

UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**“CORRELACIÓN ENTRE EL MATERIAL PARTICULADO Y LAS
VARIABLES METEOROLÓGICAS UTILIZANDO EL MODELO WRF-
CHEM EN LIMA METROPOLITANA EN EL MES DE FEBRERO DE 2018”**

TESIS

Para optar el título de
INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR EL BACHILLER

AYMA CHOQUE, ELIZABETH

ASESOR

SÁNCHEZ CCOYLLO, ODÓN ROMÁN

Villa El Salvador
2022

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación está dedicado a todos los estudiantes, que buscan en la educación el camino hacia el cambio.

AGRADECIMIENTO

Agradecer de manera especial a mi madre que me brindó su apoyo de manera incondicional para lograr este objetivo y para ella el grande reconocimiento.

Además, y a mi asesor Dr. Odón Román Sánchez Ccoyllo, el cual estuvo pendiente de mi avance y me brindó su apoyo incondicional para la ejecución de esta investigación.

Mis más sinceros agradecimientos a mis familiares y amigos que me brindaron su apoyo profesional y personal para poder lograr cumplir esta meta.

También mi agradecimiento a FONDECYT-CONCYTEC, ahora Pro CIENCIA, por el financiamiento de la presente tesis, en el marco del contrato N°424-2019-FONDECYT suscrito con UNTELS.

RESUMEN

La presente investigación se realizó con el objetivo de analizar la correlación entre el comportamiento de las variables meteorológicas: humedad relativa, velocidad del viento y temperatura del aire (simuladas y observadas) y el comportamiento del material particulado (PM10 y PM2.5) en Lima metropolitana en el mes de febrero en el 2018, para lo cual se utilizó el modelo WRF-Chem con grillas de 5 Km x 5 Km en Lima metropolitana para la simulación de las variables meteorológicas.

Para verificar la habilidad de la simulación de las variables meteorológicas (humedad relativa, velocidad del viento y temperatura del aire) realizadas por el modelo WRF-Chem se hizo uso de 7 pruebas estadísticas (BIAS, RATIO, IAO, MNB, ERROR GROS, MNGE y RMSE) y también se realizó una comparación gráfica, mediante grafico de series de tiempo de los valores observados y simulados.

Para la cuantificación de la correlación entre el material particulado y las variables meteorológicas se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson; lo cual determinará si las variables están linealmente relacionadas y para la obtención del índice de correlación se realizó mediante el programa SPSS.

Posteriormente al análisis se determinó que para el objetivo: evaluar el desempeño de las variables meteorológicas simuladas con el modelo de la calidad del aire WRF-Chem en Lima Metropolitana; para la prueba estadística de BIAS para la variable meteorológica de la humedad relativa para todas las estaciones de calidad de aire (Ate, Campo de Marte, Carabayllo, Huachipa, Puente Piedra, San Borja y San Juan de Lurigancho) se concluye que en la gran mayoría de las estaciones (excepto San Borja y Campo de Marte) los valores simulados son mayores que los observados. Sin embargo, para la variable meteorológica de la velocidad del viento para todas las estaciones de calidad de aire se evidencia que los valores simulados son mayores que los observados, de la misma manera para todas las pruebas estadísticas.

Para la prueba estadística de la temperatura del aire, para todas las estaciones se determinó que los valores simulados y los observados poseen una mínima diferencia ya que el índice de correlación varía entre 0.75-0.98.

Para el objetivo específico: comparar las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) simuladas con el modelo de la calidad del aire WRF-Chem en Lima metropolitana en febrero de 2018; evidenciándose así que en todas las estaciones de calidad del aire (Ate, Campo de Marte, Carabayllo, Huachipa, Puente Piedra, San Borja y San Juan de Lurigancho) para las variables meteorológicas de humedad relativa y temperatura del viento; el comportamiento de los valores simulados con los observados son similares; estando de acuerdo con los resultados obtenidos con la evaluación estadística; para el parámetro de la velocidad del viento se evidencia que los valores observados son menores que los valores simulados, y su comportamiento no se asemeja.

Y por último para determinar la correlación entre las partículas (PM10 y PM2.5) con las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) usando el modelo WRF-Chem en Lima metropolitana; se determinó que existe una correlación positiva entre el PM10 y PM2.5; así mismo para la humedad relativa en la gran mayoría de las estaciones de calidad del aire estudiadas demuestran una correlación positiva y directa con PM10 y PM2.5. Para las variables meteorológicas de la temperatura y velocidad del viento demuestran tener una correlación negativa significativa.

ABSTRACT

The present research was conducted with the aim of analyzing the correlation between the behavior of the meteorological variables: relative humidity, wind speed, and air temperature (simulated and observed) and the behavior of particulate matter (PM10 and PM2.5) in metropolitan Lima in the month of February in 2018, for which we used the WRF-Chem with grids of 5 Km x 5 Km in metropolitan Lima for the simulation of meteorological variables.

To verify the ability of the simulation of the meteorological variables (relative humidity, wind speed, and air temperature) made by the WRF-Chem is made using 7 test statistics (BIAS, RATIO, IAO, MNB, ERROR GROS, MNGE and RMSE) and also made a comparison chart, using graph time series of the observed values and simulated.

For the quantification of the correlation between particulate matter and meteorological variables, the correlation coefficient was used Pearson to determine whether the variables are linearly related and to obtain the correlation index, the SPSS program was used.

Subsequently the analysis it was determined that for the objective: to evaluate the performance of the meteorological variables simulated with the model of the air quality WRF-Chem in Metropolitan Lima; for the statistical test of BIAS for the variable weather of the relative humidity for all the stations of air quality (Ate, Field of Mars, Carabayllo, Huachipa, Puente Piedra, San Borja and San Juan de Lurigancho) it is concluded that in the vast majority of the stations (except San Borja, and the Field of Mars) the simulated values are higher than those observed. However, for the meteorological variable of wind speed for all air quality stations it is evidenced that the simulated values are greater than those observed, in the same way for all statistical tests.

For the statistical test of air temperature, for all seasons it was determined that the simulated and observed values have a minimum difference since the correlation index varies between 0.75-0.98.

In the second specific objective: to compare the meteorological variables (air temperature, relative humidity and wind speed) simulated with the model of the air quality WRF-Chem in metropolitan Lima in February 2018; demonstrating as well that in all stations of air quality (Ate, Field of Mars, Carabayllo, Huachipa, Puente Piedra, San Borja and San Juan

de Lurigancho) for the meteorological variables of temperature and relative humidity of the wind; the behavior of the simulated values with observed are similar; in accordance with the results obtained with the statistical evaluation; for the wind speed parameter, it is evident that the observed values are lower than the simulated values, and their behavior is not similar.

And finally, to determine the correlation between particulate matter (PM10 and PM2.5) with the meteorological variables (air temperature, relative humidity and wind speed) using the WRF-Chem in metropolitan Lima; it was determined that there is a positive correlation between the PM10 and PM2.5, the same as for the relative humidity in the vast majority of the stations of the air quality studied show a positive correlation and direct with PM10 and PM2.5. For meteorological variables of temperature and wind speed they show a significant negative correlation.

