

ENTENDIENDO LA CONTAMINACIÓN: UN ENFOQUE BASADO EN SISTEMAS DINÁMICOS

Susana Alvarez Zuluaga (salvarezz@eafit.edu.co)
Mateo Bonnett García (mbonnettg@eafit.edu.co)
Valentina Yusty Mosquera(vyustym@eafit.edu.co)
Universidad EAFIT
Medellín, Colombia

20 de noviembre de 2019

Resumen

Las concentraciones de material particulado en el aire han aumentado durante los últimos años, tal como muestra la evidencia científica. Sin embargo, tal como muestran los datos acá recolectados y (Bonnett, et al. 2019), estas concentraciones han disminuido en los últimos meses en el Valle de Aburrá, esto debido a las medidas sociales y políticas tomadas por el gobierno local. Pero, a pesar de que la calidad del aire muestre una mejora, los estudios para entender este fenómeno, no deberían parar. Es por esto que se presenta acá un modelo basado en la teoría de sistemas dinámicos para entender mejor cómo las condiciones climáticas, tales como viento, humedad y temperatura, afectan las concentraciones de PM10 y la calidad del aire. Por último, la sección de análisis de sensibilidad muestra como cambios en estos parámetros afectan las concentraciones de PM10.

Abstract

Scientific evidence shows that concentrations of particulate matter (PM) have been raising over the past few years all over the globe. However, as shown by the data collected here and by (Bonnett, et al 2019), these concentrations are actually decreasing in the Aburra Valley, due to the correct implementation of both political and social measurements by the local government. But, in spite of air quality improving over the past few months, better understanding of this problem should not be stopped. This is why here we present a dynamic system model to understand how weather conditions affect air quality and PM10 concentrations. Among the weather conditions considered here, one can find wind, humidity and temperature. Lastly, the sensitivity analysis section shows the effects on PM10 concentrations due to changes on these parameters.

Palabras clave: material particulado, PM10, condiciones atmosféricas, sistemas dinámicos, polución

Keywords: particulate matter, PM10, weather conditions, dynamic system, pollution.

1. Introducción

El Valle de Aburrá es una subregión en el centro-sur del departamento de Antioquia, Colombia, en medio de la Cordillera Central de los Andes. Forma parte de la cuenca natural del río Medellín, el cual lo recorre de sur a norte, recibiendo una serie de afluentes a lo largo de su recorrido. El Valle tiene una longitud aproximada de 60 kilómetros y una amplitud variable. Está enmarcado por una topografía irregular y pendiente, con alturas que oscilan entre 1300 y 2800 msnm [1].



Figura 1: ubicación del Valle de Aburrá.
Tomado de [2]

Por su parte, el Área Metropolitana del

Valle de Aburrá (AMVA) es una entidad administrativa de derecho público que asocia a los 10 municipios que conforman el Valle de Aburrá: Medellín es la ciudad núcleo, alrededor de la cual están con-urbados los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Itagüí, Sabaneta, Envigado, La Estrella y Caldas; vinculados entre si por dinámicas e inter-relaciones territoriales, ambientales, económicas, sociales, demográficas, culturales y tecnológicas que para la programación y coordinación de su desarrollo sustentable, desarrollo humano, ordenamiento territorial y racional prestación de servicios públicos requieren un ente coordinador. [3]

Además de las características políticas y territoriales de la región, es importante también entender la morfología del Valle de Aburrá. Las características físicas del Valle de Aburrá, ilustradas en la Figura 2, hacen de este un lugar geográficamente propenso a los altos niveles de contaminación.

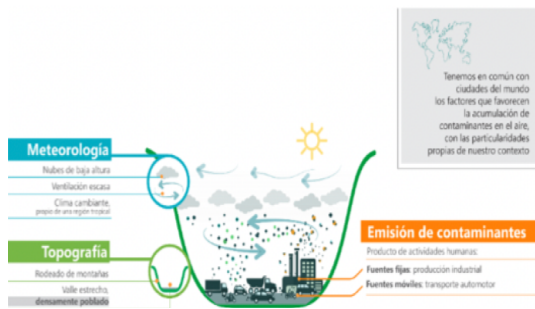


Figura 2: Morfología del Valle de Aburrá. Tomado de [2]

Por último, vale la pena mencionar a que nos referimos cuando hablamos de PM10. Tal como es definido por la resolución número 610 [4], el material particulado inferior a 10 micras (PM10) "se refiere a todo material particulado que tenga un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros nominales."

