

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MODELADO DE LA CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS PM<sub>10</sub> EN  
COSTA RICA MEDIANTE EL USO DEL MODELO WRF-CHEM

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de  
Estudios de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera para optar al grado  
y título de Maestría Académica en Ciencias de la Atmósfera

JEFF BRICEÑO CASTILLO

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2019

## DEDICATORIA

A mi padre:

Ronald Briceño Rodríguez

(descansa en paz)

A mi madre:

Ana Castillo Orozco

A mi esposa:

Sofía Carvajal Segura

El apoyo de ustedes fue lo que me mantuvo hasta el final de este proceso. ¡Gracias por siempre!

## AGRADECIMIENTOS

¡A Dios quien siempre guió mi posgrado y mi proyecto de tesis!

A mi familia quien siempre estuvo presente de todas formas, acompañándome en este largo proceso.

A mi comité de tesis: Dr. Germán Vidaurre, Dr. Erick Rivera y Dra. Ana María Durán.

A mi asesor Dr. Erick Rivera quien colaboró extensamente durante la ejecución de mi proyecto de tesis.

Al Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT) por becarme durante los años 2016 y 2017, con lo cual pude utilizar el equipo computacional del Colaboratorio Nacional de Computación Avanzada (CNCA) y contar con el apoyo profesional del personal de este laboratorio.

Al Laboratorio de Análisis Ambiental de la UNA por proveer los datos de la red de monitoreo de PM<sub>10</sub>. Además, por el apoyo económico para realizar una pasantía de investigación en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Al Dr. Agustín García del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) UNAM, por brindarme el primer acercamiento al manejo de GNU/Linux y el modelo WRF-Chem en sus instalaciones ubicadas en la Ciudad de México. También al M.Sc. Gilberto Maldonado por su amistad y colaboración dentro del campus universitario durante la estancia de investigación.

Al Sistema de Estudios de Posgrado (SEP-UCR) por brindarme apoyo económico para realizar una pasantía de investigación en la Universidade Federal de São João Del Rei, MG, Brasil.

Al Dr. Gabriel Pereira de la UFSJ-Brasil y su equipo de estudiantes, por brindarme apoyo en el uso del modelo WRF-Chem y ser un mediador ante la NOAA de los Estados Unidos. También al Dr. Guilherme Mataveli por su amistad y colaboración durante la estancia de investigación.

Al Instituto Meteorológico Nacional (IMN) por brindar los datos meteorológicos utilizados en este proyecto.

Al Dr. Heryn Monge, Bach. Alejandro Meza, M.Sc. Daniel Poleo, M.Sc. André Ribeiro y Dra. Marcela Loría. Gracias porque, de una u otra forma, contribuyeron a culminar esta maestría y mi proyecto de tesis.

“Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Ciencias de la Atmósfera.

ALVARO MORALES RAMIREZ (FIRMA) Firmado digitalmente por ALVARO MORALES RAMIREZ (FIRMA)  
Fecha: 2020.05.11 07:07:59 -06'00'

---

Dr. Álvaro Morales Ramírez  
**Decano Sistema de Estudios de Posgrado**

*German Vidaurre*

Dr. Germán Vidaurre Fallas  
**Profesor guía**

ANA MARIA DURAN QUESADA (FIRMA) Digitally signed by ANA MARIA DURAN QUESADA (FIRMA)  
Date: 2020.05.11 14:46:43 -06'00'

---

Dra. Ana María Durán Quesada  
**Lectora**

ERICK REINALDO RIVERA FERNANDEZ (FIRMA) Firmado digitalmente por ERICK REINALDO RIVERA FERNANDEZ (FIRMA)  
Fecha: 2020.05.10 16:39:33 -06'00'

---

Dr. Erick Rivera Fernández  
**Lector**

Firmado por RODRIGO ALBERTO CASTILLO RODRIGUEZ (FIRMA)  
PERSONA FISICA, CPF-01-1173-0270. Fecha declarada: 09/05/2020 04:05 PM  
Esta representación visual no es una fuente de confianza, valide siempre la firma.

---

Dr. Rodrigo Castillo Rodríguez  
**Director Programa de Posgrado  
Ciencias de la Atmósfera**

JEFF STEVE BRICEÑO CASTILLO (FIRMA) Firmado digitalmente por JEFF STEVE BRICEÑO CASTILLO (FIRMA)  
Fecha: 2020.05.09 09:40:51 -06'00'

---

Jeff Briceño Castillo  
**Candidato**

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	v
RESUMEN .....	viii
ABSTRACT .....	ix
RESUMO .....	x
LISTA DE CUADROS .....	xi
LISTA DE FIGURAS .....	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xv
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3 OBJETIVO GENERAL .....	4
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
2. MARCO TEÓRICO .....	6
2.1 EL SISTEMA ATMOSFÉRICO.....	6
2.1.1 Contaminantes primarios y secundarios.....	6
2.1.2 Meteorología y capa límite atmosférica .....	7
2.1.3 Transporte de contaminantes (viento y turbulencia).....	9
2.1.4 Remoción de contaminantes de la atmósfera: deposición seca y húmeda .....	11
2.1.5 Estándares de calidad del aire .....	14
2.1.6 Riesgos a la salud .....	17

2.2	PARTÍCULAS PM <sub>10</sub> .....	18
2.2.1	Definición y composición .....	18
2.2.2	Fuentes.....	20
2.2.3	Reacciones químicas involucradas .....	22
2.2.4	Medición .....	24
2.3	POLVO ATMOSFÉRICO .....	27
2.4	MODELADO DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS .....	27
2.4.1	Tipos de modelos .....	28
2.4.2	Utilización del modelo WRF-Chem.....	28
2.5	ESQUEMAS DE POLVO.....	34
2.5.1	Esquema de polvo GOCART.....	34
2.5.2	Esquema de polvo AFWA.....	35
2.5.3	Esquema de polvo UoC.....	35
3.	MARCO METODOLÓGICO .....	40
3.1	MODELADO DE PM <sub>10</sub> .....	40
3.2	CONFIGURACIÓN DEL MODELO .....	41
3.3	EVALUACIÓN DEL MODELO.....	44
3.3.1	Evaluación de PM <sub>10</sub> .....	44
3.3.2	Evaluación de lluvia y viento.....	49
4.	CARACTERIZACIÓN DE LA ATMÓSFERA DE INTERÉS.....	51
4.1	Atmósfera costarricense .....	51
4.2	Análisis sinóptico.....	52
4.3	PM <sub>10</sub> en Costa Rica.....	53
5.	RESULTADOS: Modelado de PM <sub>10</sub> .....	58
6.	RESULTADOS: Evaluación del modelo.....	69

6.1	Evaluación de PM <sub>10</sub> .....	69
6.2	Evaluación de lluvia y viento .....	79
6.2.1	Reanálisis .....	79
6.2.2	Mediciones meteorológicas .....	82
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	87
7.1	Modelado de PM <sub>10</sub> .....	88
7.2	Evaluación del modelo .....	90
8.	REFERENCIAS.....	93
9.	ANEXOS .....	102
9.1	Descripción del modelo .....	102
9.1.1	WRF .....	102
9.1.2	WPS .....	102
9.1.3	ARW-Solver.....	102
9.1.4	Post-processing and visualizations tools .....	103
9.2	WRF-Chem .....	103
9.3	Resultados de los niveles de concentración de PM <sub>10</sub> modelados.....	104

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se analizan, por primera vez en el país, los niveles de concentración de  $PM_{10}$ , utilizando simulaciones numéricas realizadas con el modelo WRF (Weather Research and Forecasting) y su acople químico. Además, se utilizan mediciones de  $PM_{10}$  provenientes de la Red de Monitoreo de Partículas de la Universidad Nacional, para evaluar el desempeño del modelo. En cuanto a las variables meteorológicas, los datos de Reanálisis ERA-Interim provenientes del ECMWF con resolución de 0,75 grados proveen las condiciones iniciales y de frontera para el modelo WRF-Chem.

El modelado se realizó durante el periodo del 01 al 15 de agosto del año 2013, tiempo en el cual se presencié un evento de intrusión de polvos provenientes del desierto de Sahara y el Sahel en la Capa Límite Atmosférica de Costa Rica. El dominio seleccionado para este proyecto va desde una latitud de  $0^{\circ}$  a  $40^{\circ}N$ , y una longitud desde los  $40^{\circ}E$  hasta los  $90^{\circ}O$ , con una resolución espacial de  $25 \times 25$  Km.

Para las simulaciones, se utilizaron 3 distintos esquemas de polvo: GOCART, GOCART con modificaciones AFWA, y GOCART con modificaciones UoC. Todos los esquemas evidenciaron niveles de concentración de  $PM_{10}$  durante el periodo del evento de intrusión de polvo al sector costarricense. Lo anterior permitió visualizar el transporte de polvo desde la región africana hasta el Caribe y Centroamérica, atravesando el Océano Atlántico producto de las condiciones meteorológicas.

En cuanto a las mediciones, el esquema de polvo AFWA obtuvo la mejor correlación; sin embargo, en relación con los demás parámetros estadísticos calculados, el esquema UoC obtuvo el mejor desempeño en la evaluación realizada. El error medio para este esquema obtuvo resultados muy acertados con respecto a las referencias consultadas. Algunos otros parámetros como la desviación estándar y la raíz del error cuadrático medio confirman que el esquema UoC obtuvo los resultados más favorables.

El análisis de lluvia y viento se utilizó como herramienta para la búsqueda de posibles errores en los resultados obtenidos. Por un lado, se concluyó que la lluvia modelada fue ligeramente distinta en relación con las observaciones, siendo esta una posible causa de error debido a la estrecha relación que tienen los aerosoles con esta variable. Por otro lado, la magnitud de viento simulada no presentó grandes diferencias respecto a las mediciones observadas.

El trabajo presentado es un primer paso hacia una gestión más efectiva de la calidad del aire en Costa Rica, debido a que el modelo toma en cuenta variables meteorológicas y características geográficas que permiten representar la contaminación atmosférica con un criterio técnico más completo. Los mandatarios encargados de la legislación ambiental y salud podrían utilizar como base este estudio para promover actividades operativas y de pronóstico de contaminantes atmosféricos que afectan la salud humana.



## ABSTRACT

In this study, for the first time in the country, the PM<sub>10</sub> concentration levels are analyzed, using numerical simulations performed with the WRF (Weather Research and Forecasting) model and its chemical coupling. Furthermore, PM<sub>10</sub> measurements from the Particle Monitoring Network of the Universidad Nacional of Costa Rica are used to evaluate the performance of the model. Regarding the meteorological variables, the ERA-Interim Reanalysis data from the ECMWF with a resolution of 0.75 degrees provide the initial and boundary conditions for the WRF-Chem model.

The modeling was carried out from 1 to 15 August 2013. During this period, an event of dust intrusion from the Sahara and Sahel desert was witnessed in the Atmospheric Boundary Layer of Costa Rica. The domain selected for this project ranges from a latitude of 0 ° to 40 ° N, and a longitude from 40 ° E to 90 ° W, with a spatial resolution of 25 x 25 km.

For the simulations, three different dust schemes were used: GOCART, GOCART with AFWA modifications, and GOCART with UoC modifications. All the schemes showed PM<sub>10</sub> concentration levels, during the period of the dust intrusion event, in the Costa Rican sector. This allowed to visualize the dust transport from the African region to the Caribbean and Central American one, crossing the Atlantic Ocean due to weather conditions.

The AFWA dust scheme obtained the best correlation in terms of measurements; however, regarding the other statistical parameters calculated, the UoC scheme obtained the best performance in the evaluation carried out. The mean error for this scheme obtained very accurate results with respect to the references consulted. Some other parameters such as the standard deviation and the root mean square error confirmed that the UoC scheme obtained the most favorable results.

The analysis of rain accumulation and wind magnitude was used as a tool to search for possible errors in the results obtained. On one hand, it was concluded that the modeled rain was slightly different regarding the observations, being a possible cause of error due to the close relationship that aerosols have with this variable in the atmospheric system. On the other hand, the simulated wind magnitude did not show major differences with the observed measurements.

The work presented is a first step towards a more effective management of air quality in Costa Rica, since the model takes into consideration meteorological variables and geographical features that allow air pollution representation with a more comprehensive technical criterion. The leaders responsible for the environmental and health legislation could use this study as a basis to promote operating and forecasting activities of air pollutants that affect human health.

## RESUMO

No presente trabalho, os níveis de concentração de  $PM_{10}$  são analisados pela primeira vez no país, usando simulações numéricas realizadas com o modelo WRF (Weather Research and Forecasting) e seu acoplamento químico. Além disso, as medições de  $PM_{10}$  da Rede de Monitoramento de Partículas da Universidade Nacional da Costa Rica são usadas para avaliar o desempenho do modelo. Com relação às variáveis meteorológicas, os dados de Reanálise ERA-Interim do ECMWF com uma resolução de 0,75 graus fornecem as condições iniciais e de fronteira para o modelo WRF-Chem.

A modelagem foi realizada de 1 a 15 de agosto de 2013, período em que um evento de intrusão de poeiras do deserto do Saara e do Sahel foi testemunhado na Camada Limite Atmosférica da Costa Rica. O domínio selecionado para este projeto vai de uma latitude de  $0^\circ$  a  $40^\circ$  N e uma longitude de  $40^\circ$  E a  $90^\circ$  W, com uma resolução espacial de 25 x 25 km.

Para as simulações, foram utilizados três esquemas de poeira diferentes: GOCART, GOCART com modificações AFWA e GOCART com modificações UoC. Todos os esquemas mostraram níveis de concentração de  $PM_{10}$  durante o período do evento de intrusão de poeira no setor da Costa Rica. Isso permitiu visualizar o transporte de poeira da região da África até o Caribe e a América Central, atravessando o Oceano Atlântico devido às condições climáticas.

Quanto às medições, o esquema de poeira AFWA obteve a melhor correlação; no entanto, em relação aos demais parâmetros estatísticos calculados, o esquema UoC obteve o melhor desempenho na avaliação realizada. O erro médio deste esquema obteve resultados muito precisos com respeito às referências consultadas. Alguns outros parâmetros, como o desvio padrão e a raiz do erro quadrático médio, confirmam que o esquema UoC obteve os resultados mais favoráveis.

A análise da precipitação acumulada e da magnitude do vento foi utilizada como ferramenta para buscar possíveis erros nos resultados obtidos. Por um lado, concluiu-se que a precipitação modelada foi ligeiramente diferente em relação às observações, sendo esta uma possível causa de erro devido à estreita relação que os aerossóis mantêm com essa variável no sistema atmosférico. Por outro lado, a magnitude do vento simulada não apresentou grandes diferenças em relação às medições observadas.

O trabalho apresentado é o primeiro passo para uma gestão mais eficaz da qualidade do ar na Costa Rica, dado que o modelo leva em consideração variáveis meteorológicas e características geográficas que permitem representar a poluição atmosférica com um critério técnico mais completo. Os mandatários responsáveis pela legislação ambiental e de saúde poderiam usar este estudo como base para promover atividades operacionais e de previsão de poluentes atmosféricos que afetam a saúde humana.

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 2.1</b> Normativas y estándares nacionales e internacionales de contaminantes criterio con sus principales afecciones.....	15
<b>Cuadro 2.2</b> Estimación de emisión de aerosoles según fuente y hemisferio para el año 2000. (Expresado en toneladas/año). Fuente: (IPCC, 2001) .....	21
<b>Cuadro 2.3</b> Principales tipos de modelos de contaminantes del aire. ....	30
<b>Cuadro 2.4</b> Principales pronósticos operacionales y experimentales de la calidad del aire en los que se ha utilizado el modelo WRF-Chem.....	32
<b>Cuadro 2.5</b> Características generales de los esquemas de polvo GOCART, AFWA y UoC. ....	37
<b>Cuadro 3.1</b> Configuración del dominio para la simulación de partículas PM <sub>10</sub> en la GAM de Costa Rica mediante el modelo WRF-Chem.....	41
<b>Cuadro 3.2</b> Sitios de muestreo utilizados en la evaluación del modelo como datos observados en superficie. ....	48
<b>Cuadro 3.3</b> Datos utilizados en la evaluación de viento y lluvia del modelo WRF-Chem.....	49
<b>Cuadro 3.4</b> Estaciones meteorológicas utilizadas para la comparación de viento a 10 m, y lluvia obtenida en el modelo WRF-Chem. <sup>4</sup> .....	50
<b>Cuadro 4.1</b> Concentración promedio anual de partículas PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) obtenidas en el Área Metropolitana de Costa Rica para el año 2013. Fuente: LAA-UNA .....	54
<b>Cuadro 6.1</b> Evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Hatillo. ....	72
<b>Cuadro 6.2</b> Evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Uruca. ....	72
<b>Cuadro 6.3</b> Evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Alajuela. ....	73
<b>Cuadro 6.4</b> Resultado de parámetros estadísticos utilizando esquemas de polvo GOCART, AFWA y UoC. Sitio: Catedral Metropolitana, San José.....	75

<b>Cuadro 6.5</b> Resultado de parámetros estadísticos utilizando esquemas de polvo GOCART, AFWA y UoC. Resumen de todos los sitios de medición.....	77
<b>Cuadro 9.1</b> Resultados de PM <sub>10</sub> simulado y evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Hatillo.....	104
<b>Cuadro 9.2</b> Resultados de PM <sub>10</sub> simulado y evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Uruca. ....	104
<b>Cuadro 9.3</b> Resultados de PM <sub>10</sub> simulado y evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Alajuela.....	105
<b>Cuadro 9.4</b> Resultados de PM <sub>10</sub> simulado y evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Hatillo.....	105
<b>Cuadro 9.5</b> Resultados de PM <sub>10</sub> simulado y evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Belén. ....	106
<b>Cuadro 9.6</b> Resultados de PM <sub>10</sub> simulado y evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Ferrocarril Cartago.....	106
<b>Cuadro 9.7</b> Resultados de PM <sub>10</sub> simulado y evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Santa Ana. ....	107
<b>Cuadro 9.8</b> Resultados de PM <sub>10</sub> simulado y evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Parque Industrial Cartago.....	107
<b>Cuadro 9.9</b> Resultados de PM <sub>10</sub> simulado y evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Moravia.....	108

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b> Ciclo diario de la estructura de la capa límite atmosférica. ....	8
<b>Figura 2.2</b> Expansión vertical de plumas continuas relacionadas con la estructura de la temperatura vertical. Las líneas punteadas corresponden a las tasas adiabáticas secas.....	10
<b>Figura 2.3</b> Marco conceptual de los procesos que se llevan a cabo en la deposición húmeda.. .....	13
<b>Figura 2.4.</b> Deposición de las partículas en el sistema respiratorio humano según su tamaño. ....	18
<b>Figura 2.5.</b> Esquema de una partícula de hollín de diésel.....	19
<b>Figura 2.6</b> Imagen de masa de polvo (ppb) a 850 hPa.....	22
<b>Figura 2.7.</b> (a) Medidor de partículas PM <sub>10</sub> marca TISCH con su (b) porta filtros y su (c) motor el cual succiona el aire ambiente. ....	25
<b>Figura 2.8</b> Diagrama ilustrativo del muestreo manual de partículas y sus respectivos análisis fisicoquímicos.....	26
<b>Figura 2.9.</b> Producción de polvo atmosférico. ....	27
<b>Figura 3.1.</b> Diagrama del proceso de modelado mediante el uso del WRF-Chem y la evaluación de su desempeño.....	40
<b>Figura 3.2</b> Dominio de estudio.....	42
<b>Figura 3.3</b> Capa de aire del desierto del Sahara. ....	43
<b>Figura 3.4.</b> Sitios de muestreo de partículas PM <sub>10</sub> en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica.....	47
<b>Figura 4.1</b> Comportamiento anual de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> encontrada en el sitio de muestreo ubicado en la Catedral Metropolitana de San José. Fuente: LAA-UNA.....	56
<b>Figura 4.2</b> Casos atendidos por enfermedades respiratorias por semanas epidemiológicas entre el 14 de julio al 24 agosto 2013.....	57
<b>Figura 5.1.</b> Condiciones iniciales para el modelado de polvo mediante el uso del WRF-Chem. ....	59

<b>Figura 5.2.</b> Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> en µg/m <sup>3</sup> , mediante la utilización del esquema de polvo GOCART. ....	60
<b>Figura 5.3.</b> Niveles de concentración de PM <sub>10</sub> en 9 puntos de medición de la GAM para el periodo comprendido entre julio y agosto 2013.....	61
<b>Figura 5.4.</b> Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> en µg/m <sup>3</sup> en superficie, mediante la utilización de los esquemas de polvo .....	62
<b>Figura 5.5.</b> Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> en µg/m <sup>3</sup> mediante la utilización del esquema de polvo .....	64
<b>Figura 5.6</b> Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> en µg/m <sup>3</sup> mediante la utilización de los esquemas de polvo .....	66
<b>Figura 6.1.</b> Concentración de partículas PM <sub>10</sub> en µg/m <sup>3</sup> (simulaciones y observaciones).....	71
<b>Figura 6.2</b> Magnitud de viento superficial en el dominio de estudio mediante la utilización del modelo WRF-Chem (25 km x 25 km, 1 hora) y CCMP (25 km x 25 km, 6 horas). ....	80
<b>Figura 6.3</b> Acumulado de lluvia en el dominio de estudio mediante la utilización del modelo WRF-Chem (25 km x 25 km, 1 hora) y Persiann-CDR (25 km x 25 km, 1 día).....	81
<b>Figura 6.4</b> Magnitud de viento (10 m) en el dominio de estudio mediante la utilización del modelo WRF-Chem (25 km x 25 km, 1 hora) y mediciones del IMN. ....	84
<b>Figura 6.5</b> Acumulado de lluvia en el dominio de estudio mediante la utilización del modelo WRF-Chem (25 km x 25 km, 1 hora) y mediciones del IMN.....	84

## LISTA DE ABREVIATURAS

**AFWA** Air Force Weather Agency (USA)

**CLA** Capa Límite Atmosférica

**COVs** Compuestos Orgánicos Volátiles

**GAM** Gran Área Metropolitana

**GOCART** The Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transport model

**HAP** Hidrocarburos aromáticos policíclicos

**LAA** Laboratorio de Análisis Ambiental

**MINAE** Ministerio de Ambiente y Energía

**MOPT** Ministerio de Obras Públicas y Transportes

**MS** Ministerio de Salud

**MSJ** Municipalidad de San José

**OMS** Organización Mundial de la Salud

**PM<sub>10</sub>** Material Particulado de 10  $\mu\text{m}$

**PM<sub>2.5</sub>** Material Particulado de 2.5  $\mu\text{m}$

**PST** Partículas Suspendidas Totales

**UNA** Universidad Nacional

**UoC** University of Cologne

**USEPA** Agencia de Protección Ambiental, Estados Unidos

**WRF** Weather Research and Forecasting Model



**Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.**

Yo, Jeff Briceño Castillo, con cédula de identidad 1-1346-0544, en mi condición de autor del TFG titulado Modelado de la concentración de partículas PM<sub>10</sub> en Costa Rica mediante el uso del modelo WRF-Chem

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI  NO \*

\*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: — año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

**INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:**

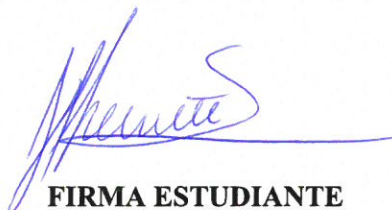
Nombre Completo: Jeff Briceño Castillo

Número de Carné: B28815 Número de cédula: 1-1346-0544

Correo Electrónico: jeff.briceno.c@gmail.com

Fecha: 18/marzo/2020 Número de teléfono: \_\_\_\_\_

Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): Dr. Germán Vidaurre Fattas

  
**FIRMA ESTUDIANTE**

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES

Todos los países, indistintamente de si están desarrollados, en vías de desarrollo o no desarrollados, sufren de contaminación del aire. Esto representa un importante riesgo medioambiental con efectos a la salud humana.

La contaminación del aire, según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés), es aquella que proviene de varias y diferentes fuentes: fuentes fijas como fábricas, plantas de producción energética, fuentes móviles como automóviles, autobuses, aviones, camiones, trenes, motocicletas; y las fuentes naturales como lo es el polvo arrastrado por el viento, y las erupciones volcánicas. La calidad del aire puede verse afectada de muchas maneras por la contaminación emitida por estas fuentes (EPA, 2016).

Las fuentes de contaminación del medio ambiente requieren medidas de control por parte de las ciudades, así como de las instancias tanto nacionales como internacionales. Tales medidas de control deben estar focalizadas en sectores tales como transporte, construcción, agricultura, industria, residuos, entre otros.

Costa Rica no se escapa de esta problemática, por lo que, desde hace más de una década, se empezó a trabajar en temáticas relacionadas con la contaminación y calidad del aire. El Ministerio de Salud (MS), el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), la Municipalidad de San José (MSJ), y la Universidad Nacional (UNA), han conformado una comisión de trabajo y cooperación interinstitucional con el objetivo de coordinar y potenciar esfuerzos en el área de la contaminación atmosférica y calidad del aire. Se han medido contaminantes atmosféricos criterio en la Gran Área Metropolitana (GAM), la cual es la región mayor poblada del país y en la que se concentra la mayor parte de la flota vehicular e industria nacional (INEC, 2011). Se ha dado a conocer públicamente informes

de calidad del aire, como también el Primer Inventario de Emisiones de contaminantes criterio de la GAM; este inventario es una herramienta dinámica para múltiples usos de modelado, evaluación de casos y elaboración de posibles panoramas mediante el establecimiento de normas y reglamentaciones (Herrera, 2010). Esta información se encuentra a disposición del público en la página web de la Dirección de Gestión de Calidad Ambiental de Costa Rica (DIGECA, 2011).

El Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) de la UNA ha realizado medición de agentes contaminantes atmosféricos tales como partículas suspendidas totales (PST), partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , dióxido de azufre ( $SO_2$ ), dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), iones y metales pesados presentes en el material particulado, así como también hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs). Actualmente, esta institución cuenta con una red de monitoreo de partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  con muestreos manuales que permiten la recolección y caracterización fisicoquímica de las partículas recolectadas.

A pesar de los grandes esfuerzos en materia de medición de contaminantes atmosféricos, aún existen grandes vacíos en medición automática de muchos de los contaminantes que se emiten a la atmósfera. Se requiere de actualización de inventarios de fuentes y caracterización de contaminantes, muchos de los cuales resultan ser nocivos para el ambiente y la salud humana. Además, en la actualidad no se encuentran trabajos publicados relacionados al modelado de agentes contaminantes atmosféricos en nuestro país, los que permitirían una adecuada y efectiva gestión de la calidad del aire.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), se estima que la contaminación del aire en las ciudades y zonas rurales de todo el mundo provoca cada año 3.7 millones de defunciones prematuras, lo cual representa uno de los mayores riesgos sanitarios mundiales, equiparados a los riesgos relacionados con el tabaco, y superado sólo por la hipertensión y la desnutrición.

La cardiopatía isquémica y accidente cerebrovascular, la neumonía obstructiva crónica o infección aguda de las vías respiratorias inferiores, y el cáncer de pulmón son, en ese orden, las enfermedades que lideran las muertes prematuras asociadas a la contaminación atmosférica. El Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer de la OMS determinó, en el año 2013, que la contaminación del aire es carcinógena para el ser humano; y que las partículas del aire contaminado están estrechamente relacionadas con la creciente incidencia del cáncer, especialmente con el cáncer de pulmón (OMS, 2018).