Índice

Introducción.....	1
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. MOTIVACIÓN.....	3
1.2. ESTADO DE ARTE.....	3
1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	6
1.4.1 Problema General.....	6
1.4.2 Problema Específicos	6
1.5. OBJETIVOS	7
1.5.1 Objetivo General.....	7
1.5.2 Objetivos Específicos	7
1.6. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN MOTIVACIÓN	8
II. MARCO TEÓRICO	10
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	10
2.1.1 ANTECEDENTES NACIONALES	10
2.1.2 ANTECEDENTES INTERNACIONES.....	12
2.2. BASES TEÓRICAS	15
2.2.1 Variables meteorológicas	15
2.2.2 Material particulado	16
2.2.3 Estándar de Calidad Ambiental para aire del PM10 y PM2.5	18
2.2.4 Lima Metropolitana.....	19
2.2.5 Estaciones Meteorológicas.....	23
2.2.6 Ubicación de las estaciones de la calidad del aire de SENAMHI.....	23
2.2.7 Modelo WRF-Chem.....	25
2.2.8 Pruebas Estadísticas	30
III. VARIABLES E HIPÓTESIS	35
3.1. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	35
3.2. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	36
3.2.1. Hipótesis general	36
3.2.2. Hipótesis específicas.....	36
IV. METODOLOGÍA.....	37
4.1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA	37

4.1.1.	Solicitud de datos horarios de la red de estaciones de calidad del aire de Lima Metropolitana al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.....	37
4.1.2.	Validación de datos	37
4.1.3.	Contrastación de hipótesis	41
4.2.	IMPLEMENTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	41
4.2.1.	Pruebas estadísticas	41
4.3.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	42
4.3.1	Población.....	42
4.3.2	Muestra.....	42
4.4.	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	42
4.5.	INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	44
V.	RESULTADOS	45
5.1	DETERMINAR LA CORRELACIÓN ENTRE EL MATERIAL PARTICULAR Y LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS UTILIZANDO EL MODELO WRF-CHEM EN LIMA METROPOLITANA EN EL MES DE FEBRERO DEL 2018.....	45
5.1.1	Estación de calidad del aire de Ate	45
5.1.2	Estación de calidad del aire de Campo de Marte	49
5.1.3	Estación de calidad del aire de Carabayllo.....	53
5.1.4	Estación de calidad del aire de Huachipa.....	57
5.1.5	Estación de calidad del aire de Puente Piedra	61
5.1.6	Estación de calidad del aire de San Borja.....	65
5.1.6	Estación de calidad del aire de San Juan de Lurigancho.....	70
5.2	EVALUAR EL DESEMPEÑO DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS (TEMPERATURA DEL AIRE, HUMEDAD RELATIVA Y VELOCIDAD DEL VIENTO) SIMULADAS CON EL MODELO DE LA CALIDAD DEL AIRE WRF-CHEM EN LIMA METROPOLITANA EN FEBRERO DE 2018.....	74
5.2.1	Humedad relativa (%)	74
5.2.2	Temperatura (°C)	79
5.2.3	Velocidad del viento (m/s)	84
5.3	COMPARACIÓN ENTRE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS MEDIDAS Y SIMULADAS	89
5.3.1	Humedad relativa (%)	89
5.3.2	Temperatura (°C)	103
5.3.3.	Velocidad del Viento (m/s)	117
VI.	DISCUSIÓN	131
VII.	CONCLUSIONES	136
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138

Lista de Tablas

Tabla 1	Estándar de Calidad Ambiental para PM10 y PM2.5	19
Tabla 2	Guía de Calidad del Aire de la Organización Mundial de la Salud para PM10 y PM2.5	19
Tabla 3	<i>Ubicación de Lima Metropolitana. (INEI, 2018)</i>	20
Tabla 4	<i>Ubicación de las Estaciones de DIGESA</i>	21
Tabla 5	Listado de 7 estaciones con información disponible (SENAMHI, 2020).....	24
Tabla 6	<i>Operacionalización de las variables identificadas en el presente estudio</i>	35
Tabla 7	<i>Cuadro de las 7 estaciones de SENAMHI</i>	38
Tabla 8	<i>Metodología utilizada por objetivo general y específico</i>	40
Tabla 9	Valores mínimo, máximo, media y desviación estándar de partículas y variables meteorológicas en la Estación de calidad de aire de Ate.....	46
Tabla 10	<i>Correlación de Pearson entre las variables meteorológicas y partículas (PM10 y PM2.5) para la estación de calidad de aire de Ate</i>	48
Tabla 11	Valores mínimo, máximo, media y desviación estándar de partículas y variables meteorológicas en la Estación de Calidad de Aire de Campo de Marte	50
Tabla 12	<i>Correlación de Pearson entre las variables meteorológicas y partículas (PM10 y PM2.5) para la estación de calidad de aire de Campo de Marte</i>	52
Tabla 13	Valores mínimo, máximo, media y desviación estándar de partículas y variables meteorológicas en la Estación de Calidad de aire de Carabayllo.....	54
Tabla 14	<i>Correlación de Pearson entre las variables meteorológicas y partículas (PM10 y PM2.5) para la estación de calidad de aire de Carabayllo</i>	56
Tabla 15	Valores mínimo, máximo, media y desviación estándar de partículas y variables meteorológicas en la Estación de Calidad de Aire de Huachipa.....	58
Tabla 16	<i>Correlación de Pearson entre las variables meteorológicas y partículas (PM10 y PM2.5) para la estación de calidad de aire de Huachipa</i>	60
Tabla 17	Valores mínimo, máximo, media y desviación estándar de partículas y variables en la Estación de Calidad de aire de Puente Piedra.....	62
Tabla 18	<i>Correlación de Pearson entre las variables meteorológicas y partículas (PM10 y PM2.5) para la estación de calidad de aire de Puente Piedra</i>	64
Tabla 19	Valores mínimos, máximos, media y desviación estándar de partículas y variables meteorológicas para la Estación de Calidad de Aire de San Borja.....	66
Tabla 20	<i>Correlación de Pearson entre las variables meteorológicas y partículas (PM10 y PM2.5) para la estación de calidad de aire en San Borja</i>	69
Tabla 21	Variación máxima, mínima, media y desviación estándar de partículas y variables meteorológicas en la Estación de Calidad de aire de San Juan de Lurigancho.....	71
Tabla 22	<i>Correlación de Pearson entre las variables meteorológicas y partículas (PM10 y PM2.5) para la estación de calidad del aire de San Juan de Lurigancho</i>	73
Tabla 23	<i>Pruebas estadísticas de Humedad Relativa (%) en las 7 estaciones de calidad de aire</i>	78
Tabla 24	<i>Pruebas estadísticas de temperatura (°C) en 7 estaciones de la calidad del aire</i>	83
Tabla 25	<i>Pruebas estadísticas de velocidad (m/s) en 7 estaciones de calidad del aire</i>	88