2. Justificación del caso de estudio

Es conocido por todos que la calidad del aire ha disminuido en años recientes, causando un aumento en las consultas por infecciones respiratorias [5], pues con el aumento de la población, el aumento del parque automotor y las características únicas del Valle de Aburrá, se ha dado un aumento en los niveles emitidos de material particulado inferior a 10 micras (PM10). Con este aumento, viene un deterioro

en la calidad del aire que se respira en el Valle de Aburrá y un aumento en enfermedades respiratorias.¹

Dado que el PM10 es uno de los contaminantes con mayor presencia en el entorno, se considera de vital importancia el estudio de su comportamiento en el tiempo y la relación entre su aumento y otras variables del entorno. En esta problemática, vemos una oportunidad para entender y proponer formas de solución, basados en modelos matemáticos y teóricos. Surge entonces la pregunta, ¿cómo modelar las concentraciones de PM10 en el Valle de Aburrá? Un primer acercamiento teórico lo explica Cristian Palacios [7], técnico del Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA):

Este fenómeno de contaminación se presenta en dos épocas del año. La primera época es entre los meses de febrero y abril. La segunda es en el mes de octubre. Estas coinciden con el cambio de temporada seca a temporada de lluvias, lo que genera baja nubosidad. Esto causa mayor estabilidad atmosférica, hecho que genera más contaminación y menor movimiento vertical de la atmósfera, debido a menor temperatura del ambiente. Debido a este último fenómeno, el aire, junto con las partículas contaminantes, no puede ascender y ser arrastrado por las corrientes de vientos, como normalmente sucede, generando así, que se acumule sobre el Valle de Aburrá, en especial entre las horas de la mañana y la noche.

En las siguientes secciones presentaremos el modelo matemático para esta problemática.

3. Metodología

3.1. Descripción del sistema

Entender las relaciones entre los niveles de contaminación y las condiciones meteorológicas como un sistema es bastante complejo. Sin embargo, tal como expresa Chunyi Li, et al, se presenta acá una forma de entender cómo la temperatura, la velocidad del viento y la humedad tienen un efecto en las concentraciones de PM10 en el aire.

3.1.1. Temperatura vs concentraciones

Primero, se presenta la relación de la temperatura con el aumento o la disminución en

¹Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), en la actualidad la polución aérea "representa el mayor riesgo ambiental a la salud" [6]

los niveles de concentración de materiales contaminantes. Aunque fue mencionado en la sección anterior, la relación es un poco más compleja. Las temperaturas altas, usuales durante la temporada seca, promueven la formación de sulfatos, pero disocia parte del material particulado. Por otro lado, las temperaturas bajas, usuales durante la temporada de lluvias, son favorables para la formación de partículas secundarias [9]. Generalmente, la temperatura no tiene un impacto directo sobre las concentraciones de PM_{10} , es más una relación directa con la humedad de la atmósfera y la turbulencia del aire (estabilidad atmosférica) [8]. Esta se puede entender de la siguiente manera:

Aumentos en la temperatura son seguidos por un descenso en la humedad y aumentos en la turbulencia o inestabilidad de la atmósfera. Como consecuencia, las concentraciones de material particulado disminuyen. Por otro lado, las temperaturas bajas causan mayores niveles de humedad, ocasionando una relación negativa con las concentraciones de partículas contaminantes.

3.1.2. Velocidad del viento vs concentraciones

Se trata ahora de explicar la relación entre la velocidad del viento y las concentraciones de material particulado en la atmósfera. Como fue mencionado anteriormente, bajas velocidades del viento, favorecen la acumulación de partículas nocivas en la atmósfera, ocasionando altos niveles de contaminación por material particulado. Este fenómeno se debe a que los vientos de baja velocidad no pueden arrastrar el material particulado, haciendo que este se quede en la atmósfera local.

3.1.3. Humedad vs concentraciones

Por último, se presenta la explicación de cómo se relaciona la humedad con la formación o acumulación de material particulado en la atmósfera. Altas humedades relativas son favorables para la formación de partículas secundarias, ayudando al aumento en las concentraciones de materiales contaminantes. En particular, altas humedades relativas junto con altas concentraciones de material particulado, podrían acelerar el proceso de formación de iones solubles en agua [9].