La contaminación atmosférica y la calidad del aire no se pueden considerar como un concepto aislado, de lo contrario su estudio no tendría conclusiones válidas. El clima y el estado de la atmósfera juegan un papel importante en lo que se refiere a este tema. Shumake-Guillemot et al. (2014) afirman que la comunidad científica puede asistir a los mandatarios en salud humana a entender y reducir los riesgos en salud debido a la mala calidad del aire a través de varias actividades como lo son:

- **Monitoreo:** este debe hacerse de manera efectiva en relevancia a la exposición de la población. El monitoreo de PM<sub>2.5</sub> debe tener la prioridad más alta, seguida por el monitoreo de ozono, de carbono negro, y de NO<sub>2</sub>.
- **Modelado:** mediante el estudio de casos y el modelado inverso, que permiten un mejor entendimiento de la dinámica y evolución

de los contaminantes atmosféricos; además, permite hacer estimaciones de emisiones.

- **Pronóstico:** para anticipar condiciones peligrosas específicas con el fin de tomar medidas para mejorar la calidad del aire, asesorar al público y, por ejemplo, proporcionar índices de la calidad del aire.
- **Proyecciones a largo plazo:** para pronosticar tendencias futuras y definir las áreas más problemáticas con el fin de establecer políticas y mejorar las ya existentes. Esto colabora con la protección de la salud humana y el medio ambiente (Shumake-Guillemot et al. 2014).

Según lo anterior, en Costa Rica existe la necesidad de modelar la concentración de contaminantes atmosféricos en el territorio nacional, tomando en cuenta las características físico-geográficas del país y las condiciones meteorológicas para promover una gestión más efectiva de la calidad del aire.

### 1.3 OBJETIVO GENERAL

- Modelar la concentración de partículas  $PM_{10}$  en Costa Rica mediante el uso del modelo Weather Research and Forecasting y su acople químico (WRF-Chem) utilizando un dominio que incluya el área de medición de este contaminante para evaluar la capacidad de las simulaciones de representar las concentraciones observadas durante un periodo definido de mediciones.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar la concentración de partículas  $PM_{10}$  en la región costarricense con el modelo WRF-Chem, utilizando una configuración con parametrizaciones físicas y químicas que se ajuste de forma razonable.

- Validar la simulación de partículas  $PM_{10}$  para la GAM utilizando la red de monitoreo de  $PM_{10}$  de la Universidad Nacional, lo que permitiría identificar la configuración del modelo WRF-Chem que mejor representa el transporte de estas partículas sobre el área de estudio.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 EL SISTEMA ATMOSFÉRICO**

Desde el punto de vista de los contaminantes atmosféricos, el sistema atmosférico tiene una secuencia en la cual el primer paso es la emisión de los contaminantes a la atmósfera, seguido de la dispersión de estos a sus alrededores inmediatos. Luego, los contaminantes pueden ser transportados a otros lugares, acarreados por corrientes y fenómenos atmosféricos. Durante su acarreo, estos contaminantes pueden sufrir transformaciones químicas o mantenerse con la misma naturaleza en la cual fueron emitidos. Una vez que suceden todos estos fenómenos, los contaminantes se removerán de la atmósfera por procesos de deposición seca o húmeda.

#### **2.1.1 Contaminantes primarios y secundarios**

Los contaminantes atmosféricos pueden clasificarse según su método de ingreso a la atmósfera en contaminantes primarios y secundarios. Los contaminantes primarios son: SO<sub>2</sub>, CO, NO, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y compuestos orgánicos. En esta lista se incluye también el Pb; todos ellos emitidos de forma directa, por lo cual se hacen llamar primarios. Las fuentes de estos contaminantes pueden ser antropogénicas, biogénicas, geogénicas o combinaciones de ellas. Una vez que estos contaminantes son liberados a la atmósfera son dispersados y transportados por efecto de la meteorología del sitio de emisión. Además, de forma simultánea, sufren transformaciones fisicoquímicas para dar origen a contaminantes secundarios en fase gaseosa o particulada (aerosoles). Los contaminantes secundarios son aquellos que resultan de las reacciones químicas de los contaminantes primarios y transformaciones físicas, tales como deposición y condensación. Ambos contaminantes (primarios y secundarios), son removidos en la superficie terrestre vía deposición húmeda o seca, impactando gran variedad de receptores como por ejemplo seres humanos, animales, ecosistemas acuáticos y otros (Finlayson-Pitts & Pitts, Jr., 2000).

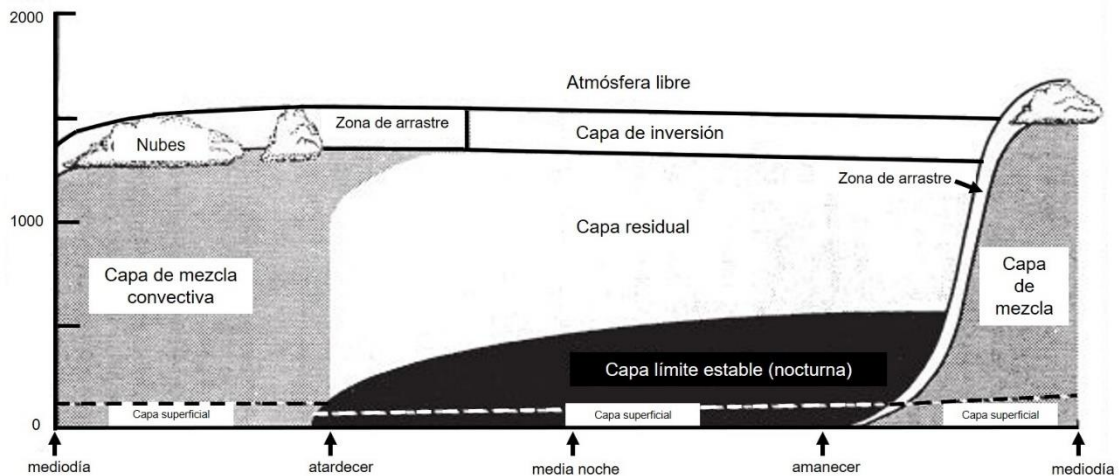
### 2.1.2 Meteorología y capa límite atmosférica

La intensidad de la contaminación está principalmente gobernada por las condiciones atmosféricas de la parte más baja de la tropósfera. La dispersión de los contaminantes emitidos es accionada mediante dos procesos distintos:

- horizontal: transporte debido al campo de vientos, lo cual explica el transporte a larga distancia de contaminantes de larga vida o persistentes;
- vertical: mezcla debido a la turbulencia atmosférica, la cual está inducida directamente por los efectos de la capa límite.

A su vez, la turbulencia atmosférica tiene dos fuentes; la turbulencia mecánica es inducida por la cizalla del viento vertical, en este caso el viento se ve limitado en la superficie terrestre. La turbulencia térmica, conocida también como convección, es inducida por el perfil vertical de la temperatura, la superficie terrestre se calienta durante el día por efecto de la radiación solar y se enfría durante la noche (Sportisse, 2008).

La capa límite atmosférica (CLA) es la capa más baja de la tropósfera y más cercana a la superficie terrestre, en donde la fricción decrece con la altura. La figura 2.1 muestra el ciclo diario de la estructura de la CLA, en donde, sobre la capa límite se sitúa una capa mayoritariamente estable (inversión) con turbulencia intermitente. Los procesos de cambio entre la CLA y la tropósfera toman lugar en una región conocida como zona de arrastre. El espesor de esta capa es de aproximadamente 10% de la CLA, la cual a su vez tiene un espesor entre 1 y 2 km sobre la tierra y aproximadamente de 0,5 km en los océanos. Para estratificaciones muy estables, el espesor de la CLA puede ser de aproximadamente 10 m o menos (Foken, 2008).



**Figura 2.1.** Ciclo diario de la estructura de la capa límite atmosférica.

Fuente: Stull (1998).

Para el estudio de la contaminación atmosférica es necesario conocer detalladamente la CLA de la región de interés. Un parámetro importante es el conocido como *capa de mezcla*, en esta se ubica el volumen en el cual los contaminantes emitidos son mezclados; es decir, define qué tanto se diluyen los contaminantes. La concentración de estos no solo está definida por la emisión, sino también por la altura de dilución, la cual varía en función de las condiciones meteorológicas. El estado de dilución de la CLA usualmente se clasifica según la estabilidad atmosférica en:

- CLA neutral;
- CLA inestable, correspondiente a una alta dilución; es decir, a una fuerte mezcla turbulenta;
- CLA estable, en donde los contaminantes se acumulan en la capa más superficial (a nivel del suelo), se caracteriza por una dilución débil y es típica en horas de la noche (Sportisse, 2008).



### **2.1.3 Transporte de contaminantes (viento y turbulencia)**

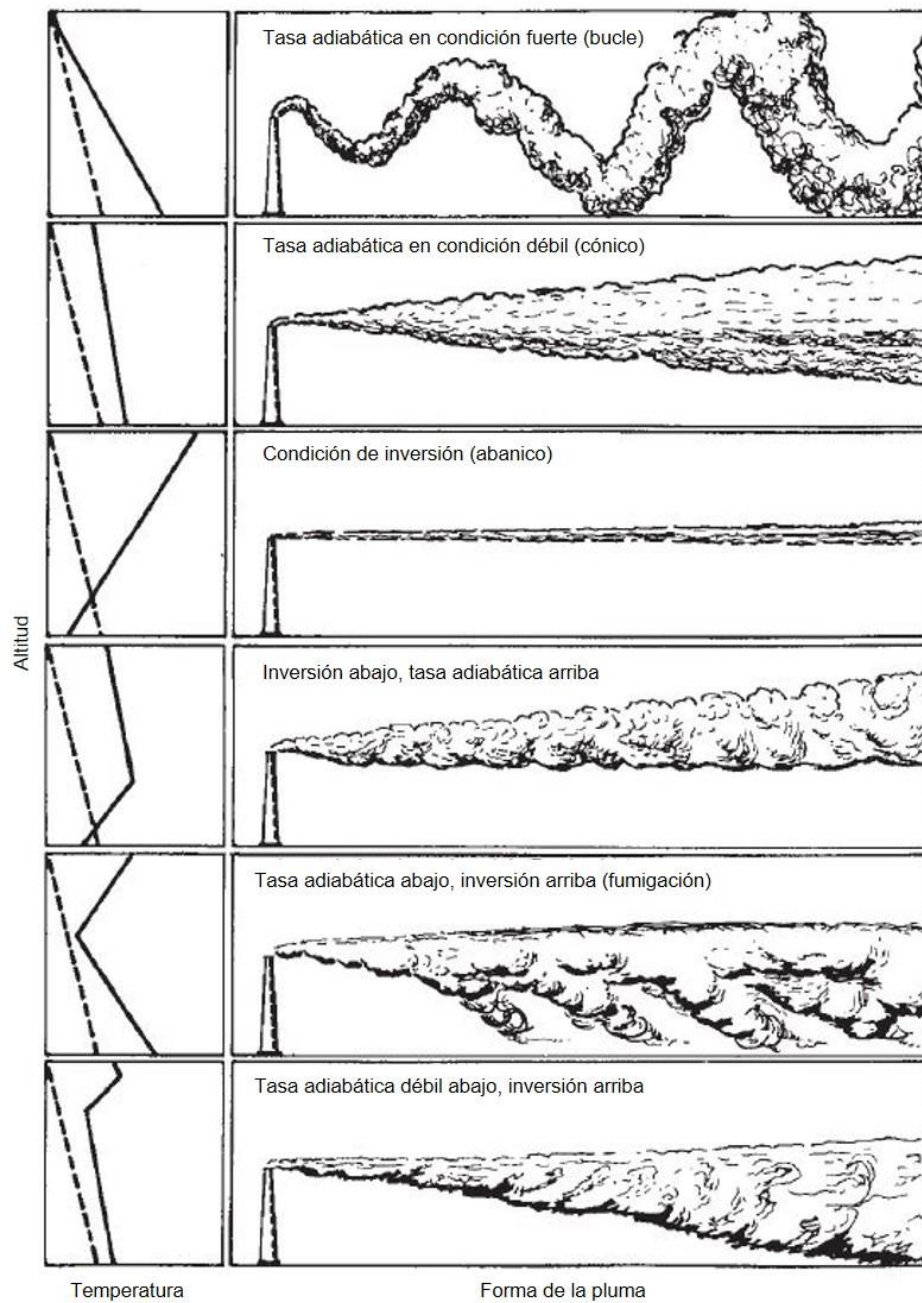
La velocidad y dirección del viento son los principales responsables del transporte de contaminantes una vez que han sido emitidos y dispersados al entorno que los rodea.

La concentración de los contaminantes del aire de fuentes puntuales es más sensible a la dirección que a la magnitud de su velocidad. Por ejemplo, si el viento sopla en dirección a su sumidero y sufre un cambio de tan solo 5° en su dirección, la concentración de contaminantes podría sufrir un descenso de hasta un 10% en condiciones inestables de su atmósfera. En condiciones de atmósfera neutral podría sufrir un descenso de un 50% y alrededor de un 90% en condiciones de estabilidad. La dirección del transporte de la pluma es muy importante al intentar evaluar el desempeño de un modelo a través de la comparación de la calidad del aire medida con las estimaciones del modelo (Vallero, 2008).

La dilución de los contaminantes es uno de los efectos de la velocidad del viento. Ya sea que una fuente esté en la superficie o en altura, esta dilución tiene lugar en la dirección del transporte de la pluma. Además, la velocidad del viento también afecta el tiempo de viaje de los contaminantes desde su fuente hasta su sumidero o receptor (Vallero, 2008).

Por otro lado, la turbulencia es un movimiento altamente irregular del viento. La atmósfera no fluye suavemente, pero tiene movimientos erráticos aparentemente aleatorios, que varían rápidamente. Este flujo desigual superpuesto al flujo medio tiene remolinos en una amplia gama de tamaños, de origen mecánico o térmico. El tamaño y, por lo tanto, la escala de los remolinos causados por la turbulencia térmica es mayor que la de los remolinos causados por la turbulencia mecánica. El tamaño y la influencia de los remolinos en la expansión vertical de las plumas continuas se han relacionado con la estructura vertical de la temperatura. En la figura 2.2 se muestran tres apariciones de plumas instantáneas relacionadas con tasas adiabáticas decrecientes y tres

apariciones de plumas instantáneas relacionadas con combinaciones de tasas adiabáticas.



**Figura 2.2** Expansión vertical de plumas continuas relacionadas con la estructura de la temperatura vertical. Las líneas punteadas corresponden a las tasas adiabáticas secas. Fuente: Vallero (2008).

#### **2.1.4 Remoción de contaminantes de la atmósfera: deposición seca y húmeda**

Tal y como se indicó anteriormente, la atmósfera remueve sus contaminantes mediante los procesos conocidos como deposición seca y deposición húmeda; la sumatoria de estos procesos se conoce como deposición total.

La deposición seca es el proceso mediante el cual las partículas y los gases son transferidos a la superficie como resultado de movimientos turbulentos de la atmósfera. El suelo, los océanos, la vegetación, las edificaciones, y algunas otras estructuras pueden ser estas superficies. Indiferentemente de la naturaleza de la superficie, la deposición seca se refiere únicamente a la fase en la cual los contaminantes son depositados. Por su parte, la deposición húmeda se refiere a la remoción de gases y partículas en la atmósfera a través de la incorporación en las gotas de agua que luego son precipitadas a la superficie terrestre por acción de la lluvia (American Meteorological Society, 2015).

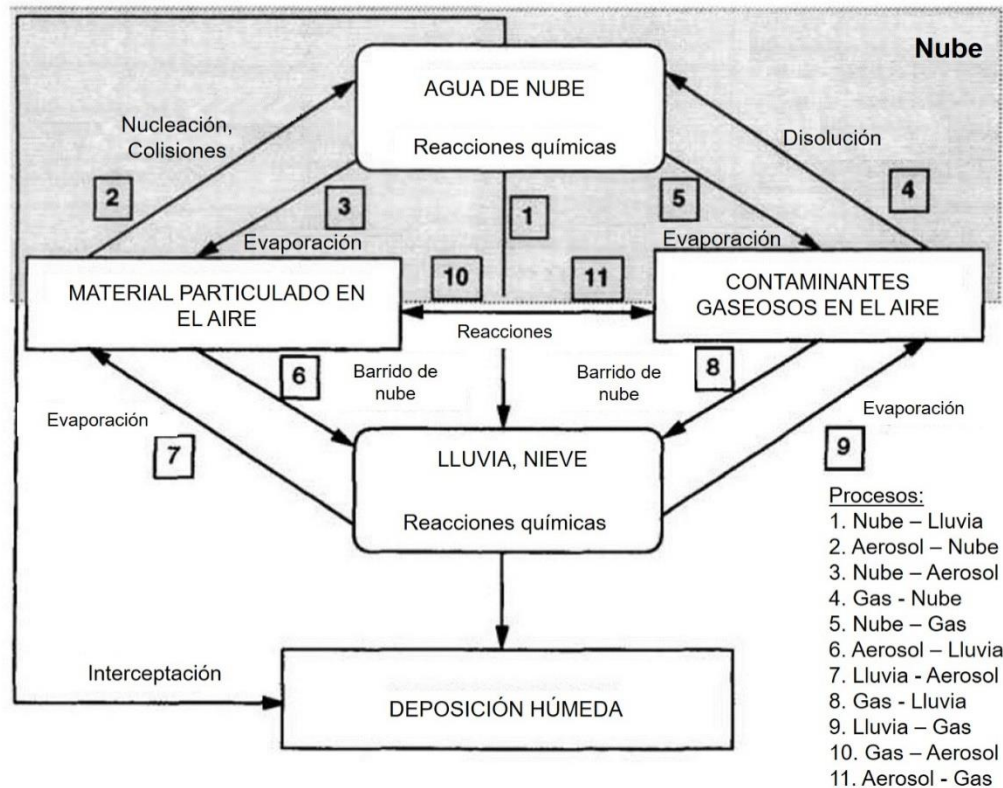
La importancia relativa de la deposición seca para la eliminación de una especie particular depende de los siguientes factores:

- Si la sustancia está presente en forma gaseosa o particulada.
- La solubilidad de la especie en agua.
- La cantidad de precipitación en la región.
- El terreno y el tipo de cubierta superficial.

Los factores que gobiernan la deposición seca de una especie gaseosa o una partícula son el nivel de turbulencia atmosférica, las propiedades químicas de la especie depositante y la naturaleza de la superficie en sí. El nivel de turbulencia en la atmósfera, especialmente en la capa más cercana al suelo, gobierna la velocidad a la que las especies se envían a la superficie. Para los gases, la solubilidad y la reactividad química pueden afectar la absorción en la

superficie. Para las partículas, el tamaño, la densidad y la forma pueden determinar si se produce la captura por la superficie. La superficie en sí misma es un factor en la deposición seca. Una superficie no reactiva puede no permitir la absorción o adsorción de ciertos gases; una superficie lisa puede conducir al rebote de partículas. Las superficies naturales, como la vegetación, mientras que en teoría son muy variables y, a menudo, difíciles de describir, generalmente promueven la deposición seca (Seinfeld & Pandis, 2006).

La deposición húmeda utiliza varios términos como lo son: barrido de precipitación, remoción húmeda, lavado y remoción por lluvia. En todos estos procesos, son necesarios tres pasos para la remoción húmeda de un material. Específicamente, la especie (gas o aerosol) primero debe llevarse a la presencia de agua condensada. Luego, las especies deben ser eliminadas por los hidrometeoros (nubes y niebla, lluvia, nieve) y, finalmente, deben ser enviadas a la superficie de la Tierra. Además, el compuesto puede sufrir transformaciones químicas durante cada uno de los pasos anteriores. Estos pasos de deposición húmeda se muestran en la figura 2.3. Es importante tomar en cuenta que casi todos los procesos son reversibles. Por ejemplo, la lluvia puede recoger partículas debajo de la nube, pero las gotas de lluvia que se evaporan producen nuevos aerosoles (Seinfeld & Pandis, 2006).



**Figura 2.3** Marco conceptual de los procesos que se llevan a cabo en la deposición húmeda. Fuente: Seinfeld y Pandis (2006).

Según Knippertz (2017), los procesos de remoción de aerosoles son una fuente importante de incertidumbre en los modelos, y su evaluación es difícil debido a las ubicaciones y los períodos para los cuales se dispone de observaciones in situ. Cerca de las regiones de origen, donde las partículas grandes están presentes y donde la precipitación es a menudo muy escasa, la deposición seca es generalmente el proceso dominante. Lejos de las fuentes, las partículas grandes ya se han depositado y, por lo tanto, la deposición húmeda es predominante (Bergametti et al., 1989). La deposición seca depende en gran medida de la distribución y forma del tamaño de las partículas, la densidad de la partícula y la "adherencia" de la superficie subyacente (por ejemplo, áreas vegetadas (Zhang, Gong, Padro y Barrie, 2001). La eficiencia de la deposición húmeda depende del tipo y la intensidad de la precipitación y la

distribución del tamaño de las gotas de lluvia. Estos parámetros a menudo no están representados de manera confiable en los modelos climáticos, por ejemplo, debido al uso de parametrizaciones simples para la lluvia convectiva. La eficiencia de la deposición húmeda también depende de la distribución del tamaño y las características químicas del aerosol de polvo (Bergametti y Forêt, 2014), otros dos parámetros que están cargados de una alta incertidumbre en los modelos de polvo.

### **2.1.5 Estándares de calidad del aire**

Los contaminantes atmosféricos se pueden clasificar en diferentes categorías; anteriormente se citó una clasificación acorde al método de ingreso a la atmósfera, en contaminantes primarios y secundarios. Si se toma en cuenta su abundancia e importancia en cuanto a los efectos a la salud se refiere, las especies químicas se pueden clasificar en contaminantes criterio y no criterio (traza). Los contaminantes criterio funcionan como estándares de la calidad del aire y entre ellos se pueden citar los siguientes:

- Monóxido de carbono, CO
- Dióxido de nitrógeno, NO<sub>2</sub>
- Dióxido de azufre, SO<sub>2</sub>
- Ozono, O<sub>3</sub>
- Material particulado
  - PM<sub>10</sub>
  - PM<sub>2.5</sub>
- Plomo, Pb

Por otro lado, entre los contaminantes no criterio o traza se encuentran el peroxiacetil nitrato (CH<sub>3</sub>C(O)OONO<sub>2</sub>, PAN), ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), formaldehído (HCHO), ácido fórmico (HCOOH), entre otros (Finlayson-Pitts & Pitts, Jr., 2000).

El cuadro 2.1 muestra la normativa nacional e internacional para los contaminantes criterio.

**Cuadro 2.1** Normativas y estándares nacionales e internacionales de contaminantes criterio con sus principales afecciones.

Contaminante	Escala temporal	<sup>a</sup> Norma Costa Rica	<sup>b</sup> Norma USEPA	<sup>c</sup> Norma europea	<sup>d</sup> Criterio OMS	Afección a la salud humana según USEPA
<b>Partículas PM<sub>10</sub></b>	24 horas	100 µg/m <sup>3</sup>	150 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>	Relación con enfermedades y muertes en padecimientos del corazón y pulmones. La exposición de los más vulnerables incrementa las atenciones médicas y emergencias en hospitales. Se asocia a arritmias y ataques cardíacos.
	Promedio anual	40 µg/m <sup>3</sup>	-	40 µg/m <sup>3</sup>	20 µg/m <sup>3</sup>	
<b>Partículas PM<sub>2.5</sub></b>	24 horas	35 µg/m <sup>3</sup>	35 µg/m <sup>3</sup>	-	25 µg/m <sup>3</sup>	Puede reducir la inmunidad a las infecciones pulmonares. Sibilancias, tos, gripe y bronquitis.
	Promedio anual	15 µg/m <sup>3</sup>	15 µg/m <sup>3</sup>	25 µg/m <sup>3</sup>	10 µg/m <sup>3</sup>	
<b>Dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub></b>	1 hora	191 µg/m <sup>3</sup>	190 µg/m <sup>3</sup>	200 µg/m <sup>3</sup>	200 µg/m <sup>3</sup>	Produce broncoconstricción. En niveles muy altos puede causar sibilancias, opresión en el pecho y dificultad para respirar. Exposición prolongada puede causar síntomas respiratorios y agravar el asma.
	Promedio anual	100 µg/m <sup>3</sup>	100 µg/m <sup>3</sup>	40 µg/m <sup>3</sup>	40 µg/m <sup>3</sup>	
<b>Dióxido de azufre SO<sub>2</sub></b>	10 minutos	-	-	-	500 µg/m <sup>3</sup>	Reduce la cantidad de oxígeno que llega a los órganos y tejidos del cuerpo. Niveles más altos puede afectar el estado de alerta mental y la visión.
	1 hora	200 µg/m <sup>3</sup>	980 µg/m <sup>3</sup>	350 µg/m <sup>3</sup>	-	
	3 horas	1330 µg/m <sup>3</sup>	650 µg/m <sup>3</sup>	-	-	
	24 horas	-	-	125 µg/m <sup>3</sup>	20 µg/m <sup>3</sup>	
<b>Monóxido de carbono CO</b>	1 hora	64 mg/m <sup>3</sup>	40 µg/m <sup>3</sup>	-	-	Irrita el sistema respiratorio, reduce función pulmonar, agrava el asma y otras enfermedades pulmonares.
	8 horas	16,5 mg/m <sup>3</sup>	10 mg/m <sup>3</sup>	10 mg/m <sup>3</sup>	-	
<b>Ozono O<sub>3</sub></b>	1 hora	200 µg/m <sup>3</sup>	-	-	-	
	8 horas	150 µg/m <sup>3</sup>	150 µg/m <sup>3</sup>	120 µg/m <sup>3</sup>	100 µg/m <sup>3</sup>	

<b>Contaminante</b>	<b>Escala temporal</b>	<b><sup>a</sup>Norma Costa Rica</b>	<b><sup>b</sup>Norma USEPA</b>	<b><sup>c</sup>Norma europea</b>	<b><sup>d</sup>Criterio OMS</b>	<b>Afección a la salud humana según USEPA</b>
<b>Plomo Pb</b>	3 meses	-	0,15 µg/m <sup>3</sup>	-	-	Puede afectar función renal, sistema inmunológico,
	Promedio anual	0,5 µg/m <sup>3</sup>	-	0,5 µg/m <sup>3</sup>	-	sistemas reproductivos y sistema cardiovascular.

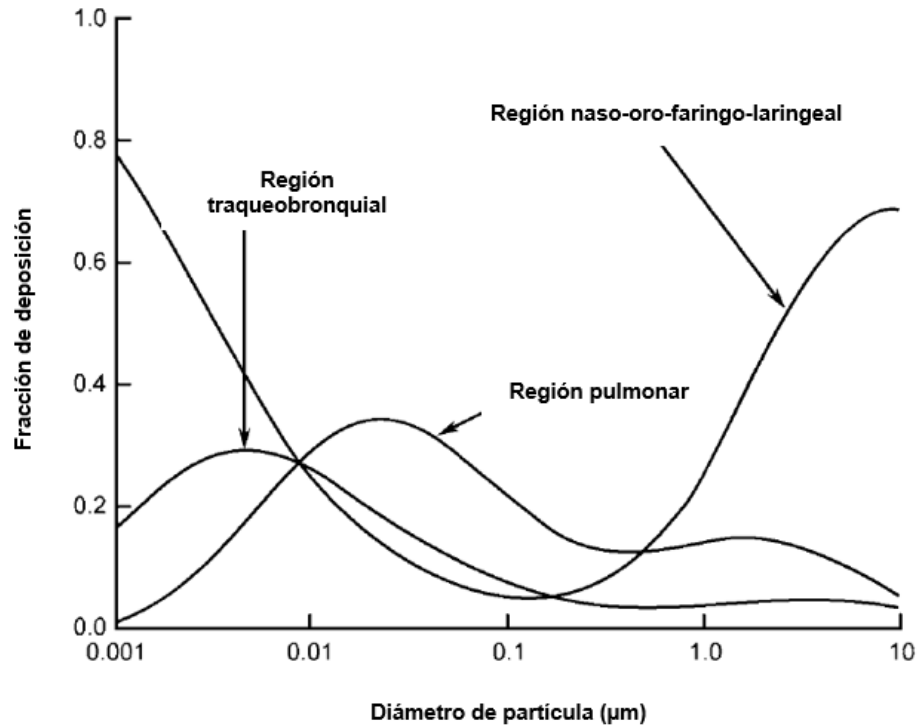
<sup>a</sup> Reglamento de calidad del aire para contaminantes criterio. Decreto N°39951-S. <sup>b</sup> National Ambient Air Quality Standards (NAAQS), USEPA.