Lista de Figuras

<i>Figura 1:</i> Evolución de la concentración anual de PM10 en Lima y Callao (2008-2019).	22
<i>Figura 2:</i> Evolución de la concentración anual de PM2.5 en Lima y Callao (2008-2019)	22
<i>Figura 3</i> Ubicación de las estaciones de estudio.....	25
<i>Figura 4</i> Componentes del programa WRF-Chem	26
<i>Figura 5.</i> Componentes principales y diagrama de flujo del sistema del modelo WRF-Chem.	27
<i>Figura 6.</i> Esquema de funcionamiento de una simulación general; entre los componentes del WPS	28
<i>Figura 7</i> Variación horaria de la Humedad Relativa observada (color rojo) y simulada (color celeste) en la Estación de Calidad de aire – Ate.....	90
<i>Figura 8</i> Variación horaria de humedad relativa observada (rojo) y simulada (azul) para la Estación Meteorológica de Campo – Marte.	92
<i>Figura 9</i> Variación horaria de la humedad relativa observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de aire de Carabayllo	94
<i>Figura 10</i> Variación horaria de la humedad relativa observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de Aire Huachipa.	96
<i>Figura 11</i> Variación horaria humedad relativa observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad del Aire para Puente Piedra.	98
<i>Figura 12</i> Variación horaria de la humedad relativa observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de Aire - San Borja.	100
<i>Figura 13</i> Variación horaria de la humedad relativa observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de Aire - San Juan de Lurigancho	102
<i>Figura 14</i> Variación horaria de la temperatura observada (color rojo) y simulada (color celeste) en la Estación Calidad de Aire de Ate.....	104
<i>Figura 15</i> Variación horaria de temperatura observada (rojo) y simulada (celeste) para la Estación Calidad de aire en la Estación de Campo de Marte	106
<i>Figura 16</i> Variación horaria de la temperatura observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de aire de Carabayllo	108
<i>Figura 17</i> Variación horaria de la temperatura observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de Aire para Huachipa	110
<i>Figura 18</i> Variación horaria de la temperatura observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de Aire para Puente Piedra	112
<i>Figura 19</i> Variación horaria de la temperatura observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de aire - San Borja	114
<i>Figura 20</i> Variación horaria de la temperatura observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de Aire - San Juan de Lurigancho	116
<i>Figura 21</i> Variación horaria de la velocidad del viento observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad del aire - Ate.....	118
<i>Figura 22</i> Variación horaria de la velocidad del viento observada (rojo) y simulada (celeste) para la Estación de Calidad del aire para Campo de Marte.....	120
<i>Figura 23</i> Variación temporal horaria de la velocidad del viento observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación calidad de aire de Carabayllo.....	122

<i>Figura 24</i> Variación horaria de la velocidad del viento observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de calidad de aire - Huachipa	124
<i>Figura 25</i> Variación horaria de la velocidad del viento observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad del Aire-Puente Piedra	126
<i>Figura 26</i> Variación horaria de la velocidad del viento observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de Aire - San Borja.....	128
<i>Figura 27</i> Variación horaria de la velocidad del viento observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de Aire - San Juan de Lurigancho.....	130

INTRODUCCIÓN

El material particulado se encuentra suspendidas en el aire principalmente formadas por polvo, hollín, humo, polen y por combustión de gases. La contaminación por material particulado incluye a PM10 (partículas inhalables que su diámetro son menores o iguales a 10 micrómetros) y PM2.5 (partículas finas que su diámetro sea menor o igual a 2.5 micrómetros). El material particulado está compuesto principalmente por: metales pesados, carbono orgánico y componente secundarios incluidos el sulfato, nitratos, amonio y aerosoles (Pengfei et al, 2020).

La Organización Mundial de la Salud (2018), determina que los niños están expuestos a la contaminación atmosférica tanto al aire libre como en espacios cerrados; además en el 2016 se determinó que 4.2 millones de muertes prematuras, en el Perú durante el periodo del 2015 fallecieron alrededor de 18 900 personas a causa de padecer alguna infección respiratoria.

Durante el periodo del 2015 y en el periodo del 2017, las estaciones de calidad del aire de Puente Piedra, Ate y de Villa María del Triunfo fueron las que más superaron el ECA-diario de PM10, mientras que en el periodo del 2017 las estaciones de calidad de aire que superaron el ECA-diario de PM 2.5 fueron: Ate, Santa Anita, Villa María del Triunfo, Santa Anita y San Juan de Lurigancho, aumentando la preocupación por la salud de los pobladores de estos distritos.

La dispersión del material particulado (PM10 y PM2.5), son favorecidas por las variables meteorológicas: velocidad del viento, humedad relativa y temperatura del aire.

Una de las soluciones que se presentan frente a esta realidad, es la adecuada gestión de los resultados que se obtendrán en la presente investigación, como, por ejemplo: considerara los periodos en donde las variables meteorológicas favorezcan la dispersión del material particulado y de otros contaminantes.

En la presente investigación se establece las correlaciones que existe entre las variables meteorológicas simuladas y observadas con el material particulado PM10 y PM2.5, simuladas y observadas. Además, se determinó que la simulación que realiza el modelo WRF-Chem se asemeja al comportamiento de los valores observados; exceptuando a la velocidad del viento.

Los apartados desarrollados en el presente estudio se dividen en 7 capítulos: el primer capítulo es el planteamiento del problema, seguido del marco teórico, el tercer capítulo se encuentran las variables e hipótesis, el cuarto capítulo detalla la metodología usada en la presente investigación, en el capítulo 5 se encuentran los resultados por cada objetivo específico, en el capítulo 6 se encuentran la discusión y por último se demuestran las conclusiones que se llegaron en la presente investigación.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. MOTIVACIÓN

En el Reporte Mundial de la Calidad del Aire (World Air Quality Report, 2018) se describe que Perú ocupa el primer lugar en cuanto a la contaminación del aire, por concentración de PM_{2.5} (28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), siendo la más alta de Latinoamérica y el Caribe. En el último reporte mundial de calidad del aire (Air Visual, 2019), se describe que la contaminación del aire contribuye al aumento de muertes prematuras, ascendiendo a más de 7 millones de personas cada año. La mala calidad del aire conlleva a fallecimientos que representa aproximadamente USD 225 mil millones de pérdidas de ingresos laborables (Banco Mundial, 2016). Factores como la temperatura del aire, topografía del lugar, humedad relativa, entre otros contribuyen a la dispersión de los aerosoles, disminuyendo así la mala calidad del aire; es por ello que se elabora la presente tesis como parte del proyecto “Evaluación de Impacto de Emisiones Vehiculares en las concentraciones de aerosoles atmosféricos usando el modelo WRF-Chem en Lima Metropolitana”; la cual es financiada por FONDECYT (N° de Contrato 424-2019-FONDECYT) en la línea de investigación: niveles de contaminación ambiental de CONCYTEC.

1.2. ESTADO DE ARTE

Actualmente se han realizado investigaciones para el análisis de la calidad del aire y su predicción meteorológica (Navarro, 2018); así como para la estimación de la concentración de material particulado (Navarro, 2019); haciendo uso del modelo WRF-Chem. Entidades públicas como el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) realiza el modelamiento numérico de la calidad del aire con el modelo WRF-CHEM versión 3.8.1 (Sánchez et al., 2018) un modelo meso escala que tiene acoplado la componente meteorológica con la componente de la química atmosférica. Este modelo WRF-Chem genera salidas de contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas para cada hora del día siguiente, con lo cual generan pronósticos de calidad del aire de manera confiable para un solo contaminante: el PM_{2.5}. En ese sentido, la presente tesis se centra entender y explicar la relación entre el material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) con las variables meteorológicas (Temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) utilizando el modelo WRF-

CHEM-versión 4.0; ampliando así el campo de investigación. En la región de China, el modelo WRF-Chem se aplicó para realizar una simulación de los principales componentes del PM_{2.5} para posteriormente realizar una comparación con las observaciones in situ, el modelo llegó a representar adecuadamente la variabilidad temporal de PM_{2.5} (Sha et al., 2019).

1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La Organización Mundial de la Salud (2012), estima que el 23% de las muertes prematuras que se producen en todo el mundo eran atribuibles a factores ambientales, y el porcentaje aumenta a un 36% al realizar la estimación en niños desde 0 a 14 años.

Entre las enfermedades con mayor proporción de causas de factores ambientales, son: diarrea, las infecciones de las vías respiratorias inferiores, lecciones accidentales y el paludismo.

Clean Air Institute (2018) reporta que alrededor de 800 personas fallecen por hora a nivel mundial a causa de los efectos de la contaminación de aire.

Una de las principales causas de mortalidad de Perú entre los años 1986 y 2015 fueron las infecciones respiratorias agudas (Miranda et al, 2018).