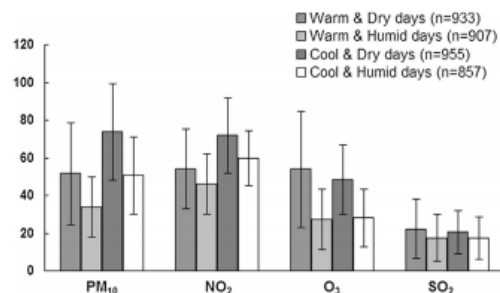


Figura 3: Diferencia en las concentraciones de PM_{10} y otras partículas contaminantes dados diferentes niveles de humedad relativa. Tomado de [10]

3.2. Métodos experimentales

La toma de datos fue obtenida de manera indirecta ya que los datos utilizados por el modelo fueron recopilados por los estudios y el monitoreo de diferentes entidades. Los niveles de PM_{10} , dados en micro-gramos por metro cúbico ($\frac{\mu g}{m^3}$), fueron proveídos por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Dicha entidad mide el índice de calidad del aire en tiempo real en diferentes zonas localizadas a lo largo del Valle de Aburrá y monitorea cada hora los niveles de PM_{10} y de otras partículas. Los niveles de humedad (dados en porcentaje), temperatura (grados celsius), y viento (kilómetros por hora), fueron obtenidos de la compañía Time and Date AS. Esta compañía provee los datos de las tres anteriores condiciones meteorológicas de manera horaria, teniendo en cuenta como punto de medición el aeropuerto Olaya Herrera. Los datos utilizados fueron del 2 de octubre de 2019. Estos se presentan a continuación:

Hora	PM_{10} ($\mu g/m^3$)	TEMP ($^{\circ}C$)	humedad (%)	VIENTO (km/hr)
12:00 AM	43	20	100	4
1:00 AM	43	20	94	9
2:00 AM	44	20	94	9
3:00 AM	44	20	94	9
4:00 AM	45	20	94	9
5:00 AM	46	19	94	9
6:00 AM	48	20	94	4
7:00 AM	50	20	94	4
8:00 AM	52	22	88	4
9:00 AM	52	21	94	4
10:00 AM	52	23	83	9
11:00 AM	52	24	78	4
12:00 PM	53	25	74	9
1:00 PM	54	24	78	6
2:00 PM	54	26	74	9
3:00 PM	55	24	74	8
4:00 PM	55	24	74	6
5:00 PM	57	23	83	4
6:00 PM	58	22	88	4
7:00 PM	59	19	100	7
8:00 PM	59	19	100	4
9:00 PM	59	20	94	7
10:00 PM	58	19	100	7
11:00 PM	57	18	100	4

Figura 4: Datos de concentración de PM_{10} , temperatura, humedad y velocidad del viento para cada hora del 2 de octubre de 2019

3.3. Descripción del modelo matemático

Para la formulación del modelo matemático, además de tener en cuenta la destrucción y generación de PM10 debido a causas meteorológicas, también se tuvo en cuenta la generación de PM10 causado por las emisiones humanas. En consecuencia, el modelo tiene la siguiente estructura donde C representa la concentración de PM10 medida en $\frac{\mu g}{m^3}$

$$\frac{dC}{dt} = \text{Generacion} - \text{Destrucion} + \text{Emisiones} \quad (1)$$

La generación y destrucción están estrictamente relacionadas con los factores meteorológicos mencionados anteriormente. Se encontró que a altas humedades el proceso de formación de partículas de PM10 se acelera. Por lo tanto, la ecuación de generación toma la siguiente forma, donde f es un parámetro que se debe encontrar y humedad es una matriz de datos que contiene la humedad en Medellín a las diferentes horas del día, durante un día.

$$\text{Generacion} = |f * \text{humedad}| \quad (2)$$

La generación tiene un valor absoluto porque al encontrar los valores de los parámetros, f podría tomar un valor negativo. En este caso la generación sería negativa y restaría a los niveles de concentración lo cual no tendría sentido, pues la generación siempre aporta al incremento en los niveles de concentración de PM10.

Para el proceso de destrucción se encontró que a más viento y a más temperatura la destrucción de PM10 aumenta. De forma contraria, a más humedad, la destrucción disminuye. De esto sale una ecuación en donde el viento y la temperatura suman a la destrucción y la humedad resta. La siguiente ecuación describe este proceso de destrucción en donde k, a, b son parámetros que se deben de estimar y viento, temperatura y humedad son matrices con datos del viento (dado en $\frac{km}{h}$), la temperatura (dada en $^{\circ}C$) y la humedad (dada como un porcentaje ²) a diferentes horas del día en Medellín.

$$\text{Destrucion} = |k * \text{viento} + |a * \text{temperatura} - |b * \text{humedad}| \quad (3)$$

Al igual que en la ecuación anterior, los valores absolutos se utilizan para evitar que

²Relación entre la cantidad de vapor de agua que tiene una masa de aire y la máxima que podría tener [11]

³El método de Euler, es un procedimiento de integración numérica para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias a partir de un valor inicial dado [12]

en el caso en que los parámetros k, a, b tomen valores negativos, esto altere como funciona en realidad el proceso de la destrucción.