<sup>c</sup> Air Quality Standards, European Commission. <sup>d</sup> Guías de calidad del aire de la OMS, Actualización mundial 2005.



### 2.1.6 Riesgos a la salud

Los efectos nocivos de los contaminantes del aire en los seres humanos han sido la principal razón de los esfuerzos realizados para comprender y controlar sus fuentes. En los gases, el principal factor que influye en ellos es la solubilidad de las moléculas gaseosas en las capas de las diferentes regiones del sistema respiratorio. En el caso de las partículas, el comportamiento que estas tienen en los pulmones depende de las características aerodinámicas de las mismas en la corriente de flujo. Las propiedades aerodinámicas de las partículas están relacionadas con su tamaño, forma, y densidad; la deposición de ellas en diferentes regiones del sistema respiratorio depende directamente de su tamaño. Las aberturas nasales permiten que partículas muy grandes de polvo logren entrar en la región nasal, junto con partículas mucho más finas que están presentes en el aire. Las partículas en la atmósfera pueden variar desde menos de  $0,01 \mu\text{m}$  a más de  $50 \mu\text{m}$  de diámetro. La relación entre el tamaño aerodinámico de las partículas y las regiones donde se depositan se muestra en la figura 2.4. Las partículas más grandes son depositadas en la región nasal por impactación en los vellos de la nariz o en las curvas de los conductos nasales. Las partículas más pequeñas pasan a través de la región nasal y se depositan en el sector traqueobronquial y las regiones pulmonares. Las partículas se eliminan por impactos con las paredes de los bronquios cuando son incapaces de seguir el flujo gaseoso a través de las bifurcaciones posteriores del árbol bronquial. A medida que el flujo de aire disminuye cerca de la terminal de los bronquios, las partículas más pequeñas se eliminan mediante movimiento browniano, que las empuja a la membrana alveolar (Vallero, 2008).



**Figura 2.4.** Deposición de las partículas en el sistema respiratorio humano según su tamaño.

Fuente: Finlayson-Pitts & Pitts, Jr. (2000)

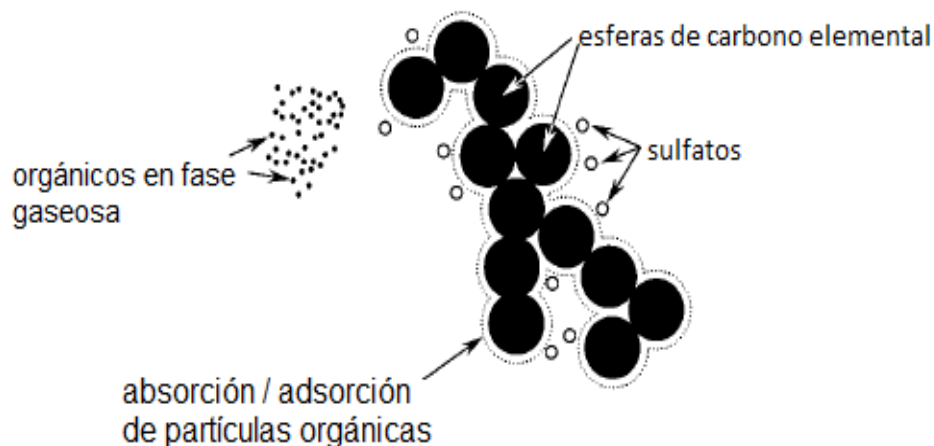
## 2.2 PARTÍCULAS $\text{PM}_{10}$

### 2.2.1 Definición y composición

Un aerosol se define como la suspensión de una partícula sólida o líquida fina en un gas. Los aerosoles pueden ser emitidos directamente (primarios) o formados en la atmósfera por procesos químicos posteriores a su emisión (secundarios); estos varían en tamaño desde unos pocos nanómetros hasta decenas de micrómetros de diámetro. Una vez en el aire, las partículas pueden cambiar su tamaño y composición por condensación de las especies de vapor o por evaporación, por coagulación con otras partículas, por reacción química, o por la activación en presencia de sobresaturación de agua para convertirse en gotitas de niebla y nube (Seinfeld & Pandis, 2006).

Las partículas  $\text{PM}_{10}$  se caracterizan por tener un diámetro aerodinámico igual o menor a los 10  $\mu\text{m}$ . Una fracción significativa del aerosol troposférico es

de origen antropogénico; estos contienen sulfato, amonio, nitrato, sodio, cloruro, metales traza, material carbonoso, elementos de origen crustal, y agua. La fracción carbonosa de los aerosoles consiste tanto en carbono elemental como orgánico. El carbono elemental, también llamado carbono negro, grafito, u hollín, se emite directamente a la atmósfera, predominantemente a partir de procesos de combustión. El carbono orgánico es emitido directamente desde las fuentes o puede ser resultado de la condensación atmosférica de gases orgánicos de baja volatilidad (Seinfeld & Pandis, 2006). La figura 2.5 muestra un esquema de una partícula de hollín de diesel que consiste en una aglomeración de esferas de carbono elemental (0.01 a los 0.08  $\mu\text{m}$  de diámetro aerodinámico). Su superficie está cubierta por absorción / adsorción de partículas orgánicas, incluyendo HAPs de 5 y 6 anillos como el benzopireno y benzoperileno respectivamente. Los orgánicos en fase gaseosa incluyen todos los HAPs muy volátiles de 2 anillos (por ejemplo, naftaleno y metil naftaleno). HAPs semivolátiles de 3 anillos (por ejemplo, fenantreno y antraceno) y de 4 anillos (por ejemplo, pireno y fluoranteno se distribuyen entre las dos fases. Los sulfatos también se asocian a las partículas diesel (Finlayson-Pitts & Pitts, Jr., 2000).



**Figura 2.5.** Esquema de una partícula de hollín de diésel.

Fuente: Finlayson-Pitts & Pitts, Jr. (2000).

### 2.2.2 Fuentes

Las fuentes de material particulado naturales o biogénicas incluyen el suelo y los restos de rocas (polvo terrestre), la acción volcánica, el espray marino, la quema de biomasa, y las reacciones entre emisiones de gases naturales (Seinfeld & Pandis, 2006). El polvo del Sahara es la fuente natural más importante de material particulado a nivel global, produciendo cerca de unas  $2 \times 10^8$  toneladas anuales de aerosoles, las cuales son transportadas hacia el Océano Atlántico, el Mar Mediterráneo y el Sur de Europa (Kabatás et al., 2014). Por su parte, la emisión de partículas atribuibles a las actividades realizadas por los seres humanos (antropogénicas) surgen de cuatro distintas categorías: la quema de combustibles, los procesos industriales, fuentes fugitivas no industriales (polvo de caminos pavimentados y no pavimentados, erosión en suelos de cultivo, construcción, etc.), y las fuentes móviles, que corresponden a automóviles, autobuses, camiones, entre otros medios de transporte (Seinfeld & Pandis, 2006).

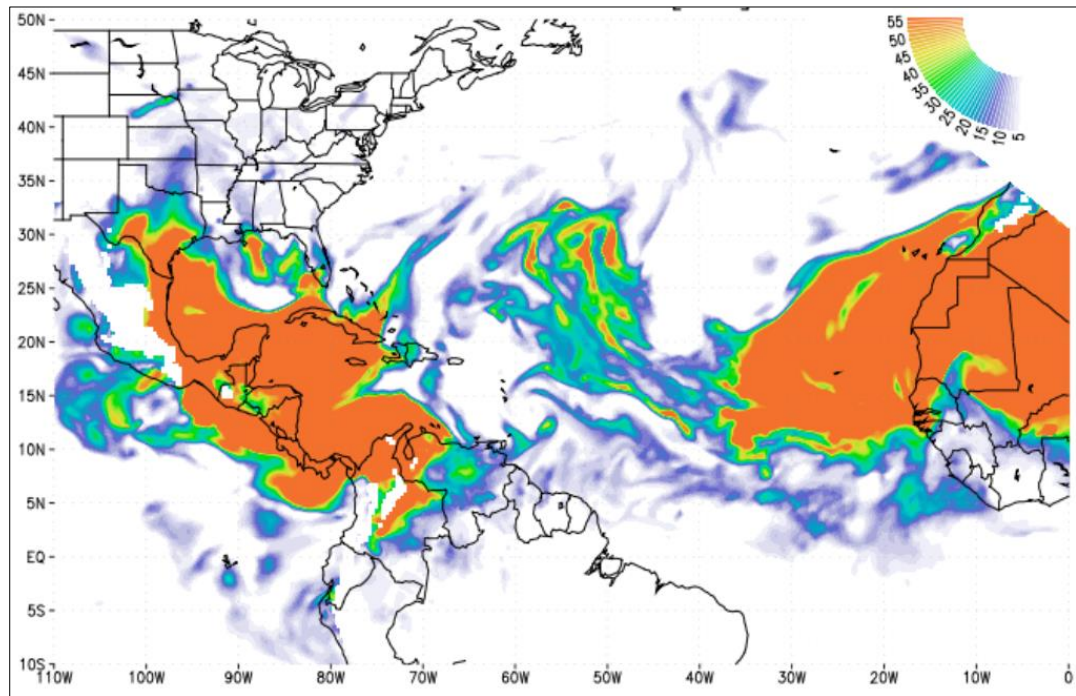
Las fuentes biogénicas predominan en términos de masa de aerosoles (ver Cuadro 2.2). Por su parte, la quema de biomasa tiene un equilibrio entre el hemisferio norte y sur; sin embargo, los aerosoles que provienen de la combustión de combustibles fósiles se emiten principalmente en el hemisferio norte. Además, se debe tomar en cuenta que las incertidumbres de estos datos son bastante altas, especialmente para sales marinas y aerosoles de origen mineral (Sportisse, 2008).

**Cuadro 2.2** Estimación de emisión de aerosoles según fuente y hemisferio para el año 2000. (Expresado en toneladas/año). Fuente: (IPCC, 2001)

<b>Tipo</b>	<b>total</b>	<b>Incertidumbre</b>	<b>H. Norte</b>	<b>H. Sur</b>
<b>Sal marina</b>	3344	[1000, 6000]	43%	57%
diámetro < 1 $\mu\text{m}$	54	[18, 100]		
diámetro [1, 16] $\mu\text{m}$	3290	[1000, 6000]		
<b>Aerosol mineral (polvo)</b>	2150	[1000, 3000]	84%	16%
diámetro < 1 $\mu\text{m}$	110			
diámetro < [1, 2] $\mu\text{m}$	290			
diámetro [2, 20] $\mu\text{m}$	1750			
<b>Aerosol orgánico</b>				
quema de biomasa	54	[45, 80]	50%	50%
combustión de combustibles fósiles	28	[10, 30]	98%	2%
biogénico	56	[0, 90]	98%	2%
<b>Carbono elemental</b>	12.3			
quema de biomasa	5.7	[5, 9]	50%	50%
combustión de combustibles fósiles	6.6	[6, 8]	98%	2%
<b>Emisiones industriales</b>	100	[40, 130]		

El polvo atmosférico, tal y como se mencionó anteriormente, proviene principalmente del desierto del Sahara, y está compuesto principalmente de óxidos de silicio y aluminio, así como hongos y microorganismos. Kumar et al.. (2014) afirman que, la trayectoria del polvo africano hacia el Caribe ha sido bien estudiada por medio de isótopos radiogénicos que confirman que efectivamente éstos llegan a esta región, procedentes del Sahara. Además, existen distintas

herramientas satelitales y de pronóstico que demuestran el origen del polvo como fuente de contribución al material particulado (ver figura 2.6).



**Figura 2.6** Imagen de masa de polvo (ppb) a 850 hPa.

Fecha: 00z 07/08/2013. Fuente: NASA/GMAO

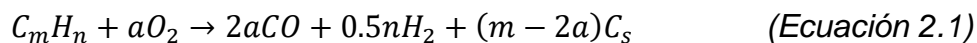
### 2.2.3 Reacciones químicas involucradas (Seinfeld & Pandis, 2006).

Las partículas son subproductos de la combustión de combustibles líquidos o gaseosos, esto hace que su composición contenga tanto carbono elemental (EC, por sus siglas en inglés) como carbono orgánico (OC). Ambas especies juntas se conocen como el hollín, el cual tiene en su mayoría átomos de carbono; no obstante, más de un 10 % se refiere a moles de hidrógeno, como también otras especies traza.

La composición del hollín es por lo general  $C_8H$ ; sin embargo, este contiene más hidrógenos cuando está en la temprana etapa de llama. Luego de

esto, el hollín absorbe vapores orgánicos cuando los productos de combustión se enfrían. Por lo tanto, el hollín es una mezcla de EC, OC y pequeñas cantidades de O, N, e H incorporado en su estructura de grafito.

La formación del hollín depende de la relación carbono/oxígeno en la mezcla de hidrocarburo-aire. Asumiendo que la mezcla es insuficiente para formar  $\text{CO}_2$  y que el CO es producto de la combustión del combustible  $\text{C}_m\text{H}_n$ , se tiene la siguiente estequiometría:



donde  $\text{C}_s$  es el hollín formado y la relación de carbono a oxígeno (C/O) es  $m/2a$ . Si la relación C/O es 1, es decir  $m=2a$ , hay suficiente oxígeno para enlazar todo el carbono disponible como CO y no hay formación de hollín. Si hay presencia de oxígeno en exceso, la relación C/O es menor que 1, es decir  $m < 2a$ , y el oxígeno extra es usado para oxidar el CO a  $\text{CO}_2$ . Por otro lado, si hay déficit de oxígeno, la relación C/O es mayor a 1,  $m > 2a$  y el hollín empieza a formarse. Este argumento indica que estequiométricamente se espera formación de hollín cuando la relación C/O excede el valor crítico de 1. En realidad, el CO y  $\text{CO}_2$  siempre se forman, aun cuando la relación C/O es baja. El valor crítico de C/O es débilmente dependiente de la presión y la dilución por parte de los gases inertes. Los incrementos en temperatura tienden generalmente a inhibir el inicio de la formación de hollín.

La formación del hollín depende fuertemente de la composición del combustible. El orden de la tendencia del hollín es: naftalenos>bencenos>alifáticos. Además, el orden de los alifáticos (alcanos, alquenos, alquinos) varía según el tipo de llama. Se cree que la diferencia entre la formación de alifáticos y aromáticos resulta principalmente por las diferentes rutas de formación; los alifáticos se forman primeramente por acetilenos y poliacetilenos, mientras que los aromáticos pueden formarse por esa misma ruta y también envuelve condensación de anillos o reacciones de polimerización desde las estructuras aromáticas formadas.

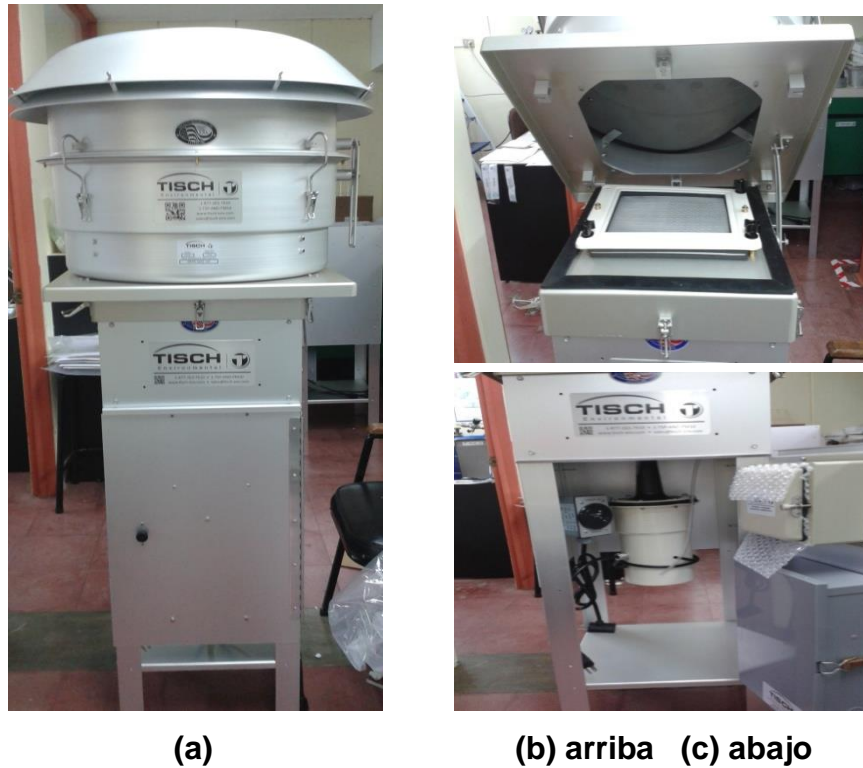
El OC comprende una gran cantidad de compuestos que tienen diferentes volatilidades; como resultado de esto, un número de estos compuestos pueden presentarse en fase gaseosa y en fase particulada. La habilidad de ser especies semivolátiles, coexistiendo en ambas fases, complica la distinción entre el OC primario y secundario. El OC secundario empieza su vida atmosférica en fase gaseosa como COVs (compuestos orgánicos volátiles), sufren una o más transformaciones químicas en fase gaseosa en un compuesto menos volátil, y finalmente se transfiere a la fase de partículas por condensación o nucleación. Por lo tanto, OC secundario implica una transformación química en fase gaseosa y un cambio de fase. Los compuestos orgánicos que son vapores en condiciones de altas temperaturas en los escapes de las fuentes de combustión y se condensan luego en fase particulada conforme las emisiones se enfrían, se consideran primarios debido a que no han sufrido reacciones químicas en la fase gaseosa. Por la misma razón, los compuestos orgánicos contenidos en una partícula emitida son considerados primarios aun si los compuestos se someten a un cambio químico, esto debido a que estos compuestos no sufren un cambio de fase.

La evaluación y definición de OC primario y secundario es bastante compleja. Existen varias formas de calcular el OC, una de ellas es el método trazador de EC; sin embargo, no se detalla en este trabajo por los objetivos de este.

#### **2.2.4 Medición**

La medición de partículas  $PM_{10}$  se puede realizar utilizando muestreadores manuales de alto volumen (ver figura 2.7). Las mediciones incluyen 24 horas de muestreo continuo sobre un filtro de fibra de vidrio o cuarzo.





**Figura 2.7.** (a) Medidor de partículas  $PM_{10}$  marca TISCH con su (b) porta filtros y su (c) motor el cual succiona el aire ambiente.

Fuente: propia

Una vez cada tres muestreos, se realiza una curva de calibración del flujo de aire para cada uno de los medidores de partículas, comparando las lecturas de caída de presión generadas por el flujo al pasar por un orificio crítico calibrado, con respecto a las indicaciones del equipo. Las mediciones de caída de presión se realizan con dos manómetros de agua calibrados, conectados al orificio y al equipo respectivamente. Para cada uno de los muestreos se toman registros de las condiciones de temperatura y presión atmosférica con la ayuda de un anemómetro (marca KESTREL modelo 5000), para posteriormente realizar las correcciones de volumen, a 1 atm de presión y 25°C de temperatura.

El transporte de los filtros al campo se realiza en bolsas de plástico con cierre hermético, rotuladas con una etiqueta con el código asignado en el laboratorio, una vez acondicionado antes del muestreo. Los filtros son manipulados con guantes de nitrilo, tanto durante el muestreo, como también en su análisis en el laboratorio.

Para cada muestreo se realiza un blanco de muestreo (filtro sin muestrear). Lo anterior con el fin de evaluar posibles fuentes de contaminación del filtro durante el muestreo y así realizar las correcciones necesarias si fuese pertinente, restando las concentraciones de los blancos a las muestras.

A cada filtro se le calcula la masa de partículas  $PM_{10}$  mediante análisis gravimétrico y su posterior cálculo de concentración con los datos de volumen muestreado. Los resultados finales de concentración se reportan en unidades de  $\mu g/m^3$ . La figura 2.8 muestra de forma simplificada el proceso anteriormente explicado.

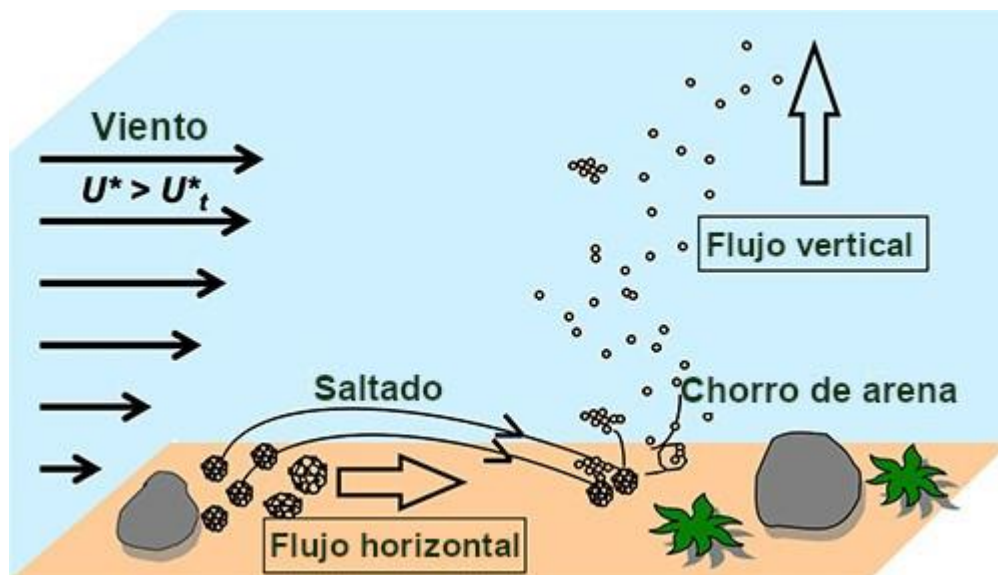


**Figura 2.8** Diagrama ilustrativo del muestreo manual de partículas y sus respectivos análisis fisicoquímicos. Fuente: (propia)

### 2.3 POLVO ATMOSFÉRICO

La mayor parte del polvo atmosférico es producido por la erosión eólica, es decir, por emisión impulsada por el viento. Al igual que otros contaminantes atmosféricos, el polvo, luego de ser emitido a la atmósfera, puede ser llevado hacia arriba por vientos turbulentos, sistemas convectivos o frentes. Este polvo puede ser transportado largas distancias por sistemas de circulación sinópticos hasta finalmente caer por efecto de la gravedad, movimientos turbulentos o por deposición húmeda (Knippertz 2017).

La figura 2.9 muestra cómo el polvo se produce durante el proceso de “chorro de arena” (*sandblasting* en inglés), cuando las partículas salinas más grandes golpean la superficie y se rompen (flujo horizontal), uniéndose las partículas pequeñas entre sí o con la superficie. Finalmente se evidencia el flujo vertical.



**Figura 2.9.** Producción de polvo atmosférico.

Fuente: Knippertz (2017)

### 2.4 MODELADO DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

La atmósfera es un sistema reactivo extremadamente complejo en el que numerosos procesos físicos y químicos se producen simultáneamente. Las

mediciones ambientales dan solamente un resultado instantáneo de las condiciones atmosféricas en un momento y lugar determinado. Tales mediciones son a menudo difíciles de interpretar sin un modelo conceptual claro de los procesos atmosféricos. Por otro lado, las mediciones por sí solas no pueden ser utilizadas directamente por los responsables políticos para establecer una estrategia eficaz para la solución de problemas de calidad del aire. La comprensión de los procesos individuales atmosféricos (transformaciones químicas, transporte, remoción, etc.) no implica una comprensión del sistema como un todo. Los modelos matemáticos proporcionan el marco necesario para la integración de la comprensión de los procesos atmosféricos individuales y el estudio de sus interacciones. Una combinación de las mediciones y los modelos son el mejor enfoque para hacer progresos reales hacia la comprensión de la atmósfera (Seinfeld & Pandis, 2006).

Según lo detallado en las secciones 2.1.2 y 2.1.3 de esta investigación, los modelos de contaminantes atmosféricos suelen ser más sencillos y efectivos si se enfatiza la simulación del transporte horizontal (campo de vientos), y no así el transporte vertical que tiene una complejidad física mayor (turbulencia).

#### **2.4.1 Tipos de modelos**

Existen diferentes tipos de modelos para simular la concentración de los contaminantes del aire; sin embargo, no todos tienen la misma finalidad u objetivo. La elección de un modelo debe tomar en cuenta la factibilidad y viabilidad según los requisitos, ventajas, desventajas y demás aspectos importantes que implica la utilización de cada uno de ellos. En el cuadro 2.3 se resumen algunos aspectos relevantes de 5 diferentes tipos de modelos de contaminación del aire.

#### **2.4.2 Utilización del modelo WRF-Chem**

Este proyecto se realiza mediante el uso del modelo WRF-Chem ya que logra incluir las características físico-geográficas del dominio elegido, como

también las condiciones meteorológicas. Algunos de los pronósticos operacionales y experimentales de la calidad del aire que han sido desarrollados mediante el uso del modelo WRF-Chem se resumen en el cuadro 2.4.

