontario, Canada, with MODIS and MISR aerosol data, en: *Igarss: 2007 Ieee International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vols 1–12 – Sensing and Understanding*.
- Wang, Q., Saturno, J., Chi1, X., Walter, D., Lavric, J.V, Moran-Zuloaga1, D., Ditas, F., Pöhlker, C., Brito, J., Carbone, S., Artaxo, P., Andreae, M.O. 2016. Modeling investigation of light-absorbing aerosols in the Amazon Basin during the wet season. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 14775–14794.
- Xia, X., T. F. Eck, B. N. Holben, G. Phillippe, and H. Chen. 2008. Analysis of the weekly cycle of aerosol optical depth using AERONET and MODIS data, *J. Geophys. Res.*, 113, D14217.
- Xin, J., Wang, Y., Li, Z., Wang, P., Hao, W.M., Nordgren, B.L., Wang, S., Liu, G., Wang, L., Wen, T., Un, Y., Hu, B. 2007. Aerosol optical depth (AOD) and Ångström exponent of aerosols observed by the Chinese Sun Hazemeter Network from August 2004 to September 2005, *Journal of Geophysics Research*, 112.
- Yang, J.M, Qiu, J.H., Zhao, Y.L. 2010. Validation of Aerosol Optical Depth from Terra and Aqua MODIS Retrievals over a Tropical Coastal Site in China. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 3 (1), 36–39.
- Yap, X.Q. y Hashim, M. 2013. A robust calibration approach for PM10 prediction from MODIS aerosol optical depth. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 3517–3526.
- Zhang, Q., Ma, X., Tie, X., Huang, M., Zhao, C. 2009. Vertical distributions of aerosols under different weather conditions: Analysis of in-situ aircraft measurements in Beijing, China, *Atmospheric Environment*, Volume 43, Issue 34, 5526-5535.