Para la generación de PM10 causada por emisiones humanas no se tenía mucha información de cómo estas variaban a diferentes horas del día. Por esto no se utilizó una matriz con datos si no que se utilizó una función sinusoidal en donde la amplitud, el ángulo de fase y la frecuencia se tomaron como parámetros. La función utilizada fue la siguiente:

$$\text{Emisiones} = \text{amp} * \sin(\text{frec} * t + \text{phase}) + \text{amp} \quad (4)$$

Esta función sinusoidal tiene la misma forma que cualquier función de este tipo, pero adicionalmente se le suma al final el parámetro amplitud. La función sinusoidal normalmente comienza en cero y oscila en números pertenecientes al intervalo [-amp, amp]. Sin embargo, las emisiones siempre deben ser positivas por lo que la función se debe trasladar hacia arriba de tal forma que esta siempre tome valores no negativos. Para lograr esto, se suma al final el parámetro de amplitud a la ecuación de emisiones, forzando a esta a tomar valores en el intervalo [0, 2*amp].

3.4. Diagrama de bloques

En esta sección se muestra el diagrama de bloques que representa el modelo descrito en la sección anterior. Se ha usado Simulink para realizar el proceso de simulación.

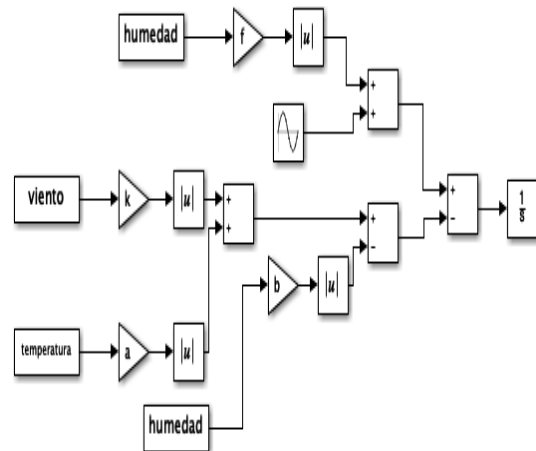


Figura 5: Diagrama de bloques. Realizado por los autores usando Simulink

3.5. Método de simulación

Para ejecutar la simulación, se usó el método de Euler³ con un tamaño de paso de 0.05 horas, por un total de 24 horas. Es decir, se realizó la simulación para los valores de concentración de PM10 de un día. La simulación inicial se realizó con los siguientes valores de los parámetros:

a	0.0126
amp	0.2506
b	-0.0016
f	0.0081
frec	0.7459
k	0.0077
phase	1.8941

Al ejecutar la simulación con estos parámetros, se obtuvo el siguiente ajuste del modelo a los datos.

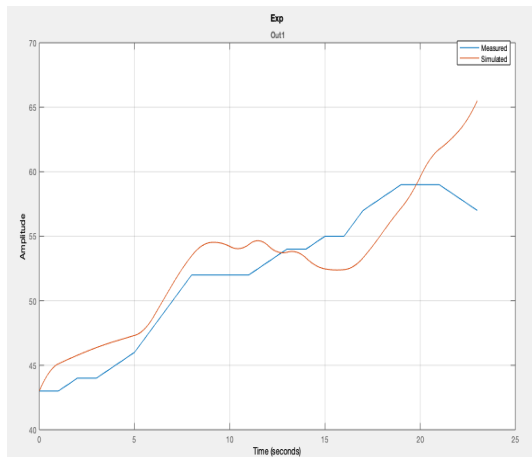


Figura 6: Ajuste del modelo a los datos con los parámetros antes del análisis de sensibilidad. Realizado por los autores usando Simulink

En una sección posterior se muestra que pasa con el ajuste del modelo al cambiar el método de simulación.