**Cuadro 2.3** Principales tipos de modelos de contaminantes del aire.

<b>Modelo</b>	Gaussiano	Euleriano	Lagrangiano	Fotoquímico	Estadístico
<b>Principio</b>	Análisis gaussiano	Análisis de un campo	Análisis de trayectorias	Análisis de transformaciones químicas (ecuaciones químicas y matemáticas)	Análisis estadístico
<b>Ventajas</b>	<p>1) Determina experimentalmente la propagación vertical y horizontal de la pluma.</p> <p>2) Calcula el máximo impacto a nivel de suelo y la distancia de máximo impacto de la fuente</p>	<p>1) Capacidad para una mejor y más completa caracterización de los procesos físicos en la atmósfera.</p> <p>2) Predice las concentraciones de las especies en todo el dominio del modelo.</p> <p>3) La variación de las concentraciones a escalas más pequeñas que la resolución del modelo no puede ser fácilmente resuelta</p>	<p>1) El modelado de Lagrange se ha utilizado para distancias más grandes y plazos más largos.</p> <p>2) Simplicidad computacional</p>	<p>1) Ampliamente reconocido y utilizado rutinariamente para regulación y estrategias de control.</p> <p>2) Estos modelos se aplican a múltiples escalas espaciales, desde el local, regional, nacional y mundial.</p> <p>3) Son modelos a gran escala que simulan los cambios de las concentraciones de contaminantes en la atmósfera mediante un conjunto de ecuaciones matemáticas que caracteriza a los procesos químicos y físicos en la atmósfera.</p>	<p>1) Son simples: técnicas basadas esencialmente en el análisis de estadístico de los datos.</p> <p>2) Predicen tendencias de la contaminación con pocas horas de antelación, lo que permite alertar a la población y tomar medidas preventivas.</p> <p>3) Los modelados de receptor permiten identificar y cuantificar fuentes de contaminantes del aire en una ubicación del receptor. Estos utilizan las características químicas y físicas de los gases y partículas medidas en la fuente y del receptor.</p>

Modelo	Gaussiano	Euleriano	Lagrangiano	Fotoquímico	Estadístico
<b>Desventajas</b>	<p>1) Simulación de productos químicos no reactivos.</p> <p>2) Son efectivos para estimación de concentraciones de contaminantes no reactivos a menos de 20 km de fuentes puntuales.</p>	<p>1) El modelado euleriano actualmente se utiliza solo para episodios específicos con escalas de tiempo de unos pocos días.</p> <p>2) Requiere mayor tiempo computacional y memoria.</p>	<p>1) Los procesos físicos que puede describir son algo incompletos. Una parcela de aire es seguida a lo largo de una trayectoria, y se supone que mantiene su identidad durante su paso</p>	<p>1) Algunos de ellos requieren alto tiempo computacional y memoria.</p>	<p>1) Estos modelos no son deterministas, en el sentido de que no establecen ni simulan una causa-efecto, relación física entre las emisiones y las concentraciones ambientales.</p> <p>2) La resolución de los datos afecta directamente este tipo de modelo. Los muestreos manuales de 24 h no son un buen insumo para modelos estadísticos.</p>
<b>Ejemplos</b>	<p>1) AERMOD</p> <p>2) ISC (Industrial Source Complex)</p>	<p>1) UAM (Urban Airshed Model)</p> <p>2) CIT model (California Institute of Technology model)</p> <p>3) SMOG model (Surface Meteorology and Ozone Generation)</p> <p>4) RADM (Regional Acid Deposition Model)</p> <p>5) ADOM 6) STEM II</p> <p>7) RTM-III 8) LIRAQ</p> <p>9) CALGRO 10) ROM</p>	<p>1) CALPUFF</p> <p>2) HYSPLIT</p> <p>3) OZIPR</p>	<p>1) CMAQ</p> <p>2) CAMX</p> <p>3) UAM</p> <p>4) CALGRID</p> <p><b>5) WRF-Chem</b></p>	<p>1) CMB</p> <p>2) UNMIX</p> <p>3) PMF</p>

**Cuadro 2.4** Principales pronósticos operacionales y experimentales de la calidad del aire en los que se ha utilizado el modelo WRF-Chem.

<b>Pronóstico</b>	<b>Proyecto o Departamento</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Contaminantes modelados</b>
<b>Operacional</b>	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú-SENAMHI	Perú	CO, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub>
	Air Quality Forecast over SW Poland	Wroclaw University, Poland	CO, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , NH <sub>3</sub>
	Partnership with ChiNa on space DAta (PANDA)	China	NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub>
	Operational Air Quality Forecasts for Eastern China, Centre for Urban Environmental Meteorology	Shanghai, China	No indicados
<b>Experimental</b>	NOAA/ESRL Real-time Air Quality Forecast for North America (RAP-Chem).	Boulder, Colorado, USA	CO, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , HCHO, aerosoles orgánicos
	NOAA/ESRL Real-time Wildfire Air Quality Forecast for CONUS (HRRR-Smoke)	Boulder, Colorado, USA	Humo superficial
	NOAA/ESRL Real-time Wildfire Air Quality Forecast for Alaska (HRRR-Smoke).	Boulder, Colorado, USA	Humo superficial
<b>Experimental</b>	Universidad Andrés Bello, Dirección Meteorológica de	Santiago, Chile	PM <sub>2.5</sub>



Pronóstico	Proyecto o Departamento	Ubicación	Contaminantes modelados
	Chile		
	European Operational Air Quality Forecasts: WRF-CHEM-EMIMO	Madrid, España	No indicados
	Air Quality Forecasts, Dept. of Math and Physics, University of Ljubljana, Slovenia	Eslovenia	CO, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , NO, NO <sub>2</sub>
	Departamento de Ciências Atmosféricas, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo	São Paulo, Brazil	CO, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub>
	UAF SMOKE Alaska Wildfire Smoke Forecast. University of Alaska-Fairbanks	Fairbanks, AK, USA	PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , carbono negro.
	Regional Air Quality Forecast. Research Institute for Global Change (Formerly JAMSTEC)	Yokohama, Japan	NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub>
	The System of Air Quality Forecasting and Research. Indian Institute of Tropical Meteorology	Pune, India	PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> ,
	Real time Air Quality Forecasts from Nanjing University	Nanjing, China	CO, SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2</sub> .

## 2.5 ESQUEMAS DE POLVO

El modelo WRF-Chem permite utilizar tres diferentes esquemas de polvo en conjunto con la meteorología. Todos ellos se caracterizan por tener una estrecha relación con el factor de erosión, fracción de arena y fracción de arcilla (NOAA, 2018). Por otro lado, la función de fuente de polvo es un coeficiente proporcional al suelo erosionable, el cual juega un papel importante en los esquemas de polvo (Nikfal et al., 2018). Actualmente, la función de fuente de polvo utilizada en el modelo WRF-Chem se calcula por un enfoque topográfico de la siguiente forma (Ginoux et al., 2001):

$$S = \left( \frac{z_{max} - z_i}{z_{max} - z_{min}} \right)^5 \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

En la ecuación 2.2, S es la probabilidad de sedimentos que pueden ser acumulados en un punto de rejilla i, con una elevación de z. Las variables  $z_{max}$  y  $z_{min}$  son las elevaciones máximas y mínimas alrededor de una rejilla i con un área de 10 x 10 grados en la escala geográfica.

A continuación, se explica brevemente cada uno de los tres esquemas de polvo disponibles en el modelo WRF-Chem:

### 2.5.1 Esquema de polvo GOCART

El levantamiento de polvo hacia la atmósfera es principalmente iniciado por el bombardeo de saltado -*saltation*- (chorro de arena). Ginoux et al. (2001) utilizan una fórmula para el levantamiento de polvo que requiere los datos de viento superficial (horizontal) y el umbral de la velocidad del viento requerido para la erosión. En esta fórmula, el flujo  $F_p$  de partículas de tamaño clase p es calculada

por la ecuación 2.3:

$$F_p = CS_s u^2 (u_{10} - u_t) \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

si  $u_{10} > u_t$ , de lo contrario = 0

En la ecuación 2.3,  $C$  es un factor dimensional igual a  $1 \mu\text{g s}^2 \text{m}^{-5}$ ,  $s_p$  es la fracción de cada partícula en el suelo,  $u_{10}$  y  $u_t$  son la velocidad del viento a 10 m y el umbral de velocidad del viento, respectivamente.  $S$  es la erosión del suelo descrita en la ecuación 2.2. Según Le Grand (2019),  $C$  cambió su valor en el código fuente por  $0,8 \mu\text{g s}^2 \text{m}^{-5}$ .

### 2.5.2 Esquema de polvo AFWA

El esquema AFWA fue desarrollado por la Agencia Meteorológica de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos (AFWA, por sus siglas en inglés). Este esquema está basado en el modelo GOCART e incluye varias mejoras en la distribución del tamaño de las partículas emitidas. Además, el impacto de la humedad del suelo en el umbral de levantamiento de polvo ha sido modificado. El flujo vertical en este esquema es calculado por el flujo de saltado de la siguiente forma (Jones et al., 2012):

$$H = C \frac{\rho_a}{g} u_*^3 \left(1 + \frac{u_{*t}}{u_*}\right) \left(1 - \frac{u_{*t}^2}{u_*^2}\right) \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

En la ecuación 2.4,  $C$  es una constante empírica,  $\rho_a$  es la densidad del aire,  $g$  la gravedad,  $u_*$  y  $u_{*t}$  son la velocidad de fricción y el umbral de velocidad de fricción, respectivamente.

Utilizando la ecuación 2.4, el flujo de polvo vertical se calcula de la siguiente forma:

$$F_{bulk} = H\alpha * S, \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

En donde  $\alpha$  es la fracción de saltado que incrementa de manera proporcional al porcentaje de arcilla en el suelo.  $S$  se refiere a la erosión del suelo.

### 2.5.3 Esquema de polvo UoC

El esquema UoC (*University of Cologne*) también está basado en el modelo GOCART, pero toma en cuenta un enfoque con respecto a los tamaños de partícula. La siguiente ecuación describe este esquema de polvo (Shao et al., 2011):

$$F(d_i, d_s) = c_y \eta_f [(1 - \gamma) + \gamma \sigma_p] (1 + \sigma_m) g \frac{Q_{ds}}{u_*^2} \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

En la ecuación 2.6,  $F(d_i, d_s)$  es el flujo de polvo con el tamaño  $d_i$  y el flujo de saltado  $d_s$ ,  $c_y$  es una constante dimensional,  $\eta_f$  es la fracción de polvo emitido,  $\sigma_m$  es el coeficiente de saltado,  $\sigma_p$  es la fracción de partículas de polvo suspendido con respecto al total de partículas acumuladas,  $\gamma$  es el coeficiente de emisión acumulada,  $Q_{ds}$  es el flujo de saltado por la fracción de tamaño de  $d_s$ ,  $u_*$  es la velocidad de fricción, y  $g$  es la gravedad.

El cuadro 2.5 resume algunas de las características de los tres esquemas de polvo mencionados anteriormente.

**Cuadro 2.5** Características generales de los esquemas de polvo GOCART, AFWA y UoC.

Parámetros	GOCART	AFWA	UoC
Función de fuente de polvo	$S = \left( \frac{z_{\max} - z_i}{z_{\max} - z_{\min}} \right)^5$	$S = \left( \frac{z_{\max} - z_i}{z_{\max} - z_{\min}} \right)^5$	$S = \left( \frac{z_{\max} - z_i}{z_{\max} - z_{\min}} \right)^5$
Base/enfoque	Topográfico	Topográfico	Topográfico
Año publicación	2001	2010 / 2012	2001 / 2004 / 2011
Historia	Se diseñó originalmente como un modelo de aerosol <i>offline</i> autónomo, impulsado por campos meteorológicos asimilados. Luego se incorpora dentro de WRF-Chem y se ve la necesidad de ajustar el modelo para cada ubicación o evento, para obtener buenos resultados de AOD. Se encontraron deficiencias asociadas con la representación de la disponibilidad de polvo (fuerza de la fuente) y el cálculo de las emisiones de polvo en función de la velocidad del viento.	Nace después de observar múltiples resultados inesperados de patrones de simulación para emisión de polvo en el suroeste de Asia, utilizando el esquema GOCART. Se desarrolló una opción de esquema de emisión de polvo alternativa para aumentar el código GOCART de WRF-Chem.	Shao (2001) propuso un esquema de emisión de polvo, teniendo en cuenta tres mecanismos de emisión de polvo, incluido el arrastre aerodinámico, el bombardeo de saltación y la desintegración de agregados.

Parámetros	GOCART	AFWA	UoC
Tipo de esquema	Empírico. Sus ecuaciones representan una conversión directa de la velocidad del viento a la emisión de polvo, en lugar de usar la velocidad del viento para calcular el flujo de saltado de partículas y luego usar este flujo para determinar las emisiones de polvo.	Semi-empírico. Maneja la emisión de polvo como un proceso de dos partes, en donde el saltado de partículas grandes se activa por cizalladura del viento y conduce a la emisión de partículas finas por bombardeo y desagregación.  Las ecuaciones se derivan en términos de velocidad de fricción, $u^*$ , e incluyen la velocidad de fricción umbral estática requerida para el arrastre de partículas ( $u^*t$ ). El flujo de saltado horizontal, el flujo de polvo vertical resultante, la partícula de polvo emitida, y el tamaño resuelve el flujo de polvo.	Semi-empírico. El modelo UoC sigue el mismo enfoque general que el modelo AFWA. Ambos esquemas simulan la física de la emisión de polvo. Primero calculan una velocidad de fricción de umbral para el saltado de partículas, luego utilizan esa velocidad de fricción de umbral para determinar el flujo de saltación, y finalmente calculan las emisiones de partículas de polvo causadas por procesos de saltación (por ejemplo, bombardeo). Ambos esquemas también utilizan los mismos contenedores de emisión de polvo de tamaño resuelto.
Observaciones	Se utilizan esquemas separados para el transporte atmosférico y la eliminación de la atmósfera para estimar las concentraciones de masa de polvo en la atmósfera.	Si bien los procesos incluidos en el esquema de emisión de polvo de UoC son potencialmente más completos físicamente, el modelo AFWA puede tener una ventaja en el desarrollo de mesoescala debido a su menor sensibilidad a los escasos y difíciles desafíos para obtener datos de suelo y	El saltado y las distribuciones de tamaño de partícula de polvo emitidas son sensibles a la distribución de tamaño de partícula del suelo (sub-esquemas S01 y S04). En S11, la distribución de tamaño de partícula emitida es sensible a la distribución de tamaño de partícula del suelo. Lo anterior hace que los esquemas

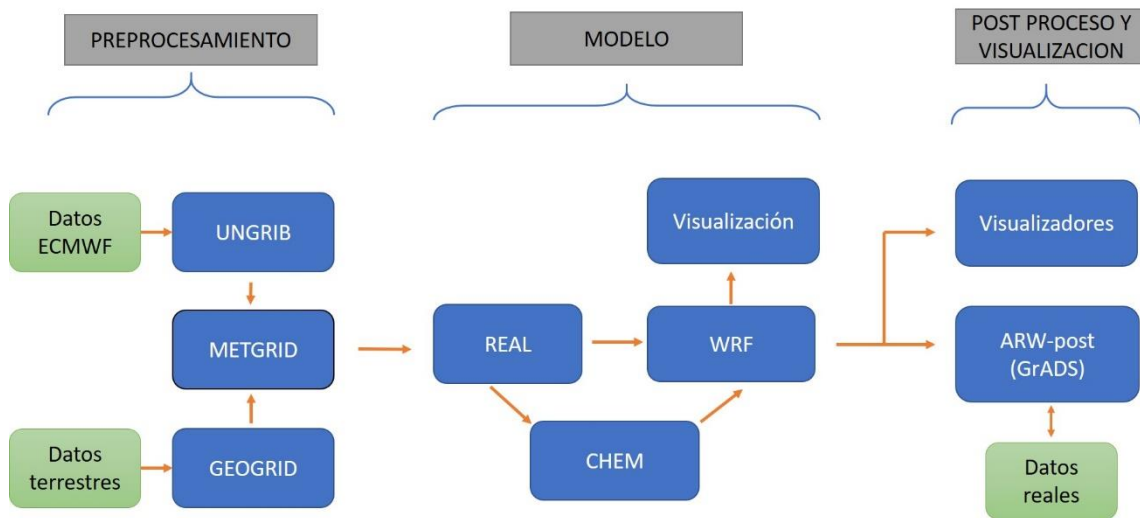
Parámetros	GOCART	AFWA	UoC
		vegetación.	<p>de parametrización UoC sean los esquemas de emisión de polvo WRF-Chem mayormente basados en física.</p> <p>El factor de erosión solo se usa para restringir las potenciales regiones de emisión, en lugar de usarse para escalar la emisión de polvo directamente como en el esquema AFWA y el esquema GOCART.</p>

Fuente: LeGrand et al. (2019)

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1 MODELADO DE PM<sub>10</sub>

Se realizaron simulaciones de PM<sub>10</sub> mediante el uso del modelo WRF-Chem versión 3.9.1.1 (Grell et al., 2005) y se evaluaron con la utilización de datos observados. La figura 3.1 muestra el proceso que se siguió según tres etapas: preprocesamiento, modelado, y postproceso.



**Figura 3.1.** Diagrama del proceso de modelado mediante el uso del WRF-Chem y la evaluación de su desempeño.

Fuente: propia.

La descripción del modelo y sus componentes se encuentran en los anexos 9.1 y 9.2.



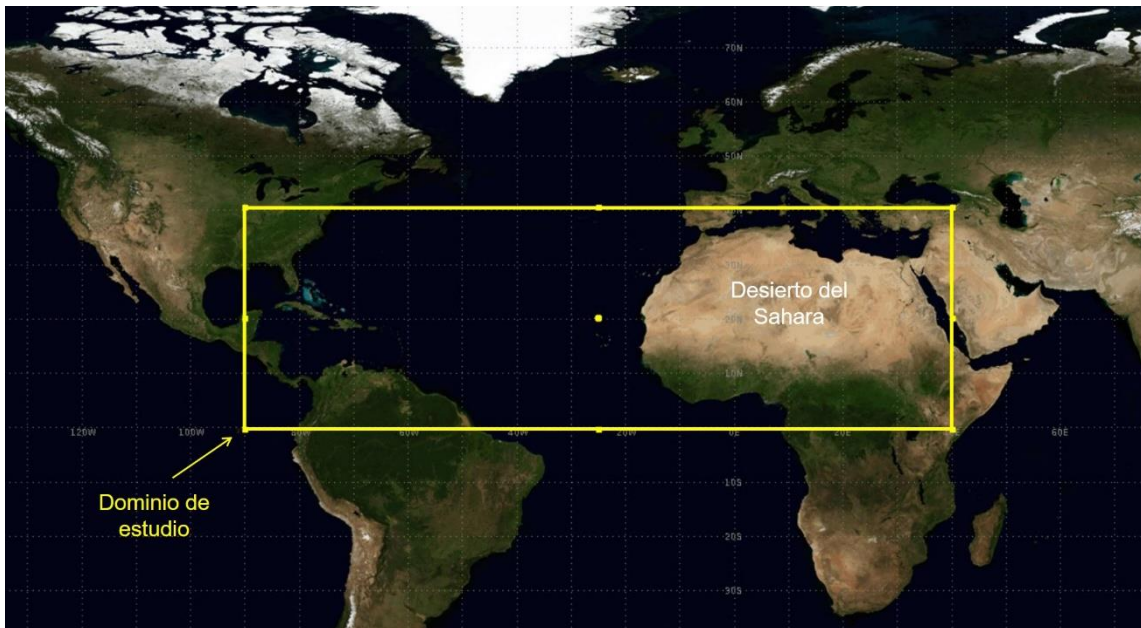
### 3.2 CONFIGURACIÓN DEL MODELO

La simulación se realizó mediante un único dominio (madre) tal y como se describe en el cuadro 3.1:

**Cuadro 3.1** Configuración del dominio para la simulación de partículas PM<sub>10</sub> en la GAM de Costa Rica mediante el modelo WRF-Chem.

Dominio	Periodo	Resolución espacial	Resolución temporal	Longitud	Latitud
1 (madre)	01/08/2013 al 15/08/2013	25 km	Horaria	90°O 40°E	0° 40°N

En la figura 3.2 se muestra el dominio madre utilizado en este proyecto, el cual comprende la región africana que a su vez incluye la capa de aire del desierto del Sahara y del Sahel. Esta capa de aire es la que finalmente se transporta hasta el Caribe y Centroamérica (ver figura 3.3). Además, este dominio abarca parte de la región de la cuenca Atlántica y una pequeña porción del este del Océano Pacífico; ambas regiones (Mar Caribe y Pacífico Este Ecuatorial), son las principales fuentes de humedad del territorio centroamericano (Durán-Quesada et al., 2010). Por su parte, el dominio también incluye una sección de la franja centroamericana que abarca la región costarricense (zona de interés del proyecto).



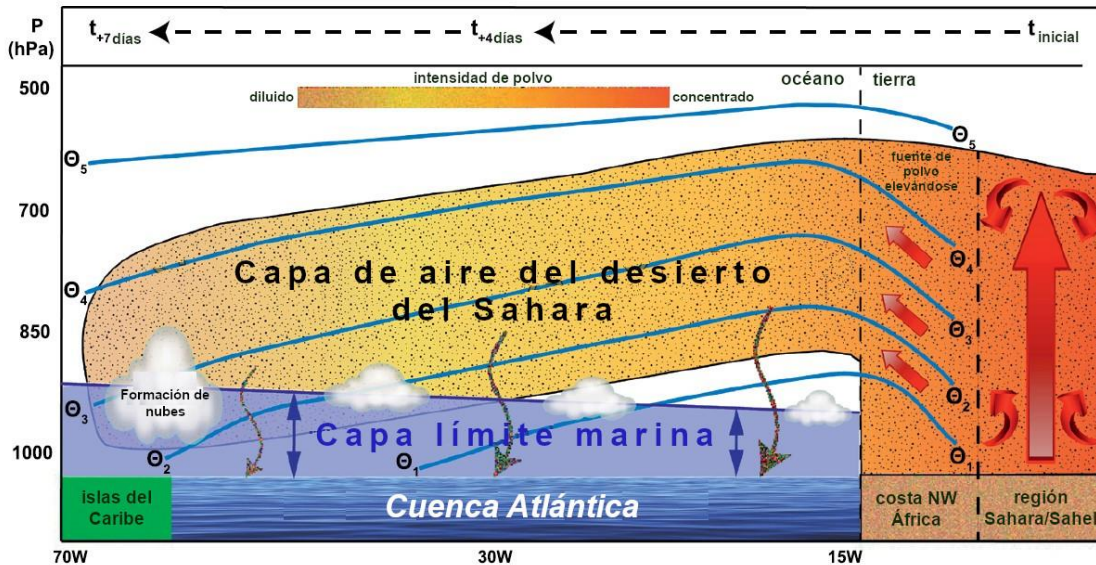
**Figura 3.2** Dominio de estudio.

Fuente: propia

La simulación se realizó para el año base 2013 debido a dos razones principales:

- este año cuenta con datos de calidad en cuanto a lo que se refiere a mediciones reales realizadas en la GAM de Costa Rica,
- este año presentó un evento natural destacado de polvos provenientes del Sahara, el cual aumentó los niveles de concentración de  $PM_{10}$  en la región de estudio de manera considerable (Poleo y Briceño 2014). Este evento se deseaba observar en las simulaciones a realizar.

De este año 2013 se escogió el mes de agosto, el cual incluye las fechas del evento natural descrito anteriormente. La escala temporal y espacial se detallan en el cuadro 3.1, vista anteriormente.



**Figura 3.3** Capa de aire del desierto del Sahara. El perfil de aire de la masa de aire del Sahara se transporta por convección y mezcla turbulenta desde su fuente hasta el noroeste de África, a través de la cuenca atlántica tropical norte, y finalmente a las islas del Caribe y Centroamérica. Partículas gruesas: tonos rojos, partículas finas: tonos amarillos.

Fuente: Kuciauskas et al.. (2018)

En el presente estudio se utilizaron datos meteorológicos de Reanálisis ERA-Interim del ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), los cuales proveen las condiciones iniciales y de contorno para WRF-Chem. Estos datos tienen una resolución de 0,75 grados; además, cuentan con 37 niveles de presión disponibles (ERA-Interim; Dee et al.. 2011).

En cuanto a los principales esquemas físicos, se utilizó el esquema de microfísica conocido como WRF Single-moment 5-class (Hong et al.. 2004); además, para representar el esquema de capa límite se utilizó el esquema de Yonsei University (Hong et al.. 2006); esquema de Grell 3D para el caso de los cúmulos (Grell, 1993; Grell y Devenyi, 2002); y esquemas de Goddard (Chou y Suarez, 1994) y RRTM (Mlawer et al.. 1997) para la representación de radiación de onda corta y larga respectivamente.

Con relación al esquema químico, en este proyecto se utilizó la opción conocida como `chem_opt=401`, la cual se refiere exclusivamente a concentración de polvo. En cuanto a los esquemas de polvo, se utilizaron los tres indicados y referenciados en el apartado 2.5 de este documento: `dust_opt = 1` (emisiones de polvo GOCART), `dust_opt = 3` (emisiones de polvo GOCART con modificaciones AFWA), y `dust_opt = 4` (emisiones de polvo GOCART con modificaciones UoC). Para la estabilización y ajuste inicial del modelo (*spin-up*), se utilizó un tiempo de 15 días previos a lo indicado en el cuadro 3.1.

Es importante destacar que no todas las configuraciones físicas que dispone el modelo WRF funcionan para el acople químico. Es decir, el WRF-Chem tiene algunas restricciones de configuración cuando se incluyen esquemas químicos de aerosoles, química acuosa y química gaseosa. Al no existir un estudio base similar a este, las parametrizaciones físicas elegidas en este experimento responden principalmente a las que ya han sido probadas y forman parte de los tutoriales oficiales del modelo WRF-Chem.

### 3.3 EVALUACIÓN DEL MODELO

#### 3.3.1 Evaluación de PM<sub>10</sub>

Para la evaluación del modelo se calcularon diferentes estadísticos que permitieron la verificación objetiva del mismo. En este proyecto se utilizaron los siguientes índices, en los cuales “Obs” se refiere al dato real observado y medido, y “Mod” al dato pronosticado o simulado:

1. Error medio (ME o BIAS):

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Mod_i - Obs_i) \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

2. Error medio absoluto (MAE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Mod_i - Obs_i| \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

3. Error cuadrático medio (MSE):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Mod_i - Obs_i)^2 \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

4. Raíz del error cuadrático medio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Mod_i - Obs_i)^2} \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

5. Coeficiente de correlación (r o coeficiente de Pearson):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Mod_i - \overline{Mod_i}) \sum_{i=1}^n (Obs_i - \overline{Obs_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Mod_i - \overline{Mod_i})^2 \sum_{i=1}^n (Obs_i - \overline{Obs_i})^2}} \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

6. Coeficiente de determinación ( $R^2$ ):

$$R^2 = r^2 = \frac{\text{varianza explicada}}{\text{varianza total}} \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

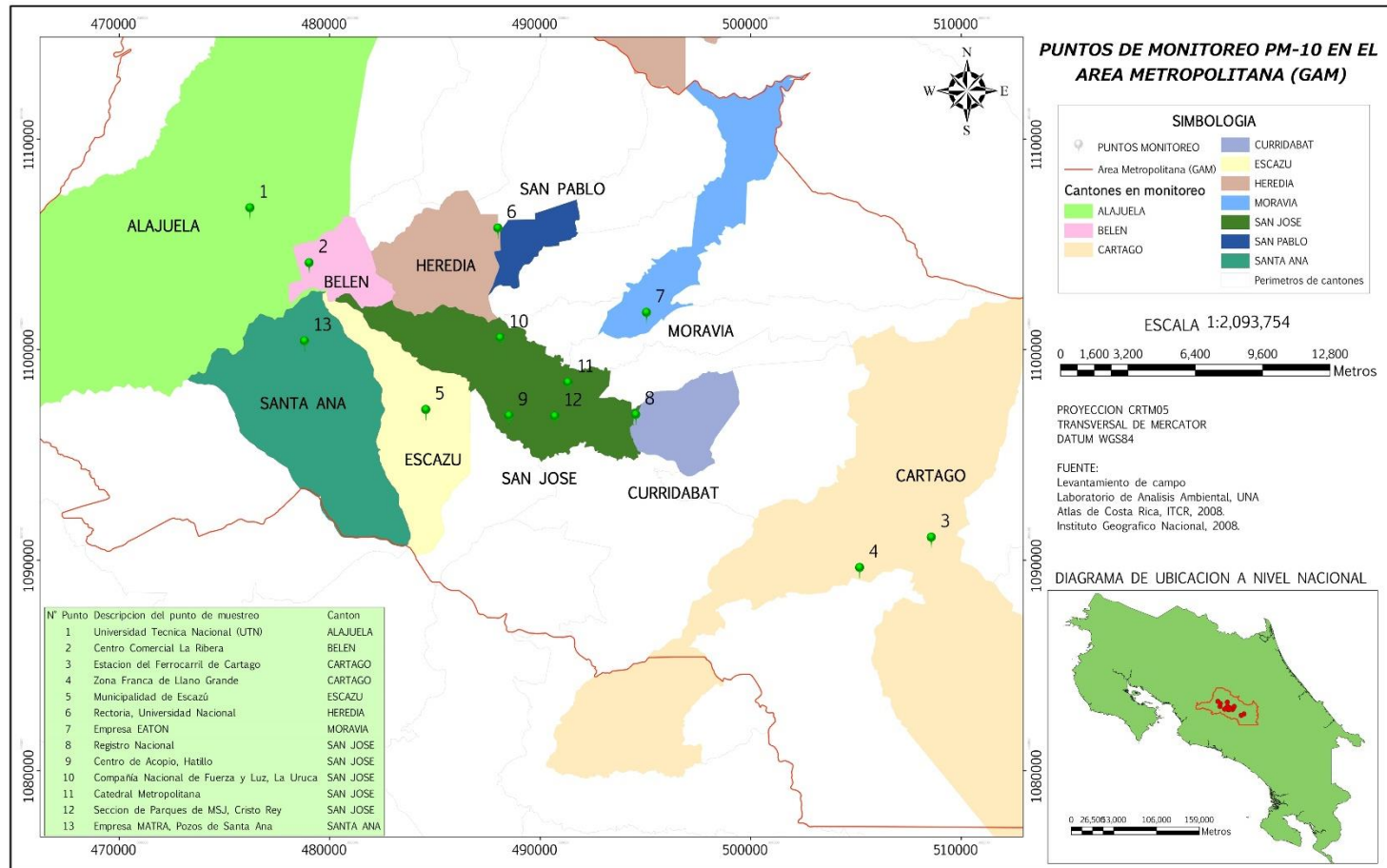
7. Desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Mod_i - \overline{Mod})^2}{n-1}} \quad (\text{Ecuación 3.7})$$

Para esta evaluación se utilizaron los datos observados de la red de monitoreo de partículas  $PM_{10}$  del LAA de la UNA<sup>1</sup>. Esta red cuenta con 14 sitios de muestreo distribuidos en la Gran Área Metropolitana según la Figura 3.4. Estas mediciones son de tipo discontinuo y manuales, con datos promedio de 24 horas. Por esta razón, se debe promediar los archivos de salida horarios que genera el modelo WRF-Chem. Lo anterior implica que el cálculo de coeficientes de correlación y determinación se calculen con 3 puntos cada sitio de muestreo.