Según SENAMHI la estación de Villa María del Triunfo superó el Estándar Nacional de Calidad Ambiental (ECA)-diario de PM₁₀, en el periodo de 65 días durante el año 2015; las estaciones de Puente Piedra y Ate superaron el ECA-diario de PM₁₀ en 45 días y 12 días en el año 2015 respectivamente (Sánchez et al, 2016). En el periodo del 2017, la estación de calidad del aire de Ate supera el ECA-diario de PM₁₀ por 115 días en los últimos 6 meses del año mencionado, la estación de calidad de aire de Puente Piedra supera el ECA-Aire en 64 días, la estación de Villa María del Triunfo también supera el ECA-diario de PM₁₀ en el periodo de 71 días en el 2017. Mientras que para la medición del PM_{2.5} la estación de calidad de aire que superan el ECA es la de Ate, 41 días en los últimos 6 meses del 2017 (estación con mayor cantidad de días superadas).

SENAMHI cuenta con 10 estaciones distribuidos en Lima Metropolitana, en las cuales se realizan monitoreos diarios de material particulado y gases contaminantes, sin embargo, para la presente tesis solo se usó 7 estaciones porque no presentan datos completos de las variables que se están analizando en el presente trabajo de investigación (ver Anexo N° 3).

Espinoza (2018) concluye que la variación temporal de la temperatura del aire y la velocidad del viento demuestran una correlación negativa con las concentraciones del PM10 y PM2.5. Pacsi & Murriel (2018) encontró que las concentraciones de PM2.5 tuvieron valores altos en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina, asociados a una correlación positiva con la humedad relativa, mientras que la correlación fue negativa con la temperatura del aire, velocidad del viento.

El daño que genera el aumento de material particulado menores a 10 y 2.5 micras generan impactos en la salud de la población que en ocasiones podrían convertirse en irreversibles. Es por ello que es necesario plantear soluciones considerando su efectividad en el área que se realizara.

1.4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.4.1 Problema General

- ¿Cuál es la correlación entre el material particulado y las variables meteorológicas (velocidad del viento, humedad relativa y temperatura del aire) usando el modelo WRF-Chem en Lima Metropolitana en febrero de 2018?

1.4.2 Problema Específicos

- ¿Cuál es el desempeño del modelo en la simulación de las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) en Lima metropolitana en febrero del 2018?
- ¿El comportamiento de las variables meteorológicas simuladas utilizando el modelo WRF-Chem se asemejan a las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) medidas en Lima metropolitana en febrero del 2018?

1.5. OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

- Correlacionar el material particulado y las variables meteorológicas utilizando el modelo WRF-CHEM en Lima metropolitana en el mes de febrero del 2018.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Evaluar el desempeño de las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) simuladas con el modelo de la calidad del aire WRF-Chem en Lima Metropolitana en febrero de 2018.
- Comparar las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) medidas y simuladas con el modelo WRF-Chem en Lima Metropolitana en febrero de 2018.

1.6. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN MOTIVACIÓN

En los países desarrollados, aproximadamente el 20% representan infecciones de las vías respiratorias inferiores son atribuibles a causas ambientales (considerando la exposición al uso de combustibles sólidos en lugares cerrados, adicionando la contaminación de aire externo) aproximadamente el porcentaje llega a un 42% (OMS, 2012).

En el Perú durante el periodo del 2015 fallecieron alrededor de 18 900 personas a causa de padecer alguna infección respiratoria aguda baja, produciendo una mortalidad de 60.7 muertes por 100 mil habitantes (Miranda et al,2018).

Por estas razones los investigadores en los últimos años han mostrado una creciente preocupación por la contaminación del aire. En la actualidad existen modelos transporte químico, que son herramientas sumamente necesarias y facilitadoras para realizar la investigación científica y poder realizar pronósticos de la calidad del aire.

Una de las consideraciones importantes que se debe de tener en cuenta, además de la concentración de los contaminantes, son cómo los factores climáticos y meteorológicos contribuyen a la dispersión de estos; es por ello que estas variables tienen un rol importante, por ejemplo la velocidad del viento contribuye al transporte y a la dilución de los contaminantes, es decir que cuando la velocidad aumenta, mayor es el volumen del aire que se desplaza por una unidad de tiempo, por ende la concentración del contaminante (material particulado), en cuanto a la humedad relativa, cuando aumenta de valores la concentración del material particulado disminuye y por último la concentración de material particulado con la temperatura es positiva, es decir que cuando los valores de la temperatura aumenta, la concentración de material particulado también aumenta.

Por tanto, este trabajo busca obtener como resultado las correlaciones entre el material particulado (PM10 y PM2,5) con las variables meteorológicas utilizando el modelo de calidad del aire llamado WRF-Chem (sigla de inglés Weather Research and Forecasting - WRF- Model Coupled with Chemistry). Los beneficiarios de la presente investigación serán los tomadores de decisión como del Ministerio del Ambiente, Gobierno Regional de Lima, entre otras; con la finalidad de reducir la contaminación del aire en nuestra región.

Uno de los elementos importantes para usar estos modelos son los datos meteorológicos, las concentraciones de las emisiones; estos datos nos ayudaran a obtener una representación más precisa de los procesos químicos que ocurren en la atmosfera. (Mohan & Gupta; 2018).

II. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1 ANTECEDENTES NACIONALES

- Warren (2018), en su investigación titulada “Estimación de la concentración de material particulado PM10 y PM2.5 en el área metropolitana de Lima utilizando un modelo euleriano”; ha tenido el objetivo de estimar las partículas PM2.5 utilizando el modelo WRF-CHEM versión 3.8.1 para los meses de febrero y julio de 2016; además de caracterizar los valores de entrada para las condiciones meteorológicas que podrán ser útiles para poder verificar si el modelo logra una adecuada simulación; de la misma manera se realizó para las emisiones vehiculares. Para comprobar de manera objetiva si el modelo realiza de manera adecuada la simulación, se realiza la evaluación por medio de parámetros estadísticos (sesgo medio, sesgo medio normalizado, error absoluto medio, error cuadrático medio, raíz del error cuadrático medio e índice de concordancia).

El trabajo de Warren (2018) llegó a las siguientes conclusiones que los perfiles de las concentraciones de las estaciones analizadas, se comportan que se relaciona con las características del tráfico vehicular en la ciudad de Lima. En las estaciones horarias de PM10 el modelo minimiza los resultados en comparación de las medias observadas. Caso contrario sucede con el PM2.5 en donde las concentraciones estimadas y las observadas existe poca diferencia entre ambas concentraciones. Además, se comprueba estadísticamente que a través del sesgo medio se comprueba que hay homogeneidad entre los valores estimados y observados; tanto para PM 2.5 y PM10 (menor homogeneidad).

- Sánchez et al. (2018), en la investigación titulada “Modeling Study of the Particulate Matter in Lima with the WRF-Chem Model: Case Study of April 2016” utilizó el modelo WRF-Chem para la elaboración de un sistema operativo de pronóstico de la calidad de aire para Lima Metropolitana de Lima-Callao. Dentro de la metodología se encuentra una simulación de contaminación del aire, específicamente en abril del 2016, época en donde se registró concentraciones elevadas de material particulado de PM2.5; esa simulación realizada con el modelo

se procedió a comparar con las mediciones que se realizaron in situ. El trabajo concluyó que el algoritmo de estadística de salida del modelo (MOS) aumento la precisión para sesgo normalizado promedio para el PM10 (aumento de 43.1% a 71.3%) y PM2.5 (3.1% a 7.3%); además se presentó una reducción de error de 48% y 92.3% a 13.4% y 10.1% para PM10 y PM2.5 respectivamente. Los resultados del modelo WRF-Chem mostraron una relación entre la temperatura y la humedad relativa; se demuestra que este modelo es una herramienta útil para el análisis de la calidad del aire en Lima Metropolitana.