4. Resultados

4.1. Análisis de sensibilidad

Después de ver el ajuste inicial del modelo a los datos reales, se realizó el análisis de sensibilidad con los parámetros. Para esto se generaron 30 valores aleatorios, distribuidos uniformemente, para cada uno de los 7 parámetros presentados en la sección anterior. Los valores aleatorios se muestran en la Figura 7.

a	amp	b	f	frec	k	phase
0.1054	0.2521	-0.0475	0.0187	0.4420	0.4624	1.2488
0.1185	0.2452	-0.0477	0.0177	0.4125	0.5016	1.5945
0.1130	0.2674	-0.0567	0.0171	0.4578	0.4734	1.5282
0.1125	0.2516	-0.0496	0.0179	0.4464	0.5029	1.2426
0.1221	0.2590	-0.0545	0.0181	0.4666	0.4868	1.2929
0.1154	0.2420	-0.0529	0.0188	0.4669	0.4770	1.3640
0.1156	0.2410	-0.0516	0.0185	0.4614	0.4413	1.2530
0.1211	0.2502	-0.0474	0.0172	0.4071	0.4769	1.5999
0.1189	0.2340	-0.0529	0.0176	0.4102	0.4767	1.2669
0.1147	0.2264	-0.0470	0.0185	0.4238	0.4209	1.4462
0.1056	0.2283	-0.0541	0.0171	0.4517	0.4941	1.2795
0.1071	0.2390	-0.0500	0.0174	0.4628	0.4933	1.4062
0.1217	0.2605	-0.0503	0.0186	0.4407	0.4762	1.2522
0.1023	0.2391	-0.0516	0.0173	0.4777	0.4925	1.2786
0.1127	0.2228	-0.0500	0.0184	0.4886	0.4464	1.2261
0.1055	0.2384	-0.0503	0.0189	0.4910	0.4866	1.3537
0.1236	0.2456	-0.0554	0.0180	0.4518	0.4769	1.3843
0.1178	0.2402	-0.0519	0.0176	0.4535	0.4133	1.5478
0.1130	0.2520	-0.0469	0.0185	0.4135	0.4762	1.5155
0.1123	0.2506	-0.0515	0.0188	0.4839	0.4620	1.2739
0.1050	0.2343	-0.0569	0.0187	0.4740	0.4991	1.3747
0.1171	0.2410	-0.0514	0.0186	0.4421	0.4148	1.5811
0.1046	0.2206	-0.0481	0.0183	0.4122	0.4573	1.3716
0.1093	0.2380	-0.0503	0.0173	0.4280	0.4538	1.4542
0.1135	0.2280	-0.0553	0.0185	0.4179	0.4571	1.2576
0.1039	0.2251	-0.0534	0.0184	0.4293	0.4856	1.3912
0.1001	0.2392	-0.0525	0.0179	0.4495	0.4444	1.2649
0.1091	0.2296	-0.0470	0.0175	0.4514	0.4870	1.2537
0.1180	0.2438	-0.0536	0.0170	0.4451	0.4981	1.3640
0.1051	0.2365	-0.0483	0.0176	0.4827	0.4179	1.3220

Figura 7: Valores generados aleatoriamente para cada uno de los parámetros del modelo. Realizado por los autores usando Simulink

Tras este análisis de sensibilidad se obtuvieron nuevos valores de los parámetros (presentados en la Figura 8) que permitieron un nuevo y mejor ajuste a los datos reales. Aunque este ajuste es bueno, no es óptimo pues falta realizar la optimización de los parámetros.

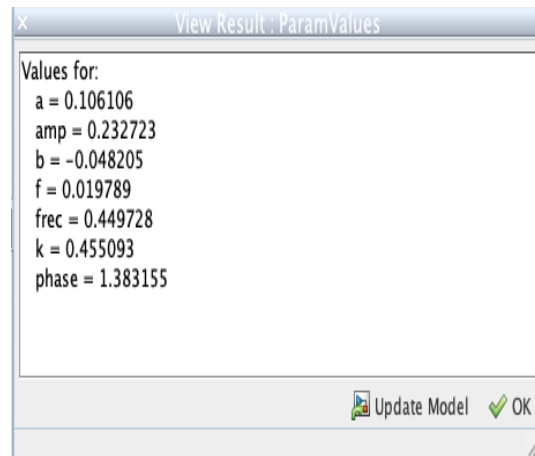


Figura 8: Nuevos valores para los parámetros tras realizar el análisis de sensibilidad. Realizado por los autores usando Simulink