Es importante señalar que cada sitio de muestreo cuenta con una naturaleza característica que define el punto según su fuente de material particulado predominante. Esta naturaleza puede ser residencial, comercial, industrial o alguna combinación de ellas.

<sup>1</sup>Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Heredia. Teléfono: (506) 2277 3292. Contacto: Dr. Jorge Herrera Murillo



**Figura 3.4.** Sitios de muestreo de partículas PM<sub>10</sub> en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica.

Fuente: Laboratorio de Análisis Ambiental, UNA.

Para la validación del modelo se utilizaron específicamente los puntos de medición indicados en el siguiente cuadro:

**Cuadro 3.2** Sitios de muestreo utilizados en la evaluación del modelo como datos observados en superficie.

<b>Sitio de muestreo</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Naturaleza del punto</b>
<b>Catedral Metropolitana San José</b>	9°55'57,4"N	84°04'44,96"W	Comercial
<b>Centro de Acopio Municipal, Hatillo</b>	9°55'07,71"N	84°06'17,64"W	Residencial / Comercial
<b>Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca</b>	9°57'07,7"N	84°06'30,6"W	Comercial
<b>Centro Comercial La Ribera, Belén</b>	9°59'02,46"N	84°11'29,45"W	Residencial / Comercial
<b>Estación Ferrocarril, Cartago</b>	9°51'59,3"N	83°55'18,2"W	Comercial
<b>MATRA, Pozos, Santa Ana</b>	9°57'02,7"N	84°11'35,8"W	Comercial
<b>Zona Franca Llano Grande, Cartago</b>	9°51'12,4"N	83°57'10,1"W	Industrial
<b>Empresa EATON, Moravia</b>	9°57'01,8"N	84°01'58,1"W	Residencial
<b>Universidad Técnica Nacional, Alajuela</b>	10°00'23,7"N	84°13'02,7"W	Comercial

Es importante señalar que la evaluación del modelo se realizó con los datos obtenidos para un nivel superficial, esto debido a que los datos reales se refieren también a mediciones realizadas en la superficie terrestre.



### 3.3.2 Evaluación de lluvia y viento

Reanálisis:

Se procedió a realizar una comparación visual de lluvia y viento contra fuentes de datos de reanálisis, provenientes según lo indicado en el cuadro 3.3:

**Cuadro 3.3** Datos utilizados en la evaluación de viento y lluvia del modelo WRF-Chem.

Variable meteorológica	Fuente de datos	Resolución espacial	Resolución temporal	Periodo
Viento	CCMP <sup>2</sup>	25 km x 25 km	6 horas	05 – 08 / agosto / 2013
Lluvia	Persiann-CDR <sup>3</sup>	25 km x 25 km	1 día	05 – 08 / agosto / 2013

<sup>2</sup> CCMP Wind Vector Analysis Product (Cross-Calibrated Multi-Platform) (Wentz et al., 2015) y (Atlas et al. 2011)

<sup>3</sup> PERSIANN Precipitation Climate Data Record (Sorooshian et al. 2014) y (Ashouri et al. 2015)

Mediciones meteorológicas:

Se realizaron comparaciones contra datos de estaciones meteorológicas del Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica<sup>4</sup>. Para esto se utilizó la magnitud de viento a 10 metros y los acumulados de lluvia de las estaciones más cercanas a tres de las estaciones de monitoreo de PM<sub>10</sub>. Las fechas analizadas corresponden a las mismas que se utilizaron en el cuadro 3.3 y las estaciones utilizadas se detallan a continuación en el cuadro 3.4:

**Cuadro 3.4** Estaciones meteorológicas utilizadas para la comparación de viento a 10 m, y lluvia obtenida en el modelo WRF-Chem.<sup>4</sup>

<b>N° IMN</b>	<b>Nombre de la estación</b>	<b>Latitud Norte</b>	<b>Longitud Oeste</b>	<b>Altitud (m.s.n.m)</b>	<b>Estación de PM<sub>10</sub> cercana</b>
84141	IMN, Aranjuez	09° 56' 16,61"	84° 04' 10,83"	1181	Catedral Metropolitana San José
84285	Aeropuerto Tobías Bolaños Oeste, Pavas	09° 57' 6,30"	84° 08' 51,60"	981	Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca
84169	Aeropuerto Juan Santamaría, media pista	09° 59' 6,45"	84° 12' 52,93"	913	Universidad Técnica Nacional, Alajuela

<sup>4</sup>Instituto Meteorológico Nacional, Departamento de información. Contacto: Cristina Araya Villalobos: caraya@imn.ac.cr, teléfono: 2222-5616, ext: 124, www.imn.ac.cr.

## 4. CARACTERIZACIÓN DE LA ATMÓSFERA DE INTERÉS

### 4.1 Atmósfera costarricense

Para tener una perspectiva más clara de lo que contiene este estudio se debe conocer un poco lo que se ha investigado en los últimos años en Costa Rica en relación con la atmósfera que nos cubre. Es decir, ¿qué se ha investigado y qué se mantiene como un análisis operativo?

Costa Rica cuenta con el Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), de la Universidad de Costa Rica. Este centro, fundado en el año 1979, se ha caracterizado por el estudio de la atmósfera local y regional, con un enfoque inclinado a la física de la atmósfera. Entre sus temáticas de investigación están el clima, la variabilidad y el cambio climático, el pronóstico climático, el fenómeno del NIÑO, meteorología e impacto social, entre otros.

Por otro lado, en la Universidad Nacional, el LAA se ha encargado de realizar estudios relacionados con la química atmosférica de Costa Rica, principalmente en el Gran Área Metropolitana y algunos otros estudios en regiones rurales. Las mediciones realizadas por el LAA han estado enfocadas en contaminantes criterio, como también en contaminantes traza y algunos gases de efecto invernadero. Esta labor se ha presenciado desde aproximadamente el año 2002. Actualmente el LAA mantiene una red operativa de partículas  $PM_{10}$  en el GAM y algunas mediciones de  $NO_2$  mediante métodos pasivos.

Algunos otros centros académicos como el Laboratorio de Química de la Atmósfera-LAQAT (UNA, fundado en 1993), y el Centro de Investigaciones en Contaminación Ambiental-CICA (UCR, fundado en 1983), han realizado aportes científicos al descubrimiento y caracterización de la química atmosférica del sector costarricense.

Por último, el Instituto Meteorológico Nacional-IMN es una institución adscrita al MINAE. Se trata de un ente científico que tiene a cargo la coordinación de todas las actividades meteorológicas y climatológicas del país.

Mantiene una vigilancia sistemática del estado del tiempo para brindar apoyo a la seguridad de la navegación aérea del país, para la prevención de los desastres hidrometeorológicos y coadyuva a los efectos adversos de la variabilidad y el cambio climático.

Es importante saber también que en Costa Rica se realizan mediciones operativas en vertical (radiosondeos) únicamente en un sitio fijo (La Garita de Alajuela), una vez al día. No existen estudios que hayan podido relacionar la contaminación atmosférica con caracterización de la capa límite atmosférica mediante el uso de radiosondeos o modelos que incluyan diferentes niveles atmosféricos.

#### **4.2 Análisis sinóptico**

Poleo y Briceño (2014) realizaron un análisis sinóptico detallado de la región de estudio de este proyecto. Ellos utilizaron los datos de radiosondeos de las 12 UTC (6 a.m. hora local) del 22 de julio al 8 de agosto del año 2013. Los radiosondeos utilizados fueron los de San José, República Dominicana, Gran Caimán y Trinidad & Tobago. Además, utilizaron datos de reanálisis de NCAR para el periodo entre el 1 de julio y el 31 de agosto del 2013, como también variables meteorológicas de mediciones en San José durante el mismo periodo de tiempo.

El análisis mostró que la CLA de la región Centroamericana y el Caribe modificó su contenido de agua, humedad, temperatura potencial equivalente, nubosidad y refractividad, durante la incursión de la masa de polvo proveniente del desierto del Sahara y el Sahel. Además, esta incursión provocó una disminución evidente en la precipitación en Costa Rica (Poleo y Briceño, 2014).

El análisis de radiosondeos permitió determinar que la relación de mezcla y la temperatura potencial equivalente fueron las variables mayormente afectadas, disminuyendo su valor hasta la mitad de sus valores promedio, lo que representa masas de aire con menor contenido de agua y más estables que inhiben las lluvias. Lo anterior se obtuvo sin presencia de ningún evento

sinóptico que afectara la subsidencia, por lo que Poleo y Briceño (2014) concluyeron que la disminución fue producto de la masa de polvo proveniente del Sahara.

El efecto de disminución de lluvias fue más notorio en Costa Rica debido a la dinámica atmosférica que influyen los sectores montañosos, generando turbulencia y mezcla en la CLA (Poleo y Briceño, 2014). Además, el chorro de bajo nivel del Caribe posiblemente alargó el tiempo de deposición de la masa de polvo (Amador, 2008). Poleo y Briceño (2014) atribuyen a esta corriente la responsabilidad del transporte de la masa de polvo desde el Caribe hasta el sector costarricense.

#### **4.3 PM<sub>10</sub> en Costa Rica**

Tal y como se mencionó anteriormente, el LAA cuenta con una red operativa de medición manual de PM<sub>10</sub> en el GAM. El cuadro 4.1 muestra los datos de concentración de PM<sub>10</sub> del año 2013 la cual demuestra que los promedios anuales cuentan con un máximo de 36  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (estación de Belén). Este valor no sobrepasa la norma costarricense (40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ); sin embargo, todas las estaciones superan el criterio de la OMS (20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), a excepción de la estación ubicada en Moravia. Es importante señalar que estos promedios cuentan con una desviación estándar importante e incertidumbres algunas veces elevadas (no mostradas en el cuadro). Las incertidumbres elevadas se deben al método de cálculo (incertidumbre tipo A) que son exigidas en este caso por tratarse de un método de ensayo acreditado bajo la norma INTE/ISO/IEC 17025:2017. En cuanto a las desviaciones estándar elevadas podrían relacionarse con el tipo de fuente asociada a cada estación (flujo vehicular, industrial, comercial, residencial). Debido al tipo de fuente, la dispersión de los datos puede ser en ocasiones alta.

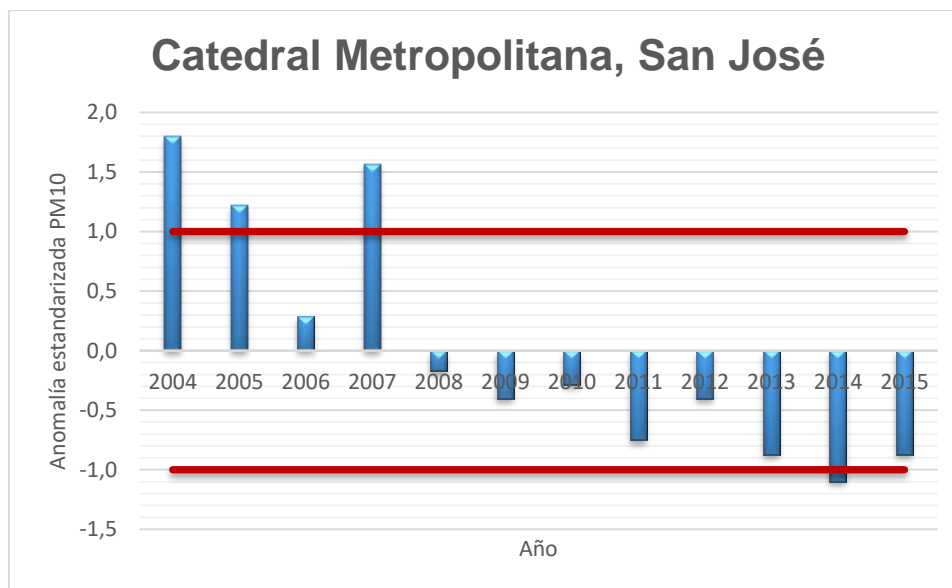
**Cuadro 4.1** Concentración promedio anual de partículas PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>) obtenidas en el Área Metropolitana de Costa Rica para el año 2013. Fuente: LAA-UNA

	Sitio de muestreo	AÑO 2013		
		Promedio Anual (µg/m <sup>3</sup> )	Desviación Estándar (µg/m <sup>3</sup> )	Valor máximo registrado en 24 horas
1	Catedral Metropolitana	23	8	52
2	Sección de Parques, MSJ	27	7	52
3	Centro de Reciclaje de Hatillo, MSJ	29	9	58
4	La Uruca	30	9	77
5	Registro Nacional, Zapote	23	7	62
6	Palacio Municipal, Escazú	22	6	44
7	Centro Comercial La Ribera, Belén	36	12	83
8	Estación Ferrocarril, Cartago	34	11	70
9	Rectoría de la UNA, Heredia	30	16	67
10	Lindora, Santa Ana	23	9	72
11	Parque Industrial, Cartago	26	9	72
12	Compañía EATON, Moravia	17	8	62
13	Universidad Técnica Nacional, Alajuela	27	10	73

En cuanto a los valores máximos de concentración de  $PM_{10}$  acumulados en 24 horas (cuadro 4.1), nótese que ningún resultado supera el límite máximo permisible de la norma nacional ( $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ); no obstante, todas las estaciones superan la norma europea y el criterio de la OMS ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), a excepción de la estación ubicada en Escazú.

En relación con el análisis estacional de las concentraciones de  $PM_{10}$ , aun no existe una clara tendencia ni explicación basada en datos científicos que defina el comportamiento de los niveles en época seca, transición y época lluviosa. Es decir, el comportamiento es variado, algunas veces aumenta la concentración y otras veces disminuye. La posible tendencia a disminuir la concentración de  $PM_{10}$  durante la época lluviosa, por procesos de deposición húmeda, no tiene una clara evidencia en los resultados de esta red ni existe una clara explicación del por qué se da lo contrario en algunos meses y diferentes estaciones de monitoreo.

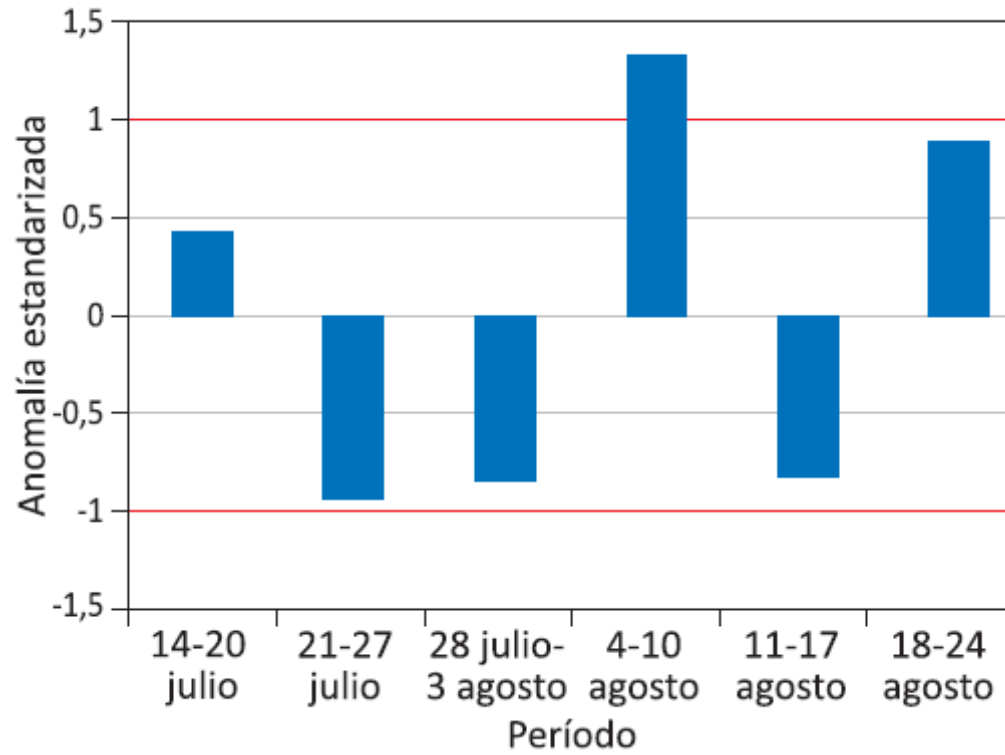
Por otro lado, es importante que se entienda que los niveles de concentración de  $PM_{10}$  registrados en el GAM cuentan con un historial en el que no existe una clara tendencia al aumento ni a la disminución de forma estadísticamente significativa. La figura 4.1 muestra un ejemplo de historial de anomalías estandarizadas para una estación de monitoreo específica que evidencia comportamientos sin aumentos ni descensos significativos de la concentración de este contaminante. Con esto se muestra que, aparentemente, los promedios anuales de  $PM_{10}$  son lo suficientemente estables en el tiempo, durante los últimos años.



**Figura 4.1** Comportamiento anual de la concentración de partículas PM<sub>10</sub> encontrada en el sitio de muestreo ubicado en la Catedral Metropolitana de San José. Fuente: LAA-UNA

A pesar de no existir un análisis rutinario de la correlación que existe entre los aumentos de la concentración de material particulado y el número de atenciones en salud por enfermedades asociadas al sistema respiratorio, Poleo y Briceño (2014) encontraron relación de ellas durante la semana en la que se presenció el episodio de intrusión de polvo del Sahara, mismo que cuenta con los niveles máximos anuales y periodo al que se refiere este proyecto de investigación. La figura 4.2 muestra un aumento significativo de las atenciones en centros de salud de la región central del país durante la semana del 4 al 10 de agosto del 2013.





**Figura 4.2** Casos atendidos por enfermedades respiratorias por semanas epidemiológicas entre el 14 de julio al 24 agosto 2013. Fuente: Caja Costarricense del Seguro Social. Tomado de Poleo y Briceño (2014).

## 5. RESULTADOS: Modelado de PM<sub>10</sub>

En adelante, en este documento se hará referencia al esquema de polvo utilizado con los siguientes nombres y referencias:

dust\_opt =1: "GOCART" (Ginoux et al.. 2001)

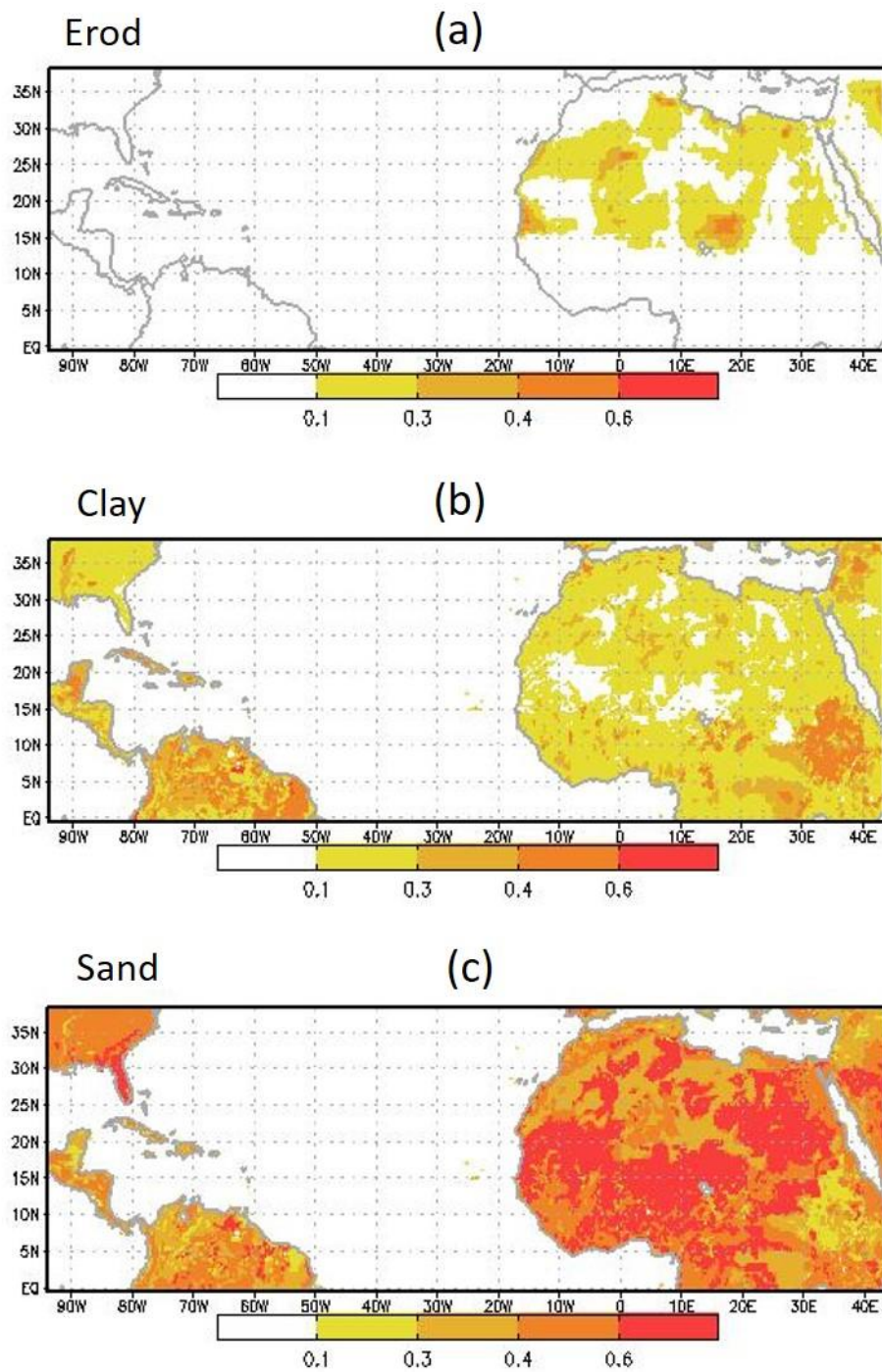
dust:opt=3: "AFWA" (Jones et al. 2010, 2012)

dust\_opt=4: "UoC" (Shao 2001, 2004), (Shao et al. 2011).

En la figura 5.1 se muestra la fracción de material erosionable proveniente de la región de los desiertos del Sahara y el Sahel. Además, en esta misma figura se representa la fracción de arena y arcilla dentro del área que comprende el dominio estudiado.

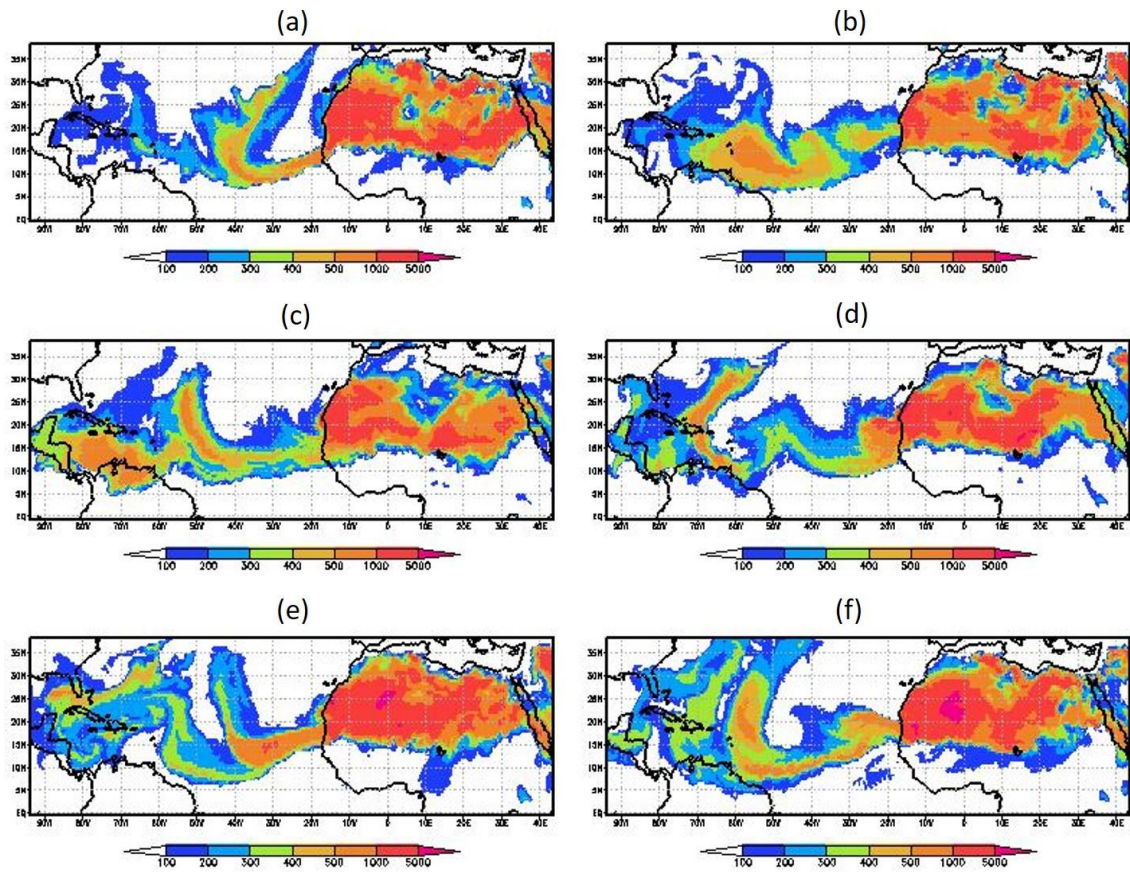
En la figura 5.2 se evidencia el transporte de polvo mineral desde el Noroeste del continente africano hasta la región del Caribe y Centroamérica, cubriendo y afectando a Costa Rica en términos de contaminación ambiental, específicamente con el contaminante conocido como PM<sub>10</sub>. Esta figura corresponde a la simulación con el esquema GOCART y se muestra a manera de ejemplo y evidencia del transporte de polvo estudiado.