- Gonzáles et al. (2018), en su investigación titulada “High-resolution air quality modeling in a médium-sized city in the tropical Andes: Assessment of local and global and global emissions in understanding ozone and PM10 dynamics” los modelos de calidad de aire de alta resolución en la región de los Andes son mínima; específicamente en las ciudades de América del Sur, que en estos últimos años el crecimiento urbano ha ido incrementándose contribuyendo de esta manera al aumento del riesgo que se asocia con los episodios de contaminación del aire. Se uso el modelo WRF-Chem en el análisis de la influencia de los inventarios de emisiones locales y globales (EI) en la representación de las concentraciones de ozono y PM10 en la ciudad andina de Manizales, Colombia. Además, se evaluó el impacto relativo de las emisiones antropogénicas en la dinámica de las variables ya descritas. Una de las conclusiones es que se muestra una buena relación entre las predicciones y las observadas, en general se concluye que el modelo captura razonablemente bien la variación diurna de temperatura y la humedad relativa; cabe precisar que se obtuvieron grandes diferencias en la representación de la velocidad del viento.

2.1.2 ANTECEDENTES INTERNACIONES

- Zhao et al (2019), realizó un estudio titulado “Influences of planetary boundary layer mixing parameterization on summertime Surface ozone concentration and dry deposition over North China” en donde se realiza la modelación regional y se analiza cómo la capa límite planetaria y las parametrizaciones de esta capa influyen en las concentraciones de ozono superficial y los flujos de deposición seca en la región de Beijing – Tianjin – Hebei en la época de julio del 2015. Se utilizó el modelo WRF-Chem para la simulación de ozono superficial y la deposición seca. Se realizó 3 evaluaciones (YSU, MYJ y ACM2), las cuales representan 3 niveles diferentes de turbulencia, además se consideraron los factores físicos y químico que son claves para la parametrización de la deposición seca de ozono. Dieron como resultado que las simulaciones sobreestiman las concentraciones medias diarias de ozono durante el periodo de evaluación. El esquema YSU muestran una sobreestimación en la concentración diaria de ozono, caso contrario sucede en el horario diurno; en el segundo esquema ACM2 muestra mayores subestimaciones del ozono superficial durante la noche.
- Wang et al (2020), realizó la investigación titulada “Modeling PM2.5 and O3 aerosol feedbacks using WRF/CHEM over the Sichuan Basin, southwestern China” en donde se busca establecer como las retroalimentaciones usadas en el modelo WRF-Chem en Sichuan Basin que se ubica en la zona suroeste de china para el modelamiento de PM2.5 y ozono. Para lo cual se usó el dominio con un anidado de 36 Km, los datos de entrada fueron obtenidos del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP) en el formato FNL, con un tiempo de medición cada 6 horas y con una resolución de 1°x 1° para los meses de enero y julio. Se concluyó que la radiación solar demostró una ligera disminución; mientras que la capa límite planetaria disminuye con la temperatura baja y con la velocidad del viento. Se pudo observar que las retroalimentaciones realizadas mejoran de manera significativa la simulación de las variables (Wang et al, 2020).
- Zhe et al (2020) en su estudio titulada “Meteorological characteristics within boundary layer and its influence on PM2.5 pollution in six cities of North China based on WRF-Chem”, se determinó las características meteorológicas dentro de la capa límite y su influencia en la contaminación de PM2.5 en seis ciudades del norte de

china usando WRF-Chem, para lo cual el programa se configuro con un dominio de 27 Km y de 9 Km, los datos iniciales (condiciones meteorológicas y de frontera) se obtuvieron de los centros nacionales de predicción ambiental. Las emisiones se calcularon a partir del modelo de emisiones y aerosoles de la naturaleza (MEGAN). El periodo de evaluación fue de 29 de junio de 2017 al 31 de julio del mismo año, también se evaluaron datos del 29 de diciembre de 2016 al 31 de enero de 2017 (Zhe et al, 2020). Se muestra una correlación positiva entre la capa limite planetaria y la velocidad que indica la concurrencia de dispersiones horizontales y verticales; de esta manera se deteriora el nivel de contaminación de PM_{2.5} en bajas condiciones de la capa limite planetaria. Zhe et al (2020) determinaron que PM_{2.5} es positivamente correlacionado con la humedad relativa (R=0.18-0.46 en enero y R=0.15-0.33 en julio). Mientras que con la velocidad del viento se correlaciono negativamente (R=0.40-0.18 en enero y R= 0.41-0.13 en julio).

El coeficiente de correlación entre PM_{2.5} y la temperatura fue positivo (R=0.10-0.54 en enero), pero negativo (R=0.6-0.06 en julio), excepto en BJ (R=0.004) (Zhe et al, 2020).

Debido a la inversión térmica en enero, cuando la capa limite se redujo, la temperatura aumento con la humedad relativa alta y la velocidad del viento disminuyo, dando como resultado una elevada concentración de PM 2.5. Es decir que cuando la capa limite planetaria disminuye, y la velocidad del viento también se comporta de la misma manera; la humedad relativa aumenta generándose así un escenario desfavorable para la contaminación de PM_{2.5}. (Zhe et al, 2020).

- Luna et al (2020), en su estudio titulado “SO₂ and NO₂ simulation and validation in metropolotan Lima using WRF-Chem model” realizaron la predicción y evaluación de escenarios contaminantes en los meses de enero, febrero, marzo, julio, agosto y septiembre del 2017; de dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno; para lo cual se usó el modelo WRF-Chem, en donde también se consideraron las variables meteorológicas como la velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad relativa y presión atmosférica. Para la química de la fase gaseosa, se usó el esquema RADM2, para el módulo de aerosoles se utilizó MADE-SORGAM y para la fase de fotolisis se usó Fast-J. Posteriormente se comparó las predicciones realizadas por el modelo, con los datos reales medidos por el Servicio de

Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de las 10 estaciones que se ubican en las zonas de Lima. Las simulaciones obtenidas del modelo se superponen a los valores obtenidos por las estaciones de monitoreo (Luna et al, 2020). Además, se observó que existe un aumento de SO₂ a medida que aumenta la temperatura, y podría tener relación con las reacciones de fotólisis que suceden en presencia de los rayos del sol. También la dirección del viento muestra la misma línea de tendencia del contaminante y en el mes de marzo es más notoria este comportamiento (Luna et al, 2020). En cuanto al comportamiento del NO₂, también se muestra sensible a los valores de temperatura; como resultado los niveles de este contaminante aumentan conforme pasan los meses de verano. Y también posee una relación directa con la acción del viento (Luna et al, 2020).

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1 Variables meteorológicas

Son magnitudes meteorológicas que se pueden medir y que en su conjunto representan las condiciones del estado de la atmosfera. Algunas de las principales variables meteorológicas son la presión atmosférica, temperatura, humedad, dirección y velocidad del viento, etc.

2.2.1.1. La temperatura del aire

La temperatura es considerada como una magnitud física, el cual se obtiene como resultado de la energía cinética de las partículas. Las unidades de medidas que se usan para la temperatura son: escala Celsius ($^{\circ}\text{C}$), escala Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) y escala Kelvin (Rivas, 2018). En la troposfera temperatura del aire disminuye con altura, con el valor de 6.6°C por cada 1000 metros, y temperatura de aire también cambia horizontalmente de un lugar a otro. Debido a estos gradientes de temperatura se originan movimientos horizontales y verticales de masas de aire. Los movimientos horizontales y verticales de masas de aire pueden transportar la contaminación del aire hasta lugares muy alejados de su fuente de emisión (Picó et al., 2012).

2.2.1.2. La Humedad

El agua es uno de los principales componentes de la atmosfera; y su presencia depende de la temperatura y presión (FECT, 2004).