4.2. Optimización para los valores de los parámetros

Tras haber realizado todo este proceso, era necesario realizar la optimización de los parámetros para obtener el mejor ajuste. El ajuste del modelo y los valores de los nuevos parámetros optimizados se presentan en la Figura 9. De igual manera, estos valores se presentan en la tabla presentada a continuación:

a	0.0135
amp	0.3987
b	-0.0016
f	0.0070
frec	0.7212
k	0.0075
phase	2.7364

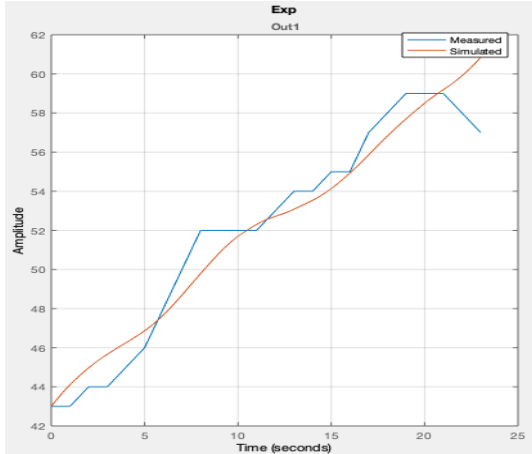


Figura 9: Ajuste del modelo a los datos reales

Para los valores de los parámetros presentados en tabla anterior, se obtuvo un valor de 0.0116 para la suma de errores cuadráticos.

4.3. Identificación de parámetros

Para poder hacer un mejor análisis de sensibilidad y ver los cambios del modelo bajo diferentes escenarios, se hizo un estudio para identificar cuál es la correlación de cada uno de los parámetros del modelo, esto con el fin de saber cuáles son aquellos parámetros que cuando sus valores cambian, causan grandes cambios en el modelo. Estos resultados se presentan en la Figura 10.

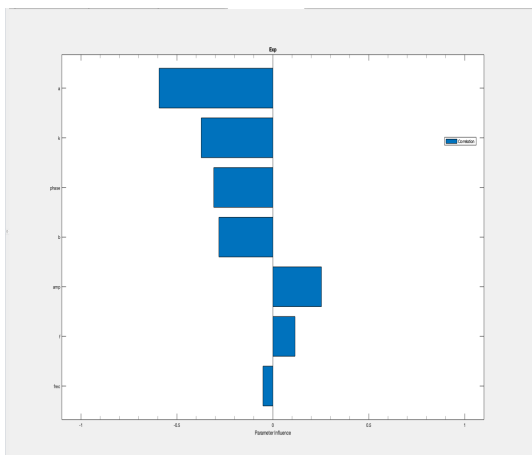


Figura 10: Correlación de cada uno de los parámetros del modelo

Logramos identificar que el parámetro con mayor correlación es el parámetro a. Es decir, pequeños cambios en el valor de este parámetro tienen grandes efectos sobre el ajuste y el resultado del modelo.

4.4. Validación del modelo

Para la validación del modelo se utilizó el coeficiente de determinación (R^2). Este refleja la bondad del modelo (un buen ajuste del modelo a los datos).

Para este modelo, con los datos presentados en la Figura 4, el valor obtenido fue

$$R^2 = 0,9427704$$

Al ser este valor cercano a uno, se puede concluir que el modelo se ajusta muy bien a los datos reales y por ende es fiable.

5. Escenarios

Para esta sección solo se consideran tres escenarios: aumentos en la temperatura, disminución en los niveles de humedad y cambios en el método de integración. Se considera que estos son los escenarios más importantes para analizar la capacidad de predicción y ajuste del modelo.

Los resultados y su interpretación se presentan a continuación.

5.1. Aumentos en la temperatura

Tal y como se mencionó en la sección 2, la temperatura no tiene una relación directa sobre las concentraciones de PM10. Sin embargo, al aumentar la temperatura, se esperaría una disminución en los niveles de concentración de partículas contaminantes. Ambos casos se evidencian en los resultados de este experimento, pues con un cambio pequeño de la temperatura (variable entre 20 y 30 grados centígrados) no se genera ningún cambio apreciable en el ajuste del modelo a los datos. Pero, con un cambio más drástico (variable entre 30 y 38 grados centígrados), no posible en la ciudad de Medellín o en el Valle de Aburrá, se obtiene una leve disminución en los niveles de concentración de PM10.