En la misma figura (5.2 c) se logra apreciar que la masa de material particulado cubre parcialmente la región costarricense el día 06 de agosto del año 2013 a las 14:00 (UTC). Según Poleo y Briceño (2014), para esta fecha el país presenció un evento de intrusión de polvos del Sahara que se confirma con mediciones realizadas en superficie (ver figura 5.3).



**Figura 5.1.** Condiciones iniciales para el modelado de polvo mediante el uso del WRF-Chem. a) Fracción erosionable en superficie; b) Fracción de arcilla; c) Fracción de arena.

Fuente: propia

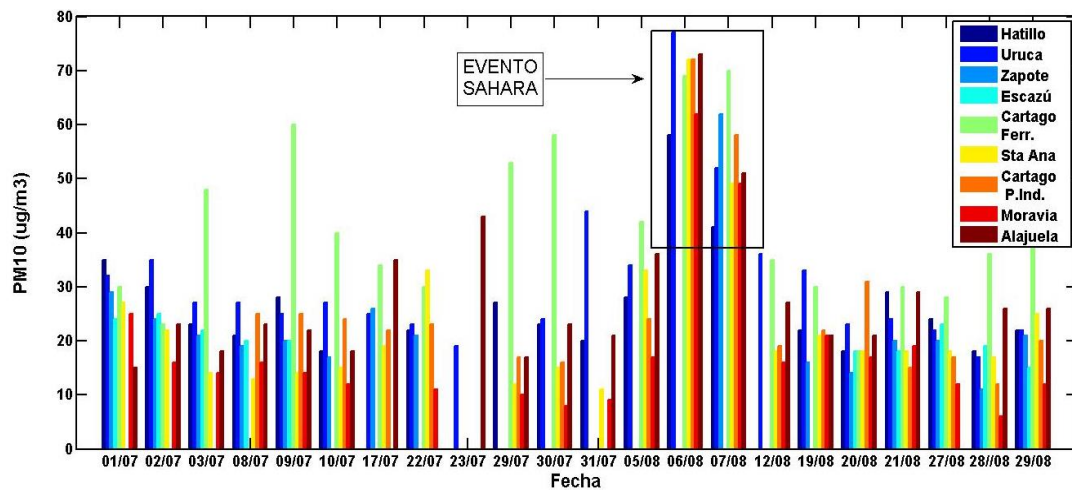


**Figura 5.2.** Modelado de la concentración de partículas  $PM_{10}$  en  $\mu g/m^3$ , mediante la utilización del esquema de polvo GOCART: a) 01/08/13\_00:00 b) 03/08/13\_19:00 c) 06/08/13\_14:00 d) 09/08/13\_09:00 e) 12/08/13\_04:00 f) 15/08/13\_00:00.

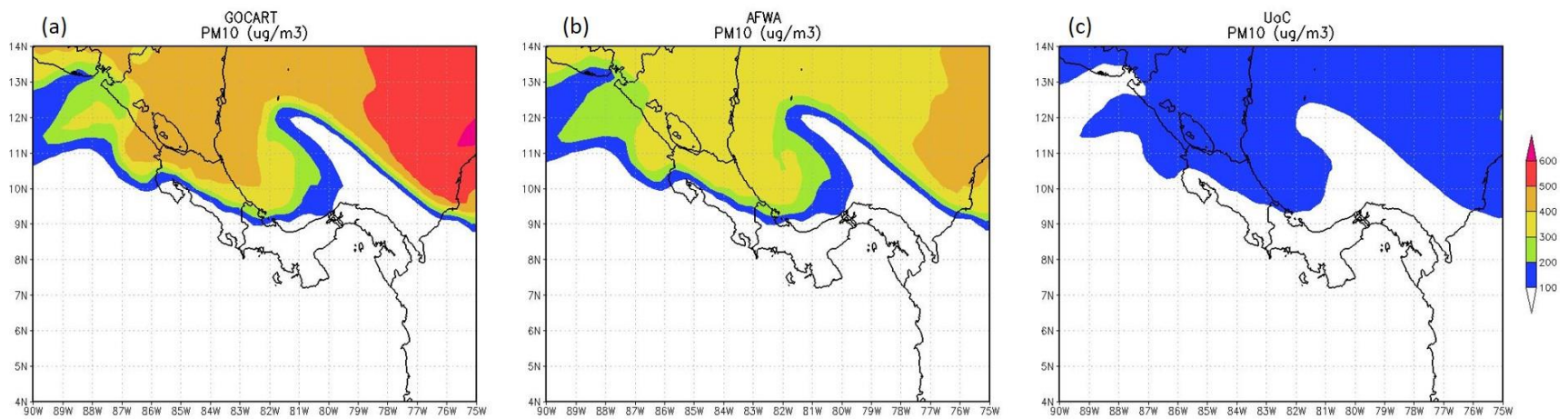
Fuente: propia

En la investigación se realizó la simulación de material particulado con tres diferentes esquemas de polvo. Esto conlleva a la necesidad de tomar en cuenta que los resultados de concentración de  $PM_{10}$  se refiere a fuentes naturales (polvo mineral) y no evidencia aportes por fuentes antropogénicas. En la figura 5.4 se representa un periodo de tiempo específico en el cual se aprecia la concentración de  $PM_{10}$  modelada mediante los esquemas GOCART, AFWA y UoC. En esta figura se observa que existen niveles de concentración de  $PM_{10}$

importantes (mayores a  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en una hora local de las 2:00am. Esto demuestra que el modelo logra simular aportes naturales de polvo mineral en la región de estudio ya que, en este horario, no es usual que predomine una concentración de  $\text{PM}_{10}$  de origen antropogénico, por fuentes industriales o de flujo vehicular.



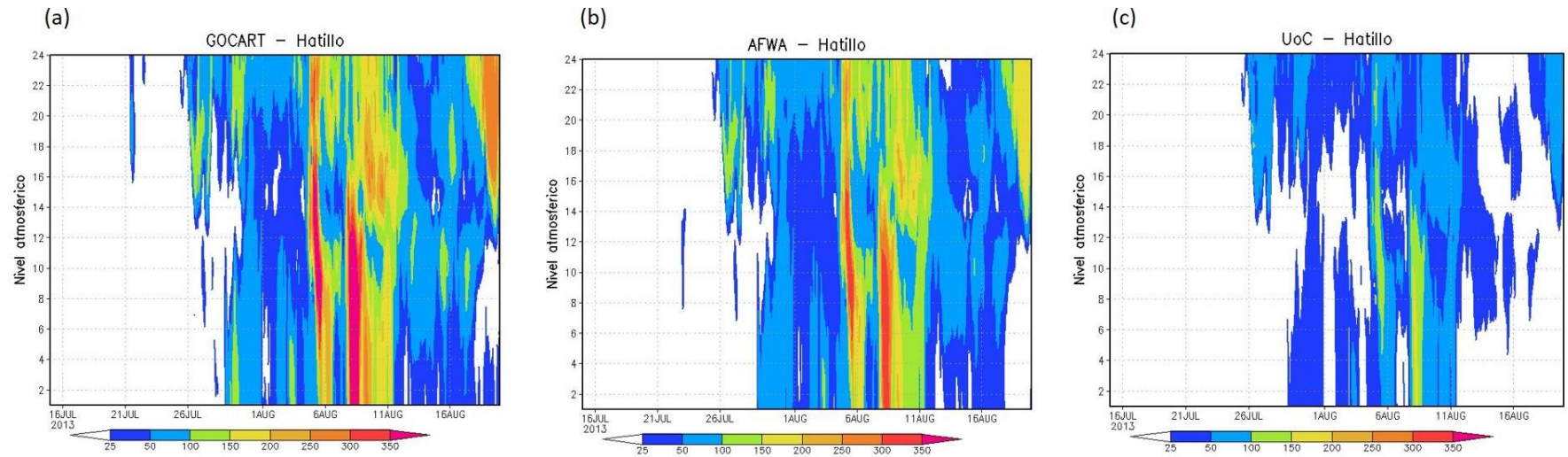
**Figura 5.3.** Niveles de concentración de  $\text{PM}_{10}$  en 9 puntos de medición de la GAM para el periodo comprendido entre julio y agosto 2013. Fuente: Poleo y Briceño (2014).



**Figura 5.4.** Modelado de la concentración de partículas PM<sub>10</sub> en µg/m<sup>3</sup> en superficie, mediante la utilización de los esquemas de polvo a) GOCART b) AFWA y c) UoC. Fecha local: 07/08/13\_02:00am. Fuente: propia

Los niveles de concentración de los contaminantes atmosféricos juegan un papel importante en la afección a la salud a nivel de superficie. No obstante, en esta investigación se realizó la simulación de  $PM_{10}$  a distintos niveles atmosféricos para poder obtener un modelado real del transporte, desde el continente africano hasta la región costarricense. Este proceso, desde su emisión y dispersión, hasta el transporte y deposición, debe contemplar los diferentes niveles atmosféricos para finalmente analizar los datos en superficie que simbolizan la concentración de contaminantes que podríamos respirar en la superficie terrestre. En la figura 5.5 se muestra la concentración de  $PM_{10}$  en un punto específico del GAM costarricense y a distintos niveles atmosféricos. Se puede apreciar que los tres esquemas de polvo utilizados fueron capaces de resolver una importante concentración de  $PM_{10}$  en los días que se conocen como el evento de intrusión de polvos del Sahara (aproximadamente 06 al 08 de agosto de 2013).

Continuando el análisis de la figura 5.5, se puede apreciar que la intrusión de polvos del Sahara en este punto geográfico se evidencia desde antes del 06 de agosto de 2013. Sin embargo, los datos medidos y discutidos en Poleo y Briceño (2014) demuestran que el aumento de concentración de  $PM_{10}$  toma mayor importancia en el periodo del 06 al 08 de agosto. El comportamiento fue similar en los demás puntos geográficos analizados en este estudio.



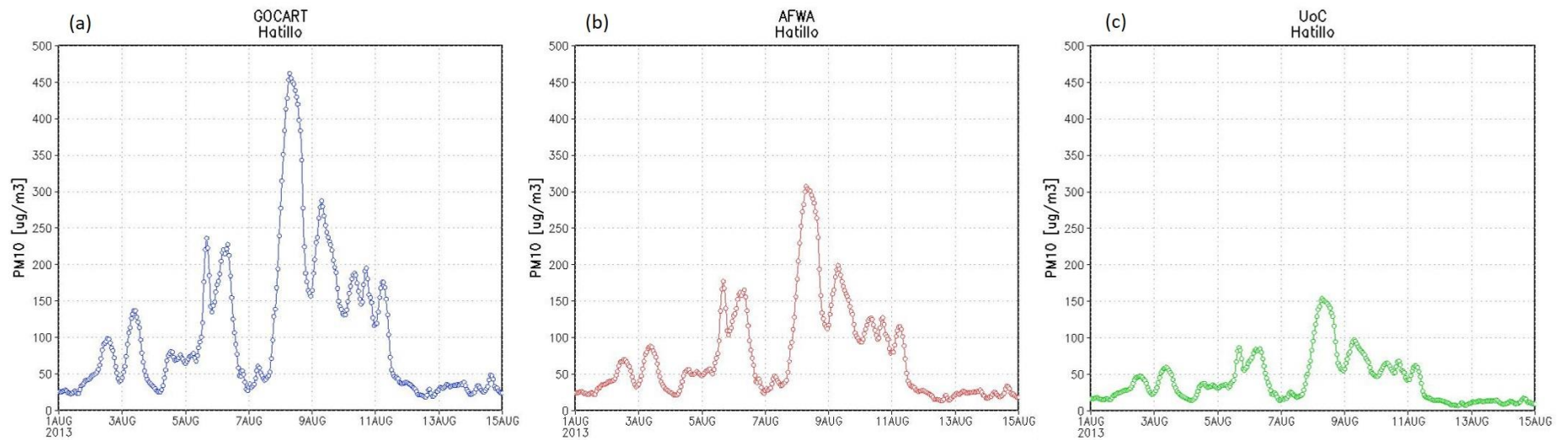
**Figura 5.5.** Modelado de la concentración de partículas PM<sub>10</sub> en µg/m<sup>3</sup> mediante la utilización del esquema de polvo a) GOCART, b) AFWA y c) UoC. Sitio: Hatillo. Fecha UTC: (01/07 - 20/08) /2013.

Fuente: propia



Por otro lado, y haciendo énfasis en superficie, la figura 5.6 muestra el modelado de partículas  $PM_{10}$  en el punto geográfico “Hatillo” con los 3 diferentes esquemas de polvo. Nótese que, independiente del esquema utilizado, la intrusión de polvo en la región costarricense parece estar evidenciada por el modelo días atrás del evento conocido. Esto refleja una deficiencia en la medición del contaminante atmosférico debido a la discontinuidad de las observaciones. Sin embargo, los esquemas utilizados indican que, del 06 al 08 de agosto de 2013, los niveles de concentración de  $PM_{10}$  tuvieron una gran importancia en el periodo de estudio de este proyecto. Además, los esquemas (simulaciones) también muestran que este episodio se extendió hasta aproximadamente el 11 de agosto, día en que no hubo mediciones para su análisis.

Continuando el análisis de la figura 5.6, se logra evidenciar que los tres esquemas de polvo utilizados cuentan con una morfología casi idéntica en términos de los mínimos y máximos de los resultados obtenidos. Esto se debe a que los tres esquemas de polvo, independientemente de la forma en que calculan la concentración de las partículas  $PM_{10}$ , parten de la misma entrada de datos, que en esta ocasión se refiere al material erosionable (ver figura 5.1 a). Es decir, se puede observar y comprobar que la única diferencia entre estos esquemas es la magnitud de los datos resultantes; sin embargo, los tres mantienen su comportamiento a lo largo de la serie de tiempo estudiada en este proyecto.



**Figura 5.6** Modelado de la concentración de partículas PM<sub>10</sub> en µg/m<sup>3</sup> mediante la utilización de los esquemas de polvo a) GOCART, b) AFWA y c) UoC.

Sitio: Hatillo. Fecha UTC: (01/08 - 15/08) /2013.

Es importante reiterar que este tipo de experimentos de simulación no se han realizado en el país con anterioridad, por lo que no existía una configuración siquiera física que simule adecuadamente las variables de interés de este proyecto. Es decir, es pertinente partir de este documento para continuar con una segunda etapa en la misma línea de investigación, que permita la mejora de las configuraciones físicas y químicas para obtener mejores resultados con respecto a las mediciones en superficie.

Este proyecto, inicialmente, tuvo la ambición de simular partículas  $PM_{10}$ , tomando en cuenta esquemas químicos que tomen en cuenta las reacciones químicas que se desarrollan a lo largo de la dispersión, transporte y deposición de los contaminantes atmosféricos como el analizado en este estudio. Sin embargo, por limitaciones computacionales y por una cuestión de inventario de emisiones se redujo el proyecto a la simulación de  $PM_{10}$  utilizando los esquemas de polvo disponibles en el modelo WRF-Chem.

Costa Rica no cuenta con un inventario de emisiones que contemple las necesidades de entrada del modelo WRF-Chem, para la utilización de esquemas que simulen con detalle las reacciones químicas más importantes. No obstante, el modelo PREP-CHEM-SOURCES (Freitas et al., 2011) es un algoritmo que puede generar un tipo de inventario de emisiones que puede ser convertido mediante una aplicación del modelo WRF-Chem a un formato legible por este mismo modelo. Sin embargo, a la fecha de finalización de este proyecto, la herramienta computacional que logra esta conversión de formato no se logró optimizar para obtener resultados adecuados. Además, la utilización del modelo PREP-CHEM-SOURCES, sumado a la inclusión de esquemas químicos en el modelo WRF-Chem, es un proyecto sumamente costoso en poder computacional y memoria necesaria para el almacenamiento de los datos. Se reitera lo anterior con la finalidad de crear comprensión a los lectores de este documento. Asimismo, esta breve explicación intenta dar a conocer otra

de las razones por las cuales se utilizaron las parametrizaciones físicas indicadas en la metodología del experimento. Como bien se mencionó en esa sección, las parametrizaciones físicas utilizadas fueron las que los ejercicios tutoriales del modelo WRF-Chem toma en cuenta para realizar simulaciones que tomen en cuenta la química acuosa, química de aerosoles y química del estado gaseoso. De esta forma, la futura optimización de los esquemas físicos y químicos podrán contar con un ejercicio base, el cual se desarrolló en esta investigación. Además, es de suma importancia que se tome en cuenta que para una futura configuración física se deben elegir esquemas que permitan ser utilizados en conjunto con los esquemas químicos, ya que en algunas ocasiones existen limitaciones de compatibilidad. Es claro que algunas de las parametrizaciones físicas utilizadas en este proyecto podrían estar afectando la correcta simulación de algunos de los procesos que se llevan a cabo en la atmósfera; sin embargo, se debe entender cuál fue la razón de su elección según lo que se explicó anteriormente.

## 6. RESULTADOS: Evaluación del modelo

### 6.1 Evaluación de PM<sub>10</sub>

En relación con la evaluación del modelo, esta se realizó contra datos reales medidos en superficie; sin embargo, debido a la gran cantidad de datos faltantes en el periodo estudiado, se procedió a realizar las comparaciones en el periodo único de mayor contribución de polvo mineral a la concentración de partículas PM<sub>10</sub> en Costa Rica. Este periodo se estableció entre los días 05/08/13 10:00am (hora local) al 08/08/13 10:00am (hora local). Este periodo cuenta con datos de calidad y completos para los sitios de muestreo mostrados en el cuadro 3.2.

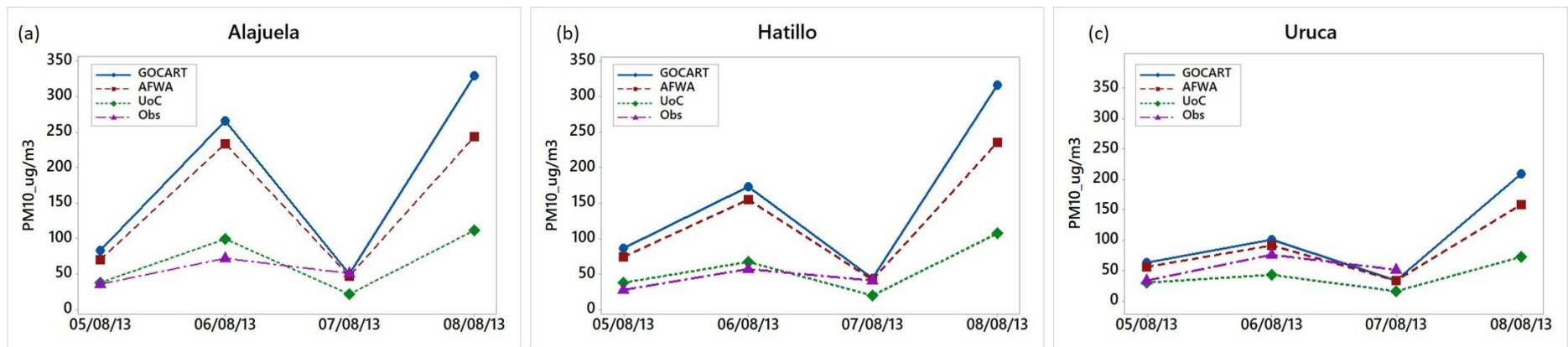
Con respecto a las simulaciones, se procedió a calcular los promedios de acumulados de 24 horas en los periodos de mediciones, tal y como se especificó en la metodología del proyecto. Para esto se mantuvo el cuidado de corregir los periodos de tiempo a horarios locales.

En relación con el esquema GOCART, el modelo sobrestima los valores acumulados de 24 horas en 6 de los 9 sitios analizados. La excepción se obtuvo únicamente para el día 07 de agosto de 2013; es decir, en la mayor parte del tiempo y todos los sitios analizados, el esquema GOCART reportó datos de concentración de PM<sub>10</sub> sobreestimados con respecto a las mediciones.

La figura 6.1 representa los acumulados obtenidos para 3 sitios analizados en este estudio. Alajuela y Hatillo presentaron datos sobrestimados con el esquema de polvo GOCART; por su parte, el sitio Uruca obtuvo valores sobrestimados a excepción del día 07 de agosto de 2013. Dentro de las simulaciones realizadas con el esquema AFWA, el modelo al igual que con el esquema GOCART, reportó datos sobrestimados en 7 de 9 puntos. Sin embargo, la excepción de igual forma recae en únicamente el día 07 de agosto de 2013. Por esta razón, podría asumirse que el modelo sobrestima los niveles de concentración de PM<sub>10</sub> con respecto a las mediciones. Finalmente, el esquema UoC de forma gráfica no pareciera tener un sobrestimado claro de las

concentraciones de  $PM_{10}$  en relación con las mediciones. En algunos de los sitios analizados está por encima de los valores medidos y en otros está ligeramente por debajo; no obstante, no se encuentra una tendencia ni correlación acertada del comportamiento generalizado.

En términos generales, el esquema GOCART sobrestimó los resultados con respecto a las observaciones en un 78%, mientras que los esquemas de AFWA y UoC lo hicieron en un 75 y 39%, respectivamente. Por consiguiente, los esquemas GOCART, AFWA y UoC subestimaron las mediciones en porcentajes respectivos de 22, 25 y 61%. El análisis anterior no toma en cuenta cuánto se sobrestimó o subestimó en relación con las observaciones; sin embargo, muestra evidencia de la variación de un esquema a otro en términos de la diferencia positiva o negativa obtenida.



**Figura 6.1.** Concentración de partículas PM<sub>10</sub> en µg/m<sup>3</sup> (simulaciones y observaciones). a) Alajuela, b) Hatillo y c) Uruca. Fecha local: 05 – 08 de agosto de 2013. Fuente: propia

En términos estadísticos, se dice que un modelo tiene un buen desempeño si las desviaciones estándares de las observaciones se aproximan a las de los resultados simulados (Pielke, 1984). En los cuadros 6.1, 6.2 y 6.3 se muestran los estadísticos calculados a partir de los datos obtenidos de acumulados de 24 horas para 3 diferentes sitios. En estos cuadros se puede observar que la desviación estándar que se asemeja mayoritariamente a la calculada para las observaciones es la del esquema UoC. Además, este comportamiento se observa para la totalidad de los sitios analizados en esta investigación.

**Cuadro 6.1** Evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Hatillo.

Sitio	Centro de Acopio Municipal, Hatillo			
Naturaleza	Residencial / Comercial			
Estadístico	GOCART	AFWA	UoC	Obs
$\sigma$	66	58	24	15
r	0,714	0,744	0,673	1,000
R <sup>2</sup>	0,509	0,554	0,453	1,000
BIAS	59	49	0	0
MAE	59	49	0	0
MSE	5621	3906	209	0
RMSE	75	62	14	0

**Cuadro 6.2** Evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Uruca.

Sitio	Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca			
Naturaleza	Comercial			
Estadístico	GOCART	AFWA	UoC	Obs
$\sigma$	34	29	13	22
r	0,630	0,684	0,561	1,000
R <sup>2</sup>	0,397	0,467	0,315	1,000
BIAS	12	6	-24	0
MAE	12	6	24	0
MSE	602	348	800	0
RMSE	25	19	28	0



**Cuadro 6.3** Evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Alajuela.

Sitio	Universidad Técnica Nacional, Alajuela			
Naturaleza	Comercial			
Estadístico	GOCART	AFWA	UoC	Obs
$\sigma$	116	102	41	19
r	0,849	0,863	0,823	1,000
R <sup>2</sup>	0,721	0,745	0,677	1,000
BIAS	80	64	0	0
MAE	80	64	0	0
MSE	13252	9082	507	0
RMSE	115	95	23	0

Al igual que la desviación estándar, los demás parámetros estadísticos calculados en la evaluación del modelo requieren un análisis exhaustivo para determinar cuál esquema de polvo refleja un mejor desempeño con respecto a las mediciones.

En el caso del coeficiente de correlación de Pearson, se obtuvo resultados que varían según el sitio analizado. Es por esta razón que se muestra un ejemplo de un sitio específico (cuadro 6.4) y, además, un cuadro resumen que incluye todos los sitios de medición (cuadro 6.5). Cabe destacar que todos los parámetros estadísticos deben tener un punto de comparación para determinar objetivamente el desempeño del modelo estudiado. Ambos cuadros mencionados anteriormente incluyen una comparación contra investigaciones similares.

En el cuadro 6.4 se aprecia que el coeficiente de Pearson obtenido en los tres esquemas de polvo utilizados fue considerablemente acertado ( $>0,995$ ). Esto refleja, tomando en cuenta la referencia utilizada y la teoría del coeficiente como tal, que la correlación entre las simulaciones y las mediciones tuvo una tendencia casi perfecta, en donde la perfecta correlación sería el valor de una unidad. Sin embargo, este comportamiento no ocurrió de la misma forma en todos los sitios de medición estudiados (ver anexos).

Continuando la observación del cuadro 6.4, el  $R^2$  reflejó valores bastante buenos para este sitio de medición, con respecto a Spak y Holloway (2009) e inclusive con respecto a Gupta y Mohan (2013). El BIAS reflejó que existe un error más importante utilizando el esquema GOCART y AFWA que con el esquema UoC. Este último, en relación con Gueye y Jenkins (2019) obtuvo valores de BIAS cercanos a la referencia; sin embargo, se obtuvo un valor de MSE mucho mayor que Gupta y Mohan (2013). Además, el RMSE reflejó valores muy por debajo de los obtenidos por Gueye y Jenkins (2019), esto para los tres esquemas de polvo. Por último, el RMSE obtenido con el esquema UoC fue el de menor valor y fue bastante cercano al obtenido por Tsarpalis et al. (2018).

**Cuadro 6.4** Resultado de parámetros estadísticos utilizando esquemas de polvo GOCART, AFWA y UoC. Sitio: Catedral Metropolitana, San José.