La humedad se define como la cantidad de vapor de agua que está presente en la atmosfera y su expresión cuantitativa suele realizarse de distintas maneras; esto dependerá en cómo se desee expresar la relación del vapor del agua y la atmosfera, dentro de las más importantes tenemos (Hernández, 2019):

- Razón de mezcla: es la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco en cierto volumen de aire. Su unidad de medida es gramos de vapor de agua por Kilogramo de aire seco.

- Humedad específica: es la masa de vapor de agua en una unidad de masa de aire (aire seco más vapor de agua).
- Humedad Absoluta: cantidad de vapor de agua (gramos), contenido en valor determinado de volumen de aire (m³).
- Humedad relativa: relación, que se expresa en porcentajes, entre la mezcla real y la razón de mezcla de saturación; en una unidad de superficie plana, que cumple con la misma presión y temperatura.

Sin embargo, la medida de humedad que más se utiliza es la denominada humedad relativa, el cual se expresa en tanto por ciento (%) y se calcula según la siguiente fórmula:

$$h = \frac{e}{E} * 100$$

donde: e = es el contenido de vapor de masa de aire.

E = máxima capacidad de almacenamiento de la masa de aire.

2.2.1.3. *Velocidad del viento*

El viento es el movimiento de aire desde un área hasta otra. Su origen es variado, pero por lo general se origina cuando en dos puntos existe una diferencia de presión o de temperatura a esta zona se le denomina gradiente (Luque, 2018).

La unidad de medida de la velocidad del viento es el Km/h o el m/s; y el instrumento más utilizado es el anemómetro (Luque, 2018).

2.2.2 *Material particulado*

El termino de material particulado es para explicar la mezcla de partículas sólidas y gotas que se encuentran en el aire (EPA, 2019), también se le conoce como aerosol atmosférico se utiliza la simbología PM, acompañado de un numero el cual indica el tamaño (diámetro) de la partícula (Barrenetxea et ál, 2003), cabe precisar que la unidad de medida del material particulado es $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Se encuentran suspendidas en el aire principalmente formadas por polvo, hollín, humo, polen y por combustión de gases.

La contaminación por material particulado incluye:

- PM2.5.- partículas finas que su diámetro sea menor o igual a 2,5 micrómetros. Contienen metales pesados, carbono orgánico, carbón elemental y componentes secundarios incluidos el sulfato, nitrato, amonio y aerosoles orgánicos secundarios (Pengfei et al, 2020).
- PM10.- partículas inhalables que su diámetro sean menores o iguales a 10 micrómetros.

2.2.2.1. Principales emisores del material particulado

Los aerosoles finos o de menor tamaño se originan de fuentes antropogénicas, como los procesos de combustión. Las partículas gruesas se originan por acción mecánica (viento, erosión, etc.) por su gran tamaño estas suelen caer por acción de la gravedad, deposición seca o húmeda.

Estas partículas no generan efectos significativos en la salud de las personas, pues por su gran tamaño se depositan con mayor facilidad; disminuyendo así su peligrosidad (Encinas, 2011).

2.2.2.2. Efectos en la Salud de la población

Los distintos contaminantes poseen capacidades diferentes de ocasionar daños sobre la salud de la población que está expuesta, estas dependerán de las propiedades físicas y químicas de los componentes de estos contaminantes, además de la intensidad y la duración de la exposición, edad de las personas que están siendo expuestos y del estado de salud de los individuos expuestos (Vara, 2017).

El daño a la salud ocasionada por la contaminación del aire, es una externalidad negativa lo cual se aborda desde la morbilidad (Choy, 2014).

Las dimensiones del material particulado, se relacionan de manera muy directa con la gravedad de sus efectos. El material particulado, PM10, favorece con el incremento y aparición de enfermedades respiratorias y afecciones alérgicas. Sin embargo, el material particulado, PM2.5, es el que mayor peligrosidad representa, ya que su

alcance puede penetrar profundamente los pulmones y puede llegar a depositarse en los alveolos provocando obstrucciones (Robles, 2020).

Según SENAMHI la estación de Villa María del Triunfo superó el Estándar Nacional de Calidad Ambiental (ECA)-diario de PM10, en el periodo de 65 días durante el año 2015; las estaciones de Puente Piedra y Ate superaron el ECA-diario de PM10 en 45 días y 12 días en el año 2015 respectivamente (Sánchez et al, 2016). Durante los años 1986 y 2015 fueron las infecciones respiratorias agudas (Miranda et al, 2018). Mientras que en el periodo del 2017, la estación de calidad del aire de Ate supera el ECA-diario de PM10 por 115 días en los últimos 6 meses del año mencionado, la estación de calidad de aire de Puente Piedra supera el ECA-Aire en 64 días, la estación de Villa María del Triunfo también supera el ECA-diario de PM10 en el periodo de 71 días en el 2017. Mientras que para la medición del PM2.5 la estación de calidad de aire que superan el ECA es la de Ate, 41 días en los últimos 6 meses del 2017 (estación con mayor cantidad de días superados) aumentando así la probabilidad que la población cercana pueda sufrir algún tipo de enfermedad respiratoria.

2.2.3 Estándar de Calidad Ambiental para aire del PM10 y PM2.5

De acuerdo a lo establecido en la Ley General del Ambiente N°28611, el Estandar de Calidad Ambiental “*es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo en su condición de cuerpo receptor, que no representan riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente*”.

Conforme a lo decretado en la Ley General del Ambiente, en el año 2017, exactamente el 7 de junio de aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y se establecen Disposiciones Complementarias, mediante el Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM, dejando derogado: el DS N°074-2001-PCM, D.S. N° 003-2008-MINAM y el D.S. N° 006-2013-MINAM.

A continuación, en la siguiente tabla se presenta el valor de ECA para PM10 y PM2.5; así mismo se presenta la guía de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para el PM10 y PM2.5.

Tabla 1

Estándar de Calidad Ambiental para PM10 y PM2.5

Parámetros	Periodo	Valor $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Criterios de evaluación	Método de análisis
Material particulado con diámetro menor a 2.5 micras	24 horas	50	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (gravimétrica)
	Anual	25	Media aritmética anual	
Material Particulado con diámetro menor a 10 micras (PM10)	24 horas	100	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (gravimétrica)
	Anual	50	Media aritmética anual	

NE: no exceder

Tabla 2

Guía de Calidad del Aire de la Organización Mundial de la Salud para PM10 y PM2.5

Parámetros	Periodo	Valor $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Material particulado con diámetro menor a 2.5 micras (PM2.5)	Media 24 horas	25
	Media Anual	10
Material Particulado con diámetro menor a 10 micras (PM10)	24 horas	50
	Anual	20

2.2.4 Lima Metropolitana

2.2.4.1. Ubicación

Se sitúa en la zona occidental y central del país. Lima es el departamento más poblado del país, además es el área más populosa del Perú. Su clima es subtropical, desértico y húmedo. La temperatura anual promedio es de 14 °C durante el invierno y 25.5 °C en verano, los cielos nublados están presentes en mayo a diciembre, la garua o llovizna es la típica lluvia de la región (MINSAsf).

En la siguiente tabla se muestra la ubicación exacta de Lima metropolitana:

Tabla 3

Ubicación de Lima Metropolitana. (INEI, 2018)

Orientación	Norte	Este	Sur	Oeste
Latitud sur	11° 34' 21''	11° 57' 11''	12°31'12''	11°46'60''
Longitud oeste	77°04'01''	76°38'50''	76°47'03''	77°11'54''

Para el 2018 Lima Metropolitana contaba con 8 574 974 de habitantes (INEI, 2018) y para el 2020 el Instituto Nacional de Estadística e Informática, estimo que la población de lima metropolitana ascendería a 10 millones de habitantes (INEI,2020).