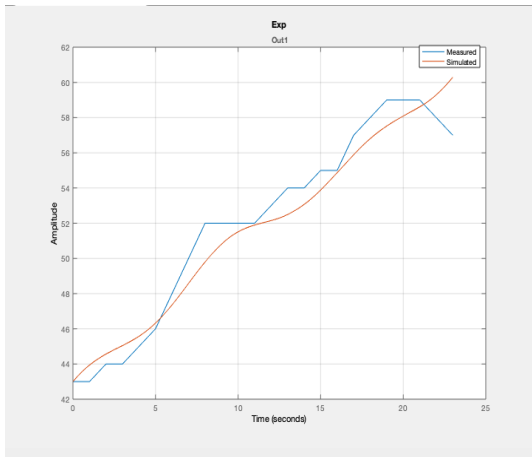


Figura 11: Ajuste del modelo a los datos reales para cambios leves en las temperaturas

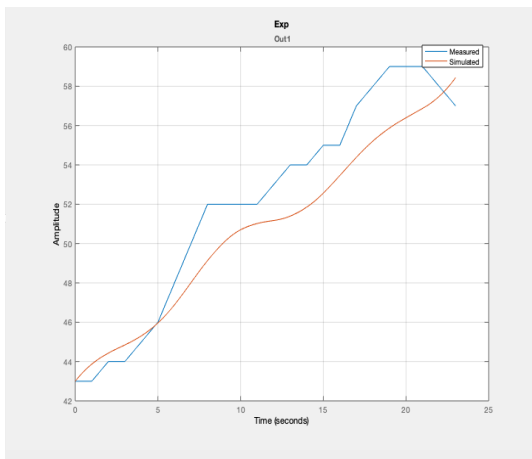


Figura 12: Ajuste del modelo a los datos reales para cambios drásticos en las temperaturas

Se confirmó que los cambios en las temperaturas, sin cambios en la humedad y en la velocidad de viento, no tienen un efecto significativo en los niveles de concentración de PM10.

5.2. Disminución de la humedad

Tal y como se mencionó en la sección 2, la humedad tiene una relación directa sobre las concentraciones de PM10. Al aumentar los niveles de humedad, se espera un aumento en los niveles de concentración de partículas contaminantes o de materiales particulados solubles en agua, pues se reduce la destrucción de estas partículas y se favorece su generación. En los resultados de este experimento se evidenció el caso contrario, como la disminución en los niveles de humedad genera una disminución en los niveles de PM10 en el aire. Cambios apreciables se evidencian. Los datos de humedad acá usados son más realistas y acordes con las condiciones meteorológicas del Valle de Aburrá. Se ejecutó una simulación para valores de

humedad con variaciones entre el 50% y 60% y se obtuvieron los siguientes resultados:

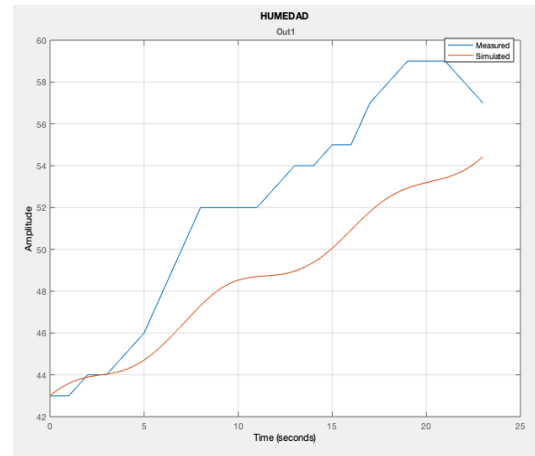


Figura 13: Ajuste del modelo a los datos reales para cambios en los niveles de humedad

Se confirmó entonces que los cambios en los niveles de humedad, sin cambios en la temperatura y en la velocidad de viento, tienen un efecto significativo en los niveles de concentración de PM10. Sería un experimento interesante disminuir aún más los niveles de humedad y aumentar la temperatura. Sin embargo, se propone solo como un ejercicio teórico, pues ninguno de estos cambios tendría sentido al compararse con las condiciones meteorológicas del Valle de Aburrá.