Parámetro Estadístico	Catedral Metropolitana San José			Otros estudios	Observaciones	Referencia
	GOCART	AFWA	UoC			
<b>r</b>	0,999	1,000	0,995	<b>&gt;0,9</b>	Met: NCEP. Chem_opt: RACM y MADE/SORGAM. Res: 90Km. Emis: Prep-chem-sources.	Gupta y Mohan (2013)
<b>R<sup>2</sup></b>	0,998	1,000	0,991	<b>[0,33 - 0,85]</b>	Modelo: CMAQ. Met: no indica. Chem_opt: RADM. Res: 36Km. Emis: SMOKE y MOZART.	Spak y Holloway (2009)
<b>BIAS</b>	118	90	22	<b>1,9</b>	Met: ECMWF. Chem_opt: GOCART/AFWA. Res: 25Km.	Tsarpalis et al. (2018)
				<b>[-633,12 - 8,88]</b>	Met: NCEP. Chem_opt: GOCART. Res: 18Km.	Gueye y Jenkins (2019)
				<b>[-624,58 - 3,18]</b>	Met: NCEP. Chem_opt: GOCART. Res: 50Km.	Gueye y Jenkins (2019)
				<b>[-767,65 - -0,06]</b>	Met: NCEP. Chem_opt: GOCART. Res: 100Km.	Gueye y Jenkins (2019)
<b>MSE</b>	24085	13115	1318	<b>&lt;0,28</b>	Met: NCEP. Chem_opt: RACM y MADE/SORGAM. Res: 90Km. Emis: Prep-chem-sources.	Gupta y Mohan (2013)
<b>RMSE</b>	155	115	36	<b>30,2</b>	Met: ECMWF. Chem_opt: GOCART/AFWA. Res: 25Km.	Tsarpalis et al. (2018)
				<b>[41,05 - 1132,37]</b>	Met: NCEP. Chem_opt: GOCART. Res: 18Km.	Gueye y Jenkins (2019)
				<b>[50,96 - 1092,29]</b>	Met: NCEP. Chem_opt: GOCART. Res: 50Km.	Gueye y Jenkins (2019)
				<b>[60,46 - 1083,12]</b>	Met: NCEP. Chem_opt: GOCART. Res: 100Km.	Gueye y Jenkins (2019)

El cuadro 6.5 muestra intervalos para cada parámetro estadístico calculado tomando en cuenta los 9 sitios de medición. El coeficiente de correlación  $r$  muestra un valor mínimo de 0,162, 0,206 y 0,106 para los esquemas GOCART, AFWA y UoC, respectivamente. No obstante, estos valores se refieren al punto de la estación de Ferrocarril, Cartago. En apariencia, este punto pareciera presentar valores atípicos de este parámetro. Si se observa la mediana de  $r$ , los tres esquemas presentan correlaciones con un coeficiente mayor a 0,561. Esto demuestra una correlación importante pero siempre menor a la obtenida por Gupta y Mohan (2013). Es importante destacar que Gupta y Mohan (2013) utilizan un esquema químico que incluye no solamente el polvo, sino también la química en fase gaseosa (RADM2) descrita por (Stockwell et al., 1990), y mecanismos de fotólisis (Madronich, 1987) y aerosoles (MADE/SORGAM) descritos por (Ackermann et al., 1998 y Schell et al., 2001). Por esta razón aparente, esta referencia (Gupta y Mohan, 2013) pareciera obtener un modelo con mejor correlación contra mediciones que el presente estudio.

Con respecto al coeficiente de determinación, el esquema AFWA reportó una mediana de 0,467, un valor más alto que los esquemas GOCART y UoC. Los tres esquemas utilizados presentaron intervalos amplios para este parámetro estadístico y las medianas se muestran cercanas al valor mínimo reportado por Spak y Holloway (2009). Es importante tener en cuenta que la correlación como tal fue calculada con pocos datos debido a que la concentración de  $PM_{10}$  reportada por mediciones se refiere a acumulados de 24 horas. A pesar de que las simulaciones cuentan con una resolución temporal más amplia se debió ajustar a la resolución de las mediciones. Con esto se desea expresar que las correlaciones utilizadas podrían estar sesgadas por tratarse de un conjunto de datos muy pequeños. Sin embargo, la literatura consultada no muestra de forma explícita cómo o con cuántos datos cuentan a la hora de realizar el cálculo de un estadístico como el coeficiente de Pearson o el coeficiente de determinación.

**Cuadro 6.5** Resultado de parámetros estadísticos utilizando esquemas de polvo GOCART, AFWA y UoC. Resumen de todos los sitios de medición.

Parámetro Estadístico	GOCART	AFWA	UoC	Otros estudios	Observaciones	Referencia
r	[0,162 - 0,999] {0,630}	[0,206 - 1,000] {0,684}	[0,106 - 0,995] {0,561}	>0,9	Met: NCEP. Chem_opt: RACM/RADM2 y MADE/SORGAM. Res: 90Km. Emis: Prep-chem-sources.	Gupta y Mohan (2013)
R <sup>2</sup>	[0,026 - 0,998] {0,397}	[0,042 - 1,000] {0,467}	[0,011 - 0,991] {0,315}	[0,33 - 0,85]	Modelo: CMAQ. Met: no indica. Chem_opt: RADM. Res: 36Km. Emis: SMOKE y MOZART.	Spak y Holloway (2009)
BIAS	[12 - 118] {59}	[6 - 90] {48}	[-24 - -0,090] {-9}	1,9	Met: ECMWF. Chem_opt: GOCART/AFWA. Res: 25Km.	Tsarpalis et al. (2018)
				[-633,12 - 8,88]	Met: NCEP. Chem_opt: GOCART. Res: 18Km.	Gueye y Jenkins (2019)
				[-624,58 - 3,18]	Met: NCEP. Chem_opt: GOCART. Res: 50Km.	Gueye y Jenkins (2019)
				[-767,65 - -0,06]	Met: NCEP. Chem_opt: GOCART. Res: 100Km.	Gueye y Jenkins (2019)
MSE	[602 - 24085] {5621}	[348 - 13115] {3906}	[209 - 1318] {626}	<0,28	Met: NCEP. Chem_opt: RACM y MADE/SORGAM. Res: 90Km. Emis: Prep-chem-sources.	Gupta y Mohan (2013)
RMSE	[25 - 155] {75}	[19 - 115] {62}	[14 - 36] {25}	30,2	Met: ECMWF. Chem_opt: GOCART/AFWA. Res: 25Km.	Tsarpalis et al. (2018)
				[41,05 - 1132,37]	Met: NCEP. Chem_opt: GOCART. Res: 18Km.	Gueye y Jenkins (2019)
				[50,96 - 1092,29]	Met: NCEP. Chem_opt: GOCART. Res: 50Km.	Gueye y Jenkins (2019)
				[60,46 - 1083,12]	Met: NCEP. Chem_opt: GOCART. Res: 100Km.	Gueye y Jenkins (2019)

Nota: {Mediana}

El error medio o BIAS mostrado en el cuadro 6.5 representa una mediana obtenida para el esquema de UoC con igual orden de magnitud que el reportado por Tsarpalis et al. (2018) y que Gueye y Jenkins (2019). Este último tomando en cuenta las resoluciones de 18 y 50 Km. De acuerdo con esto, se podría decir que el esquema UoC (Mediana BIAS =  $-9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) reportó un error muy similar al de las referencias citadas anteriormente. Además, es importante destacar que ambas referencias se refieren a investigaciones que utilizaron únicamente esquemas de polvo, al igual que la forma en la que se procedió en esta metodología. Por último, los esquemas de GOCART y AFWA presentaron valores de error medio lo suficientemente bajos para decir que también se obtuvo un error medio similar a las referencias consultadas; además, el esquema UoC obtuvo valores más bajos, representando así un mejor desempeño del esquema con respecto a GOCART y AFWA.

Continuando el análisis y con relación al parámetro MSE, los 3 esquemas utilizados reflejaron valores muy por encima de los reportados por Gupta y Mohan (2013). Sin embargo, de nuevo se debe dejar en claro que esta investigación con la cual se compara cuenta con esquemas químicos más completos en términos de la química de los aerosoles y los gases.

Finalmente, el cuadro 6.5 muestra valores calculados de la raíz del error cuadrático medio para los tres esquemas utilizados. Se obtuvo medianas de 75, 62 y 25 unidades para GOCART, AFWA y UoC respectivamente, siendo este último esquema el que resultó con mejor desempeño en relación con este parámetro estadístico. Se observa además que, tomando en cuenta la investigación publicada por Gueye y Jenkins (2019), los RMSE de sus tres resoluciones (18, 50 y 100 Km) cuentan con valores mínimos muy similares a los obtenidos en el presente estudio. Asimismo, los valores máximos de RMSE de este trabajo están muy por debajo de los reportados por esta referencia, lo cual indica que se obtuvo valores de RMSE bastante acertados. El esquema UoC, además de resultar con el valor más bajo y similar a la referencia anterior,

también tiene una similitud importante con el RMSE reportado por Tsarpalis et al. (2018).

Es importante resaltar que la evaluación realizada en esta investigación cuenta con la limitación de que se trata de un estudio de caso. Es decir, una validación más robusta comprende periodos más extensos que sean capaces de incluir fenómenos estacionales e inclusive eventos sinópticos como ondas tropicales, frentes, Niño, entre otros.

## **6.2 Evaluación de lluvia y viento**

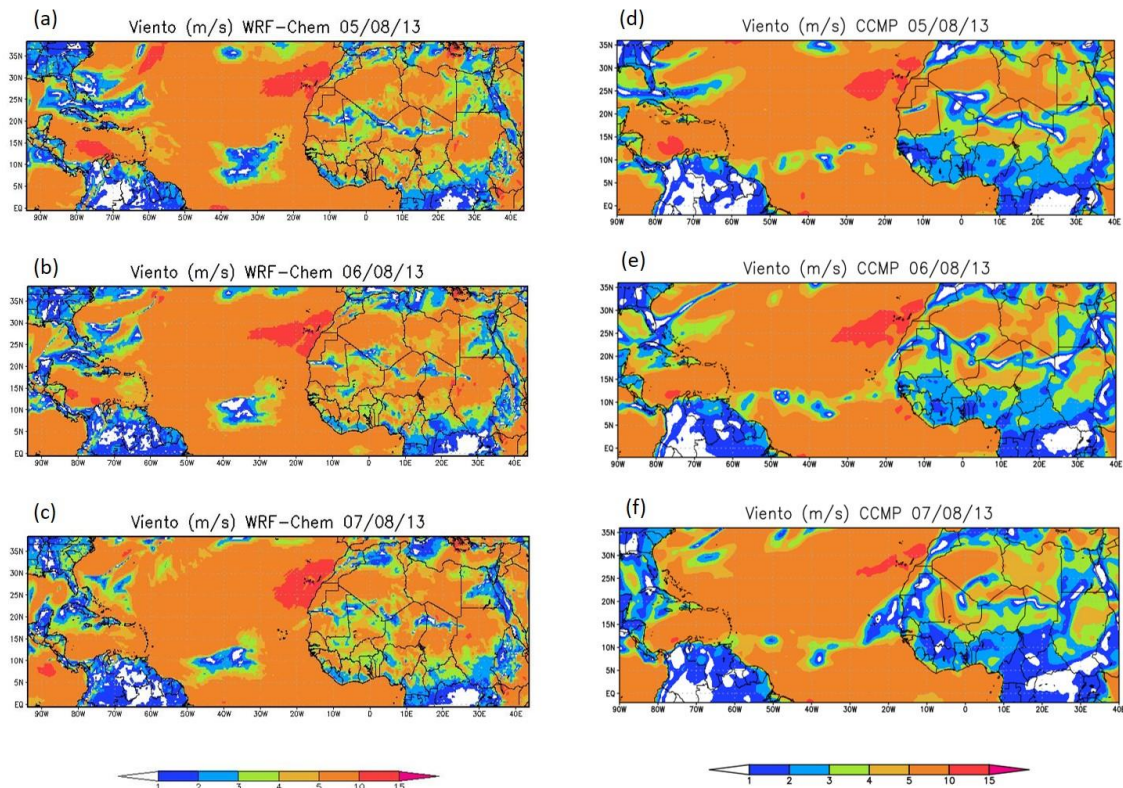
Además de la evaluación de la concentración de  $PM_{10}$  resultante en este proyecto, se procedió a realizar una evaluación sencilla de algunas variables meteorológicas como la lluvia y el viento. Esto con la única finalidad de encontrar posibles fuentes de error que hayan influido en las simulaciones realizadas con los tres esquemas de polvo.

Para lo anterior se procedió a realizar comparaciones a nivel visual de los resultados de viento y precipitación contra datos de Reanálisis. Además, se tomaron algunas de las estaciones meteorológicas cercanas a los puntos de monitoreo de  $PM_{10}$  para realizar la comparación contra los resultados del modelo.

### **6.2.1 Reanálisis**

Con relación a la magnitud de viento, se procedió a analizar esta variable en los días de mayor impacto en mediciones de  $PM_{10}$  debido a la intrusión de polvo del Sahara en Costa Rica. En la figura 6.2 se muestra que el modelo WRF-Chem logra simular los picos máximos de viento ubicados en el noroeste del continente africano para los días estudiados; además, los picos ubicados en el Caribe parecieran simularse bien el 05 y 06 de agosto, con una disminución en su buen desempeño el día 07 de agosto. En cuanto a los mínimos de viento visualizados según CCMP (figura 6.2 d, e y f), estos se superan un poco en el continente africano y

en el sur de América; no obstante, y de forma muy general, el viento aparentemente se simula bien en la zona del Océano Atlántico, espacio en el cual se lleva a cabo el transporte del contaminante estudiado en este proyecto.



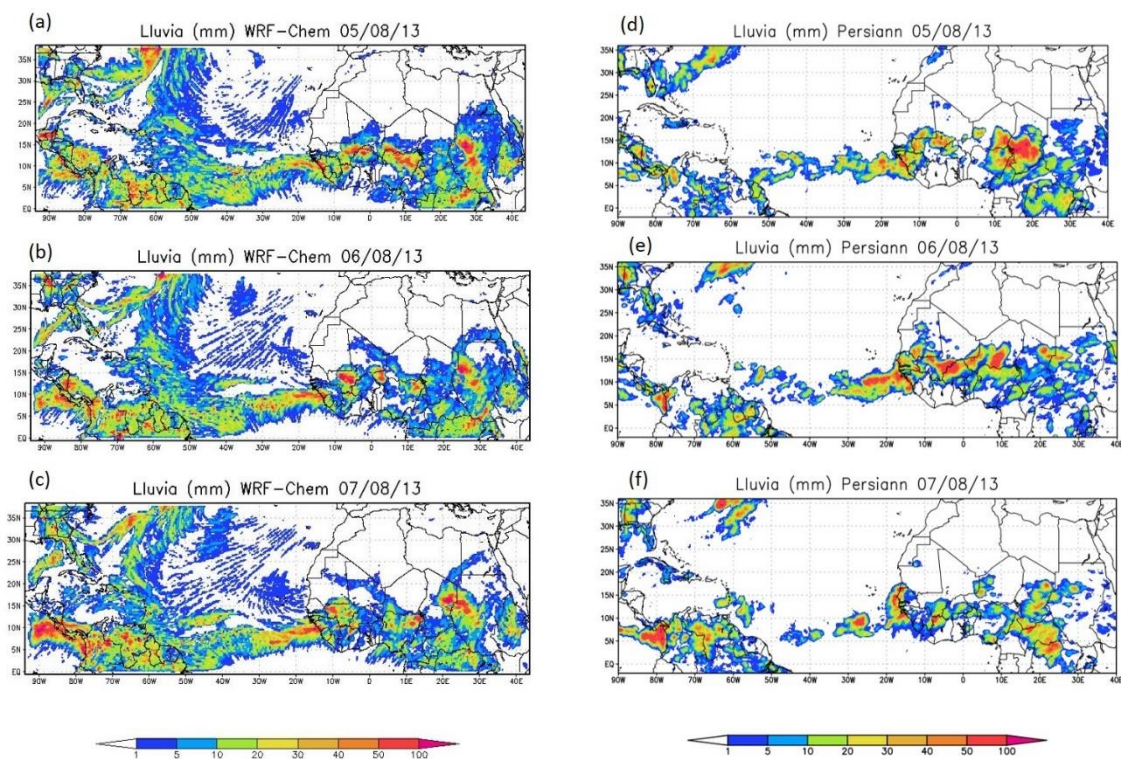
**Figura 6.2** Magnitud de viento superficial en el dominio de estudio mediante la utilización del modelo WRF-Chem (25 km x 25 km, 1 hora) y CCMP (25 km x 25 km, 6 horas). Fuente: propia

Por otro lado, los acumulados de lluvia modelados en Costa Rica (figura 6.3 a, b y c), obtuvieron una sobrestimación con respecto a los datos extraídos de Persiann-CDR (Sorooshian et al. 2014). La simulación muestra mayores diferencias con respecto a Persiann el día 07 de agosto de 2013, en donde el máximo de lluvia se sobrepone sobre el sector costarricense, mientras que los



datos de Persiann evidencian un pico de magnitud similar orientado al sureste del país.

El análisis del dominio utilizado en este estudio no presentó diferencias altas en el Océano Atlántico, específicamente en donde se encuentra la zona de transporte de polvo. A pesar de que sí existe sobrestimación del modelo en esta zona, el análisis cualitativo muestra que existe concordancia en los órdenes de magnitud de lluvia (entre 5 y 20 mm). Por otro lado, según el análisis de la figura 6.3, la lluvia parametrizada (convectiva) pareciera ser la más afectada en la masa continental americana. Es decir, la precipitación acumulada difiere mayoritariamente en esta región, mas no así en la zona de trayectoria de polvos, lo que podría afectar poco la variación de polvo sahariano por procesos de deposición húmeda durante el transporte.



**Figura 6.3** Acumulado de lluvia en el dominio de estudio mediante la utilización del modelo WRF-Chem (25 km x 25 km, 1 hora) y Persiann-CDR (25 km x 25 km, 1 día). Fuente: propia

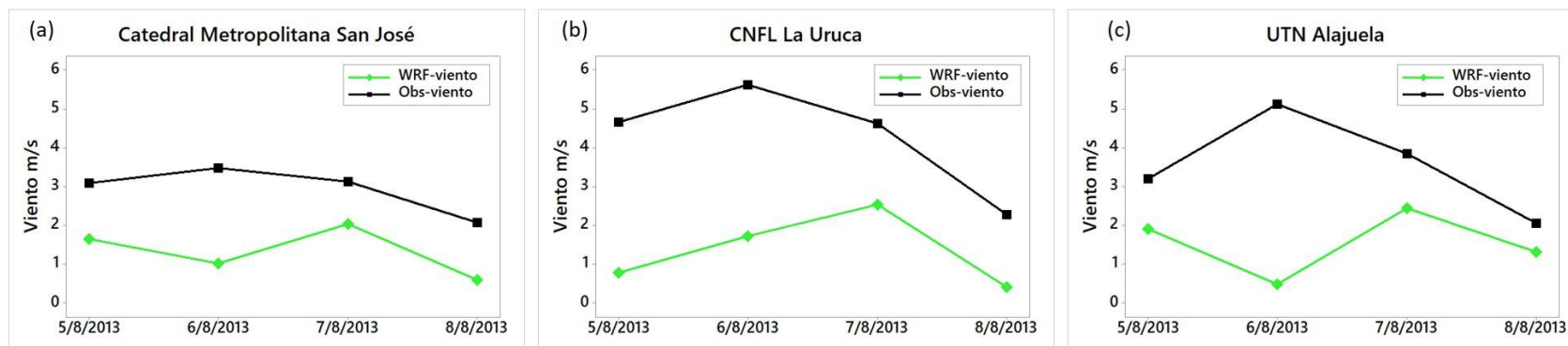
Los esquemas de polvo podrían llegar a ser sensibles ante los acumulados de lluvia sobrestimados que se presenciaron durante las simulaciones; sin embargo, durante este proyecto no se realizó una estimación de lo que esto podría llegar a afectar los resultados finales de la concentración de partículas  $PM_{10}$ . Algunos autores como Rizza et al. (2017) especulan que un factor importante para determinar el bajo rendimiento de los niveles de concentración de material particulado podría estar relacionado con una representación inadecuada de la deposición húmeda del polvo del Sahara; sin embargo, este tipo de estudios cuentan con la inclusión de esquemas químicos que sí toman en cuenta este tipo de procesos y son afectados mayoritariamente. Es decir, no se puede realizar una comparación estrictamente válida con este proyecto, además de que únicamente se trata de especulaciones y no datos comprobados.

### **6.2.2 Mediciones meteorológicas**

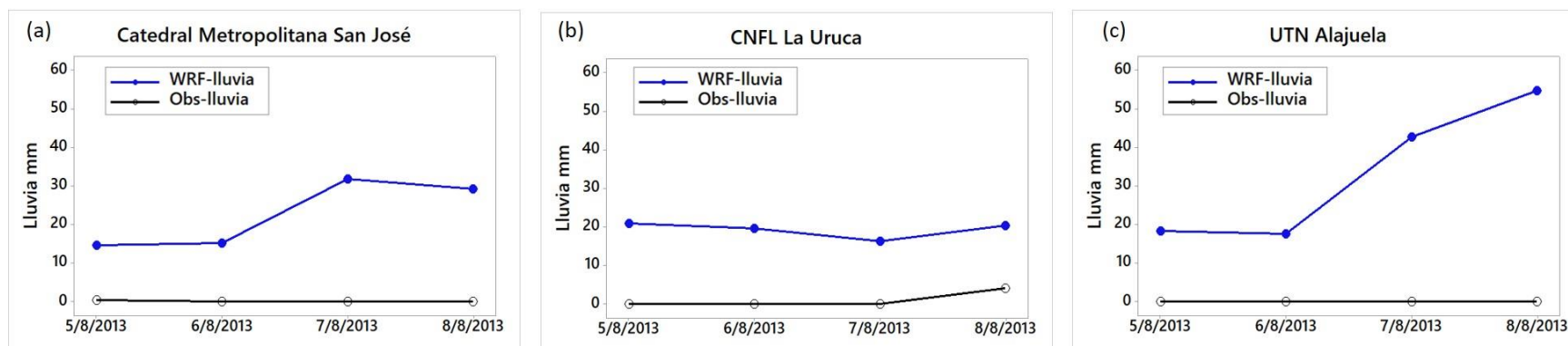
Continuando la búsqueda de posibles errores asociados a las concentraciones resultantes de  $PM_{10}$ , se realizó la comparación del viento y lluvia en los puntos geográficos específicos de tres zonas de medición de contaminantes. Para lo anterior se compararon las variables meteorológicas obtenidas a partir de las simulaciones contra las medidas en estaciones meteorológicas del Instituto Meteorológico Nacional, cuidando que estas estaciones fueran lo suficientemente cercanas a estos puntos geográficos para que la comparación sea válida.

En la figura 6.4 se muestra que los datos obtenidos para la magnitud de viento resultaron con ciertas diferencias de aproximadamente los 2 m/s promedio, entre las simulaciones y las obtenidas de mediciones. Sin embargo, los patrones se comportaron similares, con excepción del día 06 de agosto en la estación de la Catedral Metropolitana y la UTN, como también el día 07 de agosto en la estación de la Uruca.

Los resultados obtenidos de magnitud de viento simulado mantienen el orden de magnitud respecto a las mediciones de la red oficial de Costa Rica. No obstante, habría que realizar un análisis más detallado para validar si la magnitud de viento presenta diferencias significativas con respecto a las mediciones en superficie.



**Figura 6.4** Magnitud de viento (10 m) en el dominio de estudio mediante la utilización del modelo WRF-Chem (25 km x 25 km, 1 hora) y mediciones del IMN. Fuente: propia



**Figura 6.5** Acumulado de lluvia en el dominio de estudio mediante la utilización del modelo WRF-Chem (25 km x 25 km, 1 hora) y mediciones del IMN. Fuente: propia

Por otro lado, la comparación de resultados de lluvia del modelo contra las mediciones muestra un comportamiento sobrestimado durante los días analizados. La figura 6.5 evidencia que el modelo obtuvo valores de lluvia acumulada diaria entre los 15 y 55 mm, mientras que las observaciones no superaron los 4 mm en ninguna de las estaciones estudiadas. Lo anterior, en conjunto con los resultados de Persiann-CDR, confirma que la configuración física de este proyecto tiene deficiencias para simular los acumulados de lluvia convectiva en el dominio estudiado. Además, esto podría provocar algún tipo de diferencias en el modelado de la concentración de partículas  $PM_{10}$  provenientes de polvo del Sahara.

Los esquemas de GOCART y AFWA resultaron en concentraciones de partículas mayores en su mayoría y podría pensarse que la sobrestimación de lluvia simulada tiende a la subestimación resultante de la concentración de partículas. No obstante, esto no es un pensamiento válido en todos los casos, ya que los procesos de deposición húmeda y seca son muy complejos. Estos toman en cuenta una serie de fenómenos físicos que fueron mencionados en este documento y que no son aislados, sino que funcionan como un sistema atmosférico completo. Por esta razón, no se conoce si los resultados de las simulaciones de este experimento guardan relación con la presencia de acumulados de lluvia desproporcionados, en relación con las mediciones en superficie.

La breve evaluación de las variables meteorológicas mostró que la investigación obtuvo deficiencias principalmente en acumulados de lluvia durante el pequeño periodo analizado. Sin embargo, y a pesar de que el viento obtuvo mejores resultados con respecto a la lluvia, de igual forma obtuvo resultados deficientes que podrían afectar mayoritariamente los esquemas de polvo utilizados. Esto debido a que los tres esquemas de polvo se enfocan en mecanismos de formación de polvo a partir de la magnitud de viento o su eventual fricción en superficie. Por otro lado, la causa raíz de estas diferencias entre simulaciones y observaciones recae no solamente en las

parametrizaciones físicas utilizadas que podrían estar influyendo de forma negativa, sino también en la configuración del dominio y la resolución espacial utilizada. Las parametrizaciones de superficie y capa límite atmosférica tienen una importante relación en el cálculo de la variable viento; sin embargo, la ausencia de estudios de sensibilidad no permite conclusiones válidas de cuál o cuáles parametrizaciones físicas podrían ser sustituidas por otras más adecuadas para este estudio.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este proyecto partió de la premisa de que el país tiene la necesidad del modelado de contaminantes atmosféricos mediante simulaciones que tomen en cuenta la meteorología y geografía del dominio de estudio. Esto debido a que, como se indicó en la caracterización de la atmósfera de interés, no se cuenta con estudios que involucren la dinámica de la atmósfera, los procesos de capa límite atmosférica, y, además, la inmensa cantidad de reacciones químicas involucradas durante los procesos que caracterizan finalmente al sistema atmosférico descrito en el marco teórico de este documento.

El modelo WRF-Chem es un sistema muy poderoso que permite simulaciones meteorológicas y químicas tomando en cuenta la necesidad descrita anteriormente; sin embargo, este modelo tiene una serie de problemáticas y limitaciones que afectan directamente el proceso que se pretende alcanzar para contar con una herramienta que más adelante permita el pronóstico a corto plazo de contaminantes atmosféricos con afección a la salud humana.

WRF-Chem requiere, dependiendo del alcance deseado, un poder computacional importante y una capacidad de almacenamiento que permita la factibilidad del proyecto. Lo anterior se incrementa de forma muy significativa si el alcance desea incluir esquemas químicos que simulen reacciones acuosas, gaseosas y de aerosoles. Además, el usuario de WRF-Chem debe tener conocimientos básicos en sistemas operativos basados en GNU/Linux, ya que el modelo se trabaja en este tipo de sistemas.

El usuario de WRF-Chem en Costa Rica debe tener el conocimiento necesario para la instalación, configuración, compilación de bibliotecas y el modelo como tal. Para la realización de este proyecto se realizó una pasantía de investigación inicial en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (CCA-UNAM), centro que cuenta con una importante experiencia en el manejo del WRF-Chem. Además, se

contó con la colaboración técnica y de equipo del Colaboratorio Nacional de Computación Avanzada del Centro Nacional de Alta Tecnología (CNCA-CeNAT).

Por primera vez en Costa Rica, este proyecto simuló la concentración de partículas  $PM_{10}$  provenientes del desierto del Sahara mediante el uso del modelo WRF-Chem. Es importante tomar en cuenta que este modelo no se había utilizado en el pasado para la simulación de contaminantes atmosféricos con un grado de interés especial en la salud humana.

### **7.1 Modelado de $PM_{10}$**

Durante la ejecución de este proyecto se concluyó que el modelo WRF-Chem versión 3.9.1.1, mediante la utilización de esquemas de polvo como GOCART, AFWA y UoC, permite la simulación de partículas  $PM_{10}$ , evidenciando el transporte de polvo sahariano desde el continente africano hasta la región costarricense.