La población se encuentra distribuidos en los 43 distritos y a la provincia constitucional del Callao, el cual se conforma por 7 distritos (INEI, 2018).

Los 43 distritos cuales se encuentran distribuidos en 5 zonas: Lima norte, Lima Centro, Lima Sur, Lima Este y la Provincia Constitucional del Callao.

Se presenta una ilustración en donde se apreciará de manera didáctica la distribución de estos 43 distritos.

2.2.4.2. Topografía y geomorfología

En Lima Metropolitana posee una pendiente de 4 a 5 % en dirección NE-SO. Se ubica sobre los abanicos de deyección cuaternarios de los ríos Rímac y Chillón.

Lima es propensa a la contaminación atmosférica ya que se encuentra limitada por el oeste con el mar y por el este se encuentran las ultimas estribaciones de la Cordillera de los Andes. Mientras que por el sur y norte limita con las cuencas de los ríos Lurín y Chillón; haciendo que la dispersión horizontal de los contaminantes sea mínima (Saavedra,2014).

2.2.4.3. Contaminación del aire en Lima Metropolitana

En el periodo del 2009 hasta el 2018 se observa que las estaciones de la Red de Vigilancia Sanitaria del Aire de Lima y Callao (DIGESA), en la tabla 2 se encuentran la ubicación en coordenadas UTM de cada una de las estaciones de DIGESA, la gran mayoría de las estaciones no cumplen con la normativa vigente, exponiendo así, a su población a contraer enfermedades respiratorias.

A continuación, se presentan cuadros en donde se muestran los resultados, de los promedios anuales de las siete estaciones que pertenecen a la Red de Vigilancia Sanitaria del Aire de Lima y Callao, que está a cargo de la Dirección General de Salud Ambiental-DIGESA (Figura 1), además se muestran las ubicaciones de estas estaciones de vigilancia:

Tabla 4

Ubicación de las Estaciones de DIGESA

Código	Nombre de las Estaciones	COORDENADAS UTM	
		Este	Norte
E-1	Dirección regional de salud callao	268587	8665516
E-2	Hospital María Auxiliadora	286836	8654822
E-3	Centro materno Infantil Laura Rodríguez Dulanto	276145	8681924
E-4	Hospital Hipólito Unanue	283193	8668214
E-5	Congreso de la República	279424	8667402
E-6	Centro de Salud Lince	278840	8663564
E-7	Almacén del Ministerio de Salud	282659	8656570

Fuente: Red de Vigilancia del Aire de Lima y Callao (2007-2019). DIGESA

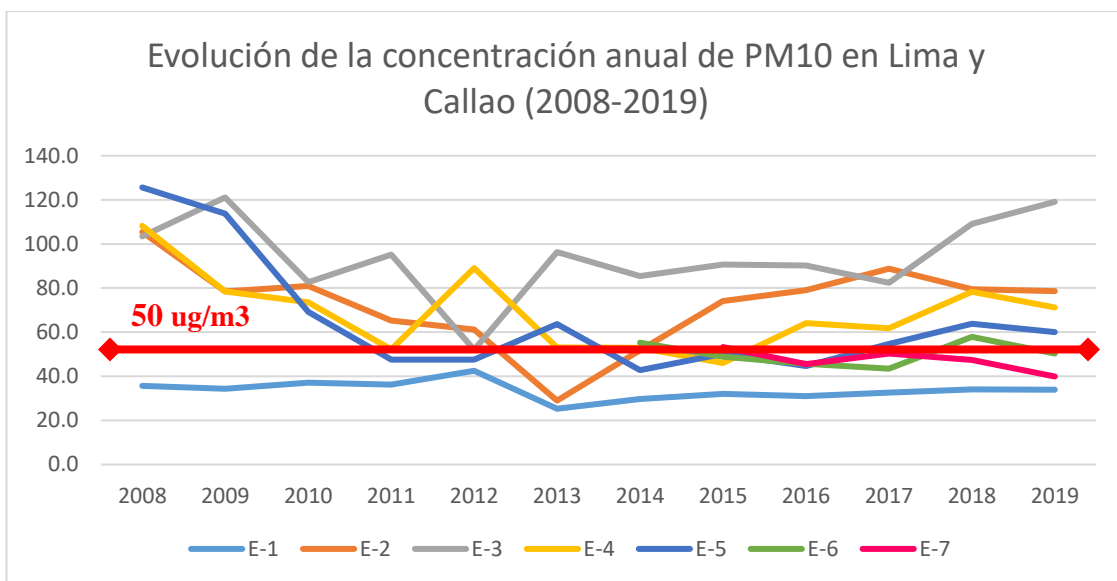


Figura 1: Evolución de la concentración anual de PM10 en Lima y Callao (2008-2019)

En la figura 2, se presenta los promedios anuales de concentración de material particulado inferior a 2.5 micras en los periodos de 2008-2019.

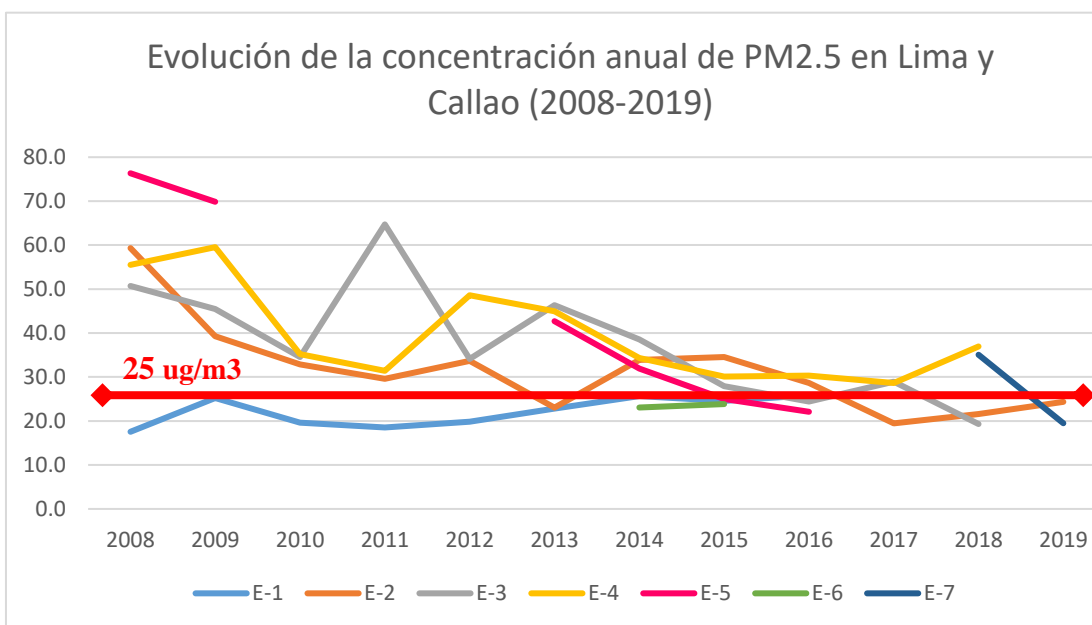


Figura 2: Evolución de la concentración anual de PM2.5 en Lima y Callao (2008-2019)

El reporte del Instituto Nacional de Estadística e Informática realizada en el año 2014, describe que las principales fuentes de contaminación fueron el parque automotor, y la emisión de las industrias, ambas fuentes contribuyen con la contaminación del aire por el uso de combustibles fósiles, además, de no aplicarse las medidas adecuadas para contrarrestar este impacto, como por ejemplo el cambio de los vehículos demasiados antiguos que aún se encuentran en funcionamiento, la falta de gestión en cuanto al tránsito vehicular, así como la falta de fomento del uso de vehículos amigables con el ambiente.

Los contaminantes se dividen en dos grandes grupos: contaminantes primarios y contaminantes secundarios. Los contaminantes primarios son aquellos que son emitidos de manera directa por las emisiones y entran en contacto de manera con la atmosfera; mientras que los contaminantes secundarios son aquellos que se originan de los contaminantes primarios cuando sufren reacciones químicas como hidrolisis, oxidaciones, fotolisis; dando así origen a nuevos compuestos como: ozono troposférico, sulfatos, ácido sulfúrico, etc.

2.2.5 Estaciones Meteorológicas

SENAMHI cuenta con dos tipos de estaciones las cuales se describen a continuación:

- Estación meteorológica convencional es una instalación destinada medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas. Estos datos se utilizan tanto para la elaboración de predicciones meteorológicas a partir de modelos números como parte de estudios climáticos (SENAMHI, 2020).
- Una estación meteorológica automática es una versión automatizada de la tradicional estación meteorológica, preparada tanto para ahorrar labor humana, o realizar mediciones en áreas remotas o inhóspitas (SENAMHI, 2020).

Las estaciones que se estudiarán en la presente tesis corresponden a estaciones meteorológicas automáticas.

2.2.6 Ubicación de las estaciones de la calidad del aire de SENAMHI

Mediante la plataforma de acceso a la información se solicitó información de las 10 estaciones de calidad del aire que se encuentran en Lima metropolitana; el cual se

recibió información solo de ocho estaciones; posteriormente a la recepción, se realizó la verificación de la información obtenida; determinando así que la estación de Villa María del Triunfo no contaba con los datos necesarios para que sea considerado dentro de esta investigación; por lo que a continuación, se presenta la ubicación de las estaciones elegidas para el estudio (Tabla 3).

Tabla 5

Listado de 7 estaciones con información disponible (SENAMHI, 2020).

Código de Estación de la calidad del aire	Ubicación en el distrito
CDM	Campo de Marte
SBJ	San Borja
PPD	Puente Piedra
CRB	Carabaylo
ATE	Ate
HCH	Huachipa
SJL	San Juan de Lurigancho

A continuación, se presenta la ubicación de las 7 estaciones de calidad de aire que se usaron para la presente investigación.

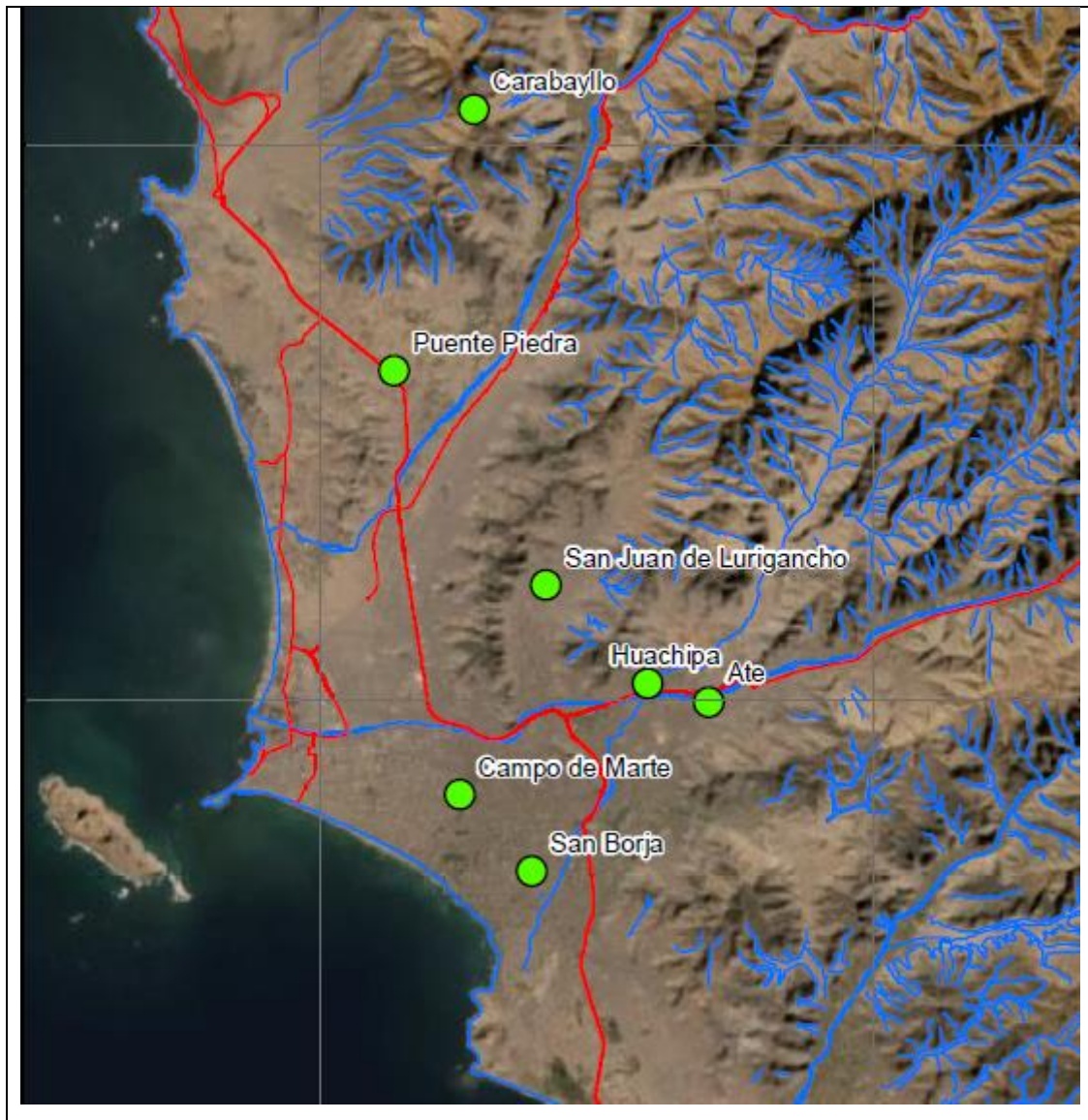


Figura 3 Ubicación de las estaciones de estudio

2.2.7 Modelo WRF-Chem

Es un modelo meteorológico, en el cual se usa para la investigación y de pronóstico del tiempo (WRF), acoplado con química. Este modelo simula la emisión, variables meteorológicas, deposición y transformación química de los gases que se encuentran en menos medida en la atmosfera y de las partículas muy pequeñas (sólidos o líquidos) que se quedan suspendidas en el aire; considerando la meteorología de la zona en donde se esté realizando el pronóstico (UCAR,2018).

El modelo WRF-Chem versión 4.0 ha sido utilizado para simular las variables meteorológicas y concentraciones de PM10 y PM2.5 en febrero de 2018. El dominio fue

el área metropolitana dividido en resolución espacial (pixel) $5 \times 5 \text{ Km}^2$ (Sánchez et al, 2018). Los datos meteorológicos para la condición inicial y frontera fueron obtenidos de NCEP (National Centers for Environmental Prediction), Análisis Final (FNL) con resolución espacial de 0.25×0.25 de espaciamiento de grilla, con 26 niveles verticales y disponible a cada 6 horas (00:00 – 06:00; 06:00 – 12:00 UTC). El FNL está disponible en <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.3/>.

El modelo WRF-Chem está compuesto por 3 partes esenciales los cuales son:

- a) Sistema de Preprocesamiento WRF (WPS)
- b) Sistema de simulación WRF más química.
- c) Herramienta de visualización