5.3. Cambio en el método de integración

El método de integración tiene efectos sobre la forma en cómo se resuelve la ecuación diferencial ordinaria (EDO) asociada al proceso de modelado del sistema. Al cambiar el método de integración se puede obtener una mejor solución numérica, es decir se podría reducir el error asociado a la solución de la EDO. Luego existe una relación entre el método de integración y el ajuste del modelo a los datos. Se cambió el método de integración de Euler a Runge-Kutta. Sin embargo, a pesar de que el método de Euler es el más sencillo de los Runge-Kutta y de los métodos de integración, no parece haber un efecto del método de integración sobre la solución. El ajuste del modelo con el nuevo método de integración se muestra a continuación:

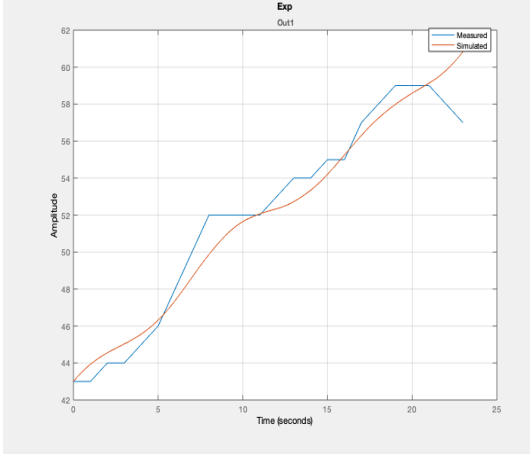


Figura 14: Ajuste del modelo a los datos reales tras cambiar el método de integración por el método Runge-Kutta

6. Conclusiones

Con los valores de los parámetros obtenidos tras la optimización de estos, se utilizó el modelo para tratar de predecir la concentración de PM10 para otros días. Sin embargo, el modelo no se ajustó correctamente a los datos por lo que se concluyó que el modelo con estos valores de los parámetros no sirve para predecir la concentración de PM10 de otros días. Es decir, el ajuste del modelo es sensible a los valores de los parámetros.

Luego de revisar otros modelos para el entendimiento de las concentraciones del material particulado, se identificó que la mayoría de estos, además de tener en cuenta la velocidad del viento, también tienen en cuenta su dirección. Esta juega un papel importante en la concentración de PM10 ya que, dependiendo de esta el material particulado es dispersado dentro del mismo Valle de Aburrá o fuera de este. Sin embargo, los modelos que tienen en cuenta la dirección del viento están basados en ecuaciones diferenciales parciales, lo cual se sale del alcance de lo aprendido en curso y por esto no se implementó para este trabajo.

A pesar de esto, el modelo formulado representa la estructura global de la dinámica en las concentraciones de PM10 y sirve para identificar el efecto que tiene cada condición meteorológica (viento, temperatura y humedad) sobre la calidad del aire.

Por último, utilizando el modelo, se logró evidenciar que en el Valle de Aburrá la condición meteorológica que tiene mayor efecto sobre las concentraciones de PM10 es la humedad, pues para valores de temperatura y velocidad del viento fijos y, además probables para el Valle de Aburrá, los niveles de PM10 se redujeron significativamente, tal como lo muestra la Figura 13.

7. Referencias

- [1] [Online]. Valle de Aburrá. Wikipedia. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Valle_de_Aburr%C3%A1
- [2] D. Aguiar; Calle, J.M; Hernández, D.F; González, J.L.(2017). *Medellín y su calidad del aire*. Escuela Internacional de Desarrollo Sostenible. Medellín, Colombia.
- [3] [Online]. ¿Quiénes somos?. Área metropolitana Valle de Aburrá. Disponible en: <https://www.metropol.gov.co/area/Paginas/somos/quienes-somos.aspx>
- [4] M. de Ambiente, “Resolución no. 610 del 10 de marzo de 2010,” 2010.
- [5] C. Gaviria, “Contaminación por material particulado (pm2,5 y pm10) y consultas por enfermedades respiratorias en medellín” Revista de la Fac.Nac Salud pública, 2011.
- [6] OMS, “Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease,” Atelier5b, 2016.
- [7] C. Palacios, “Comunicación telefónica,” in Técnico del SIATA, 2019.
- [8] Chunyi Li; Yilan Huang; Huanhuan Guo; Gaojie Wu; Yifei Wang; Wei Li; Lijuan Cui. (2019). The Concentrations and Removal Effects of PM10 and PM2.5 on a Wetland in Beijing.
- [9] Jian Wu; Chang Xu; Qiongzheng Wang; Wen Cheng. (2016). Potential Sources and Formations of the PM2.5 Pollution in Urban Hangzhou
- [10] Hong Qiu; Ignatius Tak Sun Yu; Xiaorong Wang; Linwei Tian; Lap Ah Tse; Tze Wai Wong. (2013). *Season and humidity dependence of the effects of air pollution on COPD hospitalizations in Hong Kong*.
- [11] Diccionario de Google
- [12] https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_Euler