Los niveles de concentración alcanzados durante el periodo simulado superaron, en algunos casos, las normas nacionales e internacionales de contaminantes criterio. Además, las mediciones realizadas en el pasado habían permitido detectar el evento de intrusión de polvos del Sahara; no obstante, esta investigación permitió determinar que el evento se extendió hasta aproximadamente el 11 de agosto del 2013.

En cuanto a las parametrizaciones físicas utilizadas para el modelado de  $PM_{10}$ , se utilizaron las que el tutorial del WRF-Chem recomienda para ejercicios que contemplan el uso de esquemas químicos completos. Lo anterior ya que el proyecto inicial tenía la ambición de ejecutar el modelo con este tipo de esquemas. No obstante, existieron limitaciones importantes dentro de las cuales están las siguientes:

- el modelo WRF-Chem requiere de un inventario de emisiones como datos de entrada; sin embargo, en Costa Rica nunca se ha realizado un inventario de este tipo, con los requerimientos que el modelo necesita.



-la capacidad de almacenamiento y poder computacional necesaria no fue suficiente para procesar esquemas químicos más complejos.

Además, una de las vías iniciales fue incluir el uso del modelo PREP-CHEM-SOURCES y para esto se realizó una pasantía de investigación en la Universidad São João del-Rei, Brasil; sin embargo, este modelo requiere la conversión de datos de las salidas resultantes para poderlas incluir en el modelo WRF-Chem. El convertidor de datos contaba con errores en código conocidos y publicados por los desarrolladores de la NOAA; no obstante, a pesar de la comunicación directa con personal de esa institución, no se logró realizar las correcciones a tiempo para la ejecución de este proyecto.

Es importante destacar que, a pesar de la posible deficiencia encontrada de las parametrizaciones físicas utilizadas en este experimento, para empezar la corrección se debe tener claro la necesidad a futuro de la inclusión de esquemas químicos más completos y que esto requiere en algunos casos parametrizaciones físicas específicas. Se podría realizar un estudio de sensibilidad del modelado de partículas  $PM_{10}$ , variando algunas de las parametrizaciones físicas disponibles para los esquemas de polvo utilizados en el presente estudio.

LeGrand et al. (2019) publicó pequeños detalles de correcciones en códigos fuente de algunos de los esquemas de polvo utilizados en este proyecto, por lo que se recomienda realizar una posterior revisión de lo que esto podría estar afectando el modelado de polvo mineral. Por otro lado, la utilización del esquema de polvo UoC en esta investigación no tomó en cuenta los sub-esquemas disponibles por lo que se recomienda la ejecución de ellos y verificar si existe una mejora apreciable en los resultados obtenidos. Además, la utilización del esquema UoC permite la activación de deposición húmeda, lo cual también se incluye a manera de recomendación para futuros proyectos.

Finalmente, y, en síntesis, se recomienda para estudios homólogos que se utilice un esquema químico, en conjunto con un esquema de polvo, que

incluya fuentes naturales y antropogénicas, como también la química acuosa, química de gases y química de aerosoles. Esto requiere la utilización de un inventario de emisiones que se sugiere sea elaborado mediante la herramienta PREP-CHEM-SOURCES (Freitas et al., 2011). Es de suma importancia tener en cuenta que esta herramienta y los esquemas químicos disponibles requieren de un alto poder computacional y una significativa necesidad de memoria de almacenamiento.

## **7.2 Evaluación del modelo**

El esquema de polvo desarrollado por la Universidad de Cologne (UoC) obtuvo el mejor desempeño en el presente estudio, sustentado por varios parámetros estadísticos calculados con respecto a las mediciones realizadas en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica.

El esquema de polvo desarrollado por la Agencia Meteorológica de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos (AFWA) obtuvo mejor correlación con respecto a las mediciones; sin embargo, esto podría estar sesgado por utilizar un conjunto de datos pequeño. Un conjunto de datos más grande podría permitir la determinación de una distribución gaussiana con la finalidad de comprobar si el coeficiente de Pearson es el más adecuado para calcular en este tipo de estudios.

Se observó, de forma gráfica, que los esquemas de polvo GOCART y AFWA presentaron una sobrestimación de los niveles de concentración de  $PM_{10}$ ; sin embargo, no siempre se presentó esta tendencia; se trató de un comportamiento general pero no en su totalidad. Por otro lado, no se observó una clara tendencia de sobreestimado ni subestimado de la concentración de  $PM_{10}$  simulada mediante el uso del esquema de polvo UoC.

Se recomienda una futura evaluación del modelo utilizando datos de mediciones continuas que permitan ajustar la misma resolución temporal de las simulaciones de este estudio. Para esto se debe ubicar algún otro episodio de intrusión de polvos del Sahara al sector costarricense, en el cual los esquemas

de polvo utilizados sean capaces de demostrar el aumento de los niveles de concentración de  $PM_{10}$ . Además, las mediciones continuas y su simulación permitirían realizar estudios de ciclo diurno.

Si se desea realizar una evaluación más rigurosa del modelo, se recomienda aumentar la resolución espacial de las simulaciones. Esto requerirá la utilización de anidamiento de dominios, lo cual requiere de un mayor procesamiento de datos y por lo tanto mayor poder computacional. La recomendación anterior se debe a que en Costa Rica se cuenta con una red de monitoreo de  $PM_{10}$  que tiene sitios de muestreo cercanos; es decir, en algunos casos la distancia entre punto y punto no supera la resolución espacial del modelo utilizado en el presente estudio.

Con respecto a la evaluación de variables meteorológicas, la configuración física utilizada en este proyecto no logró buenos resultados en relación con el parámetro lluvia; sin embargo, la magnitud de viento no presentó errores significativos que aporten incertidumbre desproporcionada a los esquemas de polvo utilizados. La magnitud del viento y su dirección juegan un papel de mayor importancia en el transporte de polvo africano al continente americano, debido a los esquemas de polvo utilizados.

La simulación errada de variables meteorológicas podría ser una posible causa de error en los esquemas de polvo más afectados, es decir, GOCART y AFWA. Dicho de otro modo, la configuración física utilizada podría estar causando errores que afecten los esquemas de polvo y finalmente los resultados obtenidos de concentración de partículas. Para esto se recomienda realizar estudios de sensibilidad de las parametrizaciones físicas. Además, en el caso del esquema UoC, se recomienda estudiar la sensibilidad del modelo al activar el esquema de deposición húmeda y profundizar en su funcionamiento. Esto permitirá conclusiones válidas en relación con la posible afectación del modelo por las diferencias obtenidas en parámetros meteorológicos. Por otro

lado, la inclusión de esquemas químicos en el modelo permitirá determinar si esta afectación es aún más clara o si podría considerarse despreciable.

## 8. REFERENCIAS

Ackermann, I.J., Hass, H., Memmesheimer, M., Ebel, A., Binkowski, F.S., Shankar, U., 1998. Modal aerosol dynamics model for Europe: development and first applications. *Atmospheric Environment* 32, 2981–2999

Amador, J. A. (2008), The Intra-Americas Sea Low-Level Jet, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 1146, 153– 188, doi:10.1196/annals.1446.012.

American Meteorological Society, citado 2015: Deposition. Glossary of Meteorology. [Disponible en <http://glossary.ametsoc.org/wiki/deposition>.]

Ashouri H., K. Hsu, S. Sorooshian, D. K. Braithwaite, K. R. Knapp, L. D. Cecil, B. R. Nelson, and O. P. Prat, 2015: PERSIANN-CDR: Daily Precipitation Climate Data Record from Multi-Satellite Observations for Hydrological and Climate Studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00068.1>.

Atlas, R., R. N. Hoffman, J. Ardizzone, S. M. Leidner, J. C. Jusem, D. K. Smith, D. Gombos, 2011: A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 92, 157-174. doi: 10.1175/2010BAMS2946.1

Bergametti, G., & Forêt, G. (2014). Dust deposition. In P. Knippertz & J. B. W. Stuut (Eds.), *Mineral dust: A key player in the earth system* (pp. 179–200). Dordrecht, The Netherlands: Springer.

Bergametti, G., Gomes, L., Remoudaki, E., Desbois, M., Martin, D., Buat-Ménard, P. (1989). Present transport and deposition patterns of African dusts to the North-Western Mediterranean. In M. Leinen & M. Sarnthein (Eds.), *Paleoclimatology and paleometeorology: Modern and past patterns of global atmospheric transport* (pp. 227– 252). New York: Springer.

Chou M.-D., and M. J. Suarez, 1994: An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models. NASA Tech. Memo. 104606, 3, 85pp.

Dee D.P., S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Hólm, L. Isaksen, P. Kållberg, M. Köhler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavolato, J.-N. Thépaut, F. Vitart, 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137, 553–597.

DIGECA. (2011). Dirección de Gestión de Calidad Ambiental. (Lab. de Análisis Ambiental) Recuperado el 2015 de 07 de 31, de <http://www.digeca.go.cr/areas/informes-de-calidad-del-aire>

Durán-Quesada, A. M., L. Gimeno, J. A. Amador, and R. Nieto, 2010: Moisture sources for Central America: Identification of moisture sources using a Lagrangian analysis technique. *J. Geophys. Res.*, 115, D05103

EPA. (06 de 08 de 2016). United States Environmental Protection Agency. Recuperado el 25 de 02 de 2019, de <http://www3.epa.gov/airquality/cleanair.html>

Fels, Stephen. B., and M. D. Schwarzkopf, 1981, An efficient, accurate algorithm for calculating CO<sub>2</sub> 15 μm band cooling rates. *J. Geophys. Res.*, 86, 1205–1232.

Finlayson-Pitts, B. J., & Pitts, Jr., J. N. (2000). *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*. San Diego, California, USA: Academic Press

Foken, T. (2008). *Micrometeorology*. Germany: Springer.

Freitas, S. R., and Coauthors, 2011: PREP-CHEM-SRC – 1.0: a preprocessor of trace gas and aerosol emission fields for regional and global atmospheric chemistry models. *Geosci. Model Dev.*, 4, 419–433

Ginoux, P., M. Chin, I. Tegen, J. M. Prospero, B. Holben, O. Dubovik, and S.-J. Lin, 2001: Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *J. Geophys. Res.*, 106(D17), 20255-20273.

Grell, Georg A., 1993: Prognostic Evaluation of Assumptions Used by Cumulus Parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 764–787.

Grell, G. A, D. Devenyi, 2002: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1693

Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKeen, S. A., Frost, G., Skamarock, W. C., & Eder, B. (2005). Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*, 39(37), 6957–6975.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.027>

Gupta, M., and M. Mohan, 2013: Assessment of contribution to PM<sub>10</sub> concentrations from long range transport of pollutants using WRF/Chem over a

subtropical urban airshed. Atmos. Pollut. Res., 4, 405–410, doi:10.5094/APR.2013.046.

Herrera, J. (2010). Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio del Aire. Universidad Nacional, Laboratorio de Análisis Ambiental. Recuperado el 2015 de 07 de 31, de:

[http://www.digeca.go.cr/sites/default/files/documentos/inventario\\_de\\_emisiones\\_de\\_costa\\_rica\\_final.pdf](http://www.digeca.go.cr/sites/default/files/documentos/inventario_de_emisiones_de_costa_rica_final.pdf)

Hong, Song–You, Jimy Dudhia, and Shu–Hua Chen, 2004: A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. Mon. Wea. Rev., 132, 103–120.

Hong, Song–You, Yign Noh, Jimy Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. Mon. Wea. Rev., 134, 2318–2341.

I.P. ON CLIMATE CHANGE, Climate Change 2001. IPCC Third Assessment Report. The Scientific Basis, 2001. WMO and UNEP.

INEC. (2011). Censo 2011. Instituto Nacional de Estadística y Censos. Recuperado el 31 de 07 de 2015, de <http://www.inec.go.cr/Web/Home/GeneradorPagina.aspx>

Jones, S. L., Adams-Selin, R., Hunt, E. D., Creighton, G. A., Cetola, J. D., 2012: Update on modifications to WRF-CHEM GOCART for fine-scale dust forecasting at AFWA. AGU Fall Meeting Abstracts.



Jones, S. L., Adams-Selin, R., Hunt, E. D., Creighton, G. A., Cetola, J. D., 2010: Adapting WRF-CHEM GOCART for Fine-Scale Dust Forecasting. AGU Fall Meeting Abstracts, Vol. 1.

Kabatas, B., a. Unal, R. B. Pierce, T. Kindap, and L. Pozzoli, 2014: The contribution of Saharan dust in PM<sub>10</sub> concentration levels in Anatolian Peninsula of Turkey. *Sci. Total Environ*, 488-489, 413–421

Knippertz, P., 2017: Mineral Dust Generation across Northern Africa and Its Impacts. 1-48 pp.  
<http://climatescience.oxfordre.com/view/10.1093/acrefore/9780190228620.001.001/acrefore-9780190228620-e-516>.

Kuciauskas, A. P., P. Xian, E. J. Hyer, M. I. Oyola, and J. R. Campbell, 2018: Supporting Weather Forecasters in Predicting and Monitoring Saharan Air Layer Dust Events as They Impact the Greater Caribbean. *Am. Meteorol. Soc.*, 259–268, doi:10.1175/BAMS-D-16-0212.1.

Kumar, A.; Abouchami, W.; Galer, SJG; Garrison, VH.; Williams, E. & Andreae, M.O (2014). A radiogenic isotope tracer study of transatlantic dust transport from Africa to the Caribbean. *Atmospheric Environment*. 82 130-143.

LeGrand, S. L., C. Polashenski, T. W. Letcher, G. A. Creighton, S. E. Peckham, and J. D. Cetola, 2019: The AFWA dust emission scheme for the GOCART aerosol model in WRF-Chem v3.8.1. *Geosci. Model Dev.*, 12, 131–166, doi:10.5194/gmd-12-131-2019.

Lin, Yanluan, and Brian A. Colle, 2011: A new bulk microphysical scheme that includes riming intensity and temperature–dependent ice characteristics. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 1013–1035.

Madronich, S., 1987. Photodissociation in the atmosphere: 1. Actinic flux and the effects of ground reflections and clouds. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres* 92, 9740–9752

Mlawer, Eli. J., Steven. J. Taubman, Patrick. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough (1997), Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102, 16663–16682.

NCAR / UCAR. (2015). Atmospheric Chemistry Observations & Modeling. Recuperado el 13 de 09 de 2015, de <https://www2.acom.ucar.edu/wrf-chem>

Nikfal A, Ranjbar Saadatabadi A, Sehatkashani S. Investigation of dust schemes in the model WRF / CHEM. *Journal of Air Pollution and Health*. 2018; 3(1): 1-8

NOAA. (2018). WRF-Chem model. Recuperado el 21 de 02 de 2019, de WRF-Chem User's Guide Version 3.9.1.1: [https://ruc.noaa.gov/wrf/wrf-chem/Users\\_guide.pdf](https://ruc.noaa.gov/wrf/wrf-chem/Users_guide.pdf)

Organización Mundial de la Salud. (02 de mayo, 2018). Centro de Prensa: Calidad del aire (exterior) y salud. Recuperado el 25 de 02 de 2019, de Nota descriptiva N°313: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>

Pielke, R.A. (1984). *Mesoscale Meteorological Modeling*. Orlando: Academic Press. pp 225

Poleo, D., y Briceño, J. 2014: La intrusión de polvo del Sahara y del Sahel en la capa límite atmosférica del Mar Caribe: episodio de agosto 2013. *Tópicos Meteorológicos y Ocean.*, 13, 68–89.

Rizza, U., and Coauthors, 2017: WRF-Chem model simulations of a dust outbreak over the central Mediterranean and comparison with multi-sensor desert dust observations. doi:10.5194/acp-17-93-2017.

Schell, B., Ackermann, I.J., Hass, H., 2001. Modeling the formation of secondary organic aerosol within a comprehensive air quality model system. *Journal of Geophysical Research* 106, 28275–28293.

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climate Change* (2nd ed.). USA: John Wiley & Sons, Inc. pp 55, 60, 629, 900, 932, 1092.

Shao, Y., 2001: A model for mineral dust emission. *J. Geophys. Res.*, 106,20,239-20,254.

Shao, Y., 2004: Simplification of a dust emission scheme and comparison with data *J. Geophys. Res.*, 109, doi:10.1029/2003JD004372.

Shao, Y., M. Ishizuka, M. Mikami, J. Leys, 2011: Parameterization of size-resolved dust emission and validation with measurements. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 116, D08203, doi:10.1029/2010JD014527.

Shumake-Guillemot, J.; Jalkanen, L.; Adhair-Rohani, H. 2014. Air Quality and Human Health, a priority for joint action. *WMO Bulletin* 63 (2) pp 15-18.

Skamarock, W. C., and Coauthors, 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp, doi:10.5065/D68S4MVH.

Sorooshian, Soroosh; Hsu, Kuolin; Braithwaite, Dan; Ashouri, Hamed; and NOAA CDR Program (2014): NOAA Climate Data Record (CDR) of Precipitation

Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN-CDR), Version 1 Revision 1. [05-08/08/13]. NOAA National Centers for Environmental Information. doi:10.7289/V51V5BWQ [15/04/2019].

Spak, S.N., Holloway, T., 2009. Seasonality of speciated aerosol transport over the Great Lakes region. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres* 114, art. no. D08302.

Sportisse, B. (2008). *Fundamentals in Air Pollution: From Processes to Modelling*. France: Springer. pp 93, 181.

Stockwell, W.R., Middleton, P., Chang, J.S., Tang, X., 1990. The second-generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres* 95, 16343–16367

Stull, RB (1988) *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, Boston, London, 11 pp.

Tao, Wei-Kuo, Joanne Simpson, Michael McCumber, 1989: An Ice–Water Saturation Adjustment. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 231–235.

Tsarpalis, K., A. Papadopoulos, N. Mihalopoulos, C. Spyrou, S. Michaelides, and P. Katsafados, 2018: The Implementation of a Mineral Dust Wet Deposition Scheme in the GOCART-AFWA Module of the WRF Model. *Remote Sens.*, 10, 1595, doi:10.3390/rs10101595.

Vallero, D. A. (2008). *Fundamentals of air pollution* (4th ed.). Durham, North Carolina: Academic Press. pp 380, 552, 554, 556.

Wentz, F.J., J. Scott, R. Hoffman, M. Leidner, R. Atlas, J. Ardizzone, 2015: Remote Sensing Systems Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP) 6-hourly ocean vector wind analysis product on 0.25 deg grid, Version 2.0, [05-08/08/13]. Remote Sensing Systems, Santa Rosa, CA. Available online at [www.remss.com/measurements/ccmp](http://www.remss.com/measurements/ccmp). [Accesado el 15/04/19].

Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (Third ed.). Elsevier Inc.

Zhang, L., Gong, S., Padro, J., & Barrie, L. (2001). A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module. *Atmospheric Environment*, 35(3), 549–560.

## 9. ANEXOS

### 9.1 Descripción del modelo

#### 9.1.1 WRF

El WRF (Weather Research and Forecasting model) es un sistema de predicción numérica diseñado para investigación atmosférica y pronóstico operativo. Dentro de las principales actividades realizadas por la comunidad científica están las siguientes:

- Simulaciones ideales y reales de procesos convectivos, ondas baroclínicas, etc.
- Investigación sobre huracanes
- Investigación sobre clima regional
- Pronóstico del tiempo
- Investigación sobre aerosoles
- Investigación y pronóstico de la calidad del aire.

El modelo WRF cuenta con diferentes módulos o programas, en este proyecto se utilizaron los siguientes:

- WPS (WRF Preprocessing System)
- ARW Solver (Advanced Research WRF)
- Post-Processing and visualization tools

#### 9.1.2 WPS

Este programa se define como el preprocesador del WRF. En él se definen los dominios de la simulación y además se interpola la información terrestre, es decir, el terreno, el uso de suelo y los tipos de suelo, etc.

#### 9.1.3 ARW-Solver

ARW es uno de los dos núcleos dinámicos con los que cuenta el modelo WRF. Este es el componente que resuelve la integración numérica mediante diversos programas.

#### 9.1.4 Post-processing and visualizations tools

En este módulo se pueden utilizar diferentes visualizadores como los son GrADS (Grid Analysis and Display System), RIP4 (Read/Interpolate/Plot), NCL (NCAR Graphics Command Language), VAPOR (Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers), entre otros.

El ARWpost es un paquete que lee los archivos de salida del modelo WRF y crea otros que pueden ser leídos por el visualizador GrADS.

### 9.2 WRF-Chem

WRF-Chem es el modelo WRF con la química. El modelo simula la emisión, el transporte, la mezcla, y las transformaciones químicas de los gases traza y aerosoles, simultáneamente con la meteorología. Es utilizado para la investigación de la calidad del aire a escala regional, análisis de campo, y las interacciones entre las nubes y la química (NCAR / UCAR, 2015).

Algunos de los componentes del WRF-Chem son los siguientes (NOAA, 2018):

- Deposición seca
- Opciones de emisiones biogénicas
- Opciones de emisiones antropogénicas
- Opciones para mecanismos químicos en fase gaseosa
- Opciones para esquemas de fotólisis
- Opciones para esquemas de aerosoles
- Opciones para un esquema de aerosoles de ceniza volcánica con base en las emisiones de un volcán activo.
- Opciones de trazador
- Opciones para incendios forestales.

### 9.3 Resultados de los niveles de concentración de PM<sub>10</sub> modelados.

**Cuadro 9.1** Resultados de PM<sub>10</sub> simulado y evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Hatillo.

Sitio	Centro de Acopio Municipal, Hatillo			
Naturaleza	Residencial / Comercial			
Fecha	GOCART	AFWA	UoC	Obs
5/8/2013	87	75	38	28
6/8/2013	174	155	68	58
7/8/2013	44	42	20	41
$\sigma$	66	58	24	15
$r$	0,714	0,744	0,673	1,000
$R^2$	0,509	0,554	0,453	1,000
<b>BIAS</b>	59	49	0	0
<b>MAE</b>	59	49	0	0
<b>MSE</b>	5621	3906	209	0
<b>RMSE</b>	75	62	14	0

**Cuadro 9.2** Resultados de PM<sub>10</sub> simulado y evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Uruca.

Sitio	Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca			
Naturaleza	Comercial			
Fecha	GOCART	AFWA	UoC	Obs
5/8/2013	64	56	30	34
6/8/2013	101	92	43	77
7/8/2013	34	34	17	52
$\sigma$	34	29	13	22
$r$	0,630	0,684	0,561	1,000
$R^2$	0,397	0,467	0,315	1,000
<b>BIAS</b>	12	6	-24	0
<b>MAE</b>	12	6	24	0
<b>MSE</b>	602	348	800	0
<b>RMSE</b>	25	19	28	0



**Cuadro 9.3** Resultados de PM<sub>10</sub> simulado y evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Alajuela.

Sitio	Universidad Técnica Nacional, Alajuela			
Naturaleza	Comercial			
Fecha	GOCART	AFWA	UoC	Obs
5/8/2013	83	71	38	36
6/8/2013	267	234	100	73
7/8/2013	51	47	23	51
$\sigma$	116	102	41	19
$r$	0,849	0,863	0,823	1,000
$R^2$	0,721	0,745	0,677	1,000
<b>BIAS</b>	80	64	0	0
<b>MAE</b>	80	64	0	0
<b>MSE</b>	13252	9082	507	0
<b>RMSE</b>	115	95	23	0

**Cuadro 9.4** Resultados de PM<sub>10</sub> simulado y evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Hatillo.

Sitio	Catedral Metropolitana San José			
Naturaleza	Comercial			
Fecha	GOCART	AFWA	UoC	Obs
5/8/2013	87	75	38	34
6/8/2013	174	155	68	46
7/8/2013	44	42	20	29
8/8/2013	317	235	108	39
$\sigma$	120	86	38	7
$r$	0,999	1,000	0,995	1,000
$R^2$	0,998	1,000	0,991	1,000
<b>BIAS</b>	118	90	22	0
<b>MAE</b>	118	90	22	0
<b>MSE</b>	24085	13115	1318	0
<b>RMSE</b>	155	115	36	0

**Cuadro 9.5** Resultados de PM<sub>10</sub> simulado y evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Belén.

Sitio	Centro Comercial La Ribera, Belén			
Naturaleza	Residencial / Comercial			
Fecha	GOCART	AFWA	UoC	Obs
5/8/2013	83	71	38	45
6/8/2013	267	234	100	83
7/8/2013	51	47	23	75
$\sigma$	116	102	41	20
$r$	0,551	0,573	0,509	1,000
$R^2$	0,303	0,328	0,259	1,000
<b>BIAS</b>	66	50	-14	0
<b>MAE</b>	66	50	14	0
<b>MSE</b>	11933	8107	1023	0
<b>RMSE</b>	109	90	32	0

**Cuadro 9.6** Resultados de PM<sub>10</sub> simulado y evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Ferrocarril Cartago.

Sitio	Estación Ferrocarril, Cartago			
Naturaleza	Comercial			
Fecha	GOCART	AFWA	UoC	Obs
5/8/2013	87	75	38	42
6/8/2013	174	155	68	69
7/8/2013	44	42	20	70
$\sigma$	66	58	24	16
$r$	0,162	0,206	0,106	1,000
$R^2$	0,026	0,042	0,011	1,000
<b>BIAS</b>	41	31	-18	0
<b>MAE</b>	41	31	18	0
<b>MSE</b>	4550	3111	823	0
<b>RMSE</b>	67	56	29	0

**Cuadro 9.7** Resultados de PM<sub>10</sub> simulado y evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Santa Ana.

Sitio	MATRA, Pozos, Santa Ana			
Naturaleza	Comercial			
Fecha	GOCART	AFWA	UoC	Obs
5/8/2013	64	56	30	33
6/8/2013	101	92	43	72
7/8/2013	34	34	17	49
$\sigma$	34	29	13	20
r	0,638	0,691	0,569	1,000
R <sup>2</sup>	0,407	0,477	0,324	1,000
BIAS	15	9	-21	0
MAE	15	9	21	0
MSE	679	388	626	0
RMSE	26	20	25	0

**Cuadro 9.8** Resultados de PM<sub>10</sub> simulado y evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Parque Industrial Cartago.

Sitio	Zona Franca Llano Grande, Cartago			
Naturaleza	Industrial			
Fecha	GOCART	AFWA	UoC	Obs
5/8/2013	87	75	38	24
6/8/2013	174	155	68	72
7/8/2013	44	42	20	58
$\sigma$	66	58	24	25
r	0,463	0,502	0,413	1,000
R <sup>2</sup>	0,215	0,252	0,170	1,000
BIAS	50	40	-9	0
MAE	50	40	9	0
MSE	4829	3273	545	0
RMSE	69	57	23	0

**Cuadro 9.9** Resultados de PM<sub>10</sub> simulado y evaluación del modelo con respecto a las observaciones. Sitio: Moravia.

<b>Sitio</b>	<b>Moravia</b>			
<b>Naturaleza</b>	<b>Residencial</b>			
<b>Fecha</b>	<b>GOCART</b>	<b>AFWA</b>	<b>UoC</b>	<b>Obs</b>
5/8/2013	87	75	38	17
6/8/2013	174	155	68	62
7/8/2013	44	42	20	49
<b><math>\sigma</math></b>	66	58	24	23
<b>r</b>	0,461	0,500	0,410	1,000
<b>R<sup>2</sup></b>	0,212	0,250	0,168	1,000
<b>BIAS</b>	59	48	0	0
<b>MAE</b>	59	48	0	0
<b>MSE</b>	5794	4051	436	0
<b>RMSE</b>	76	64	21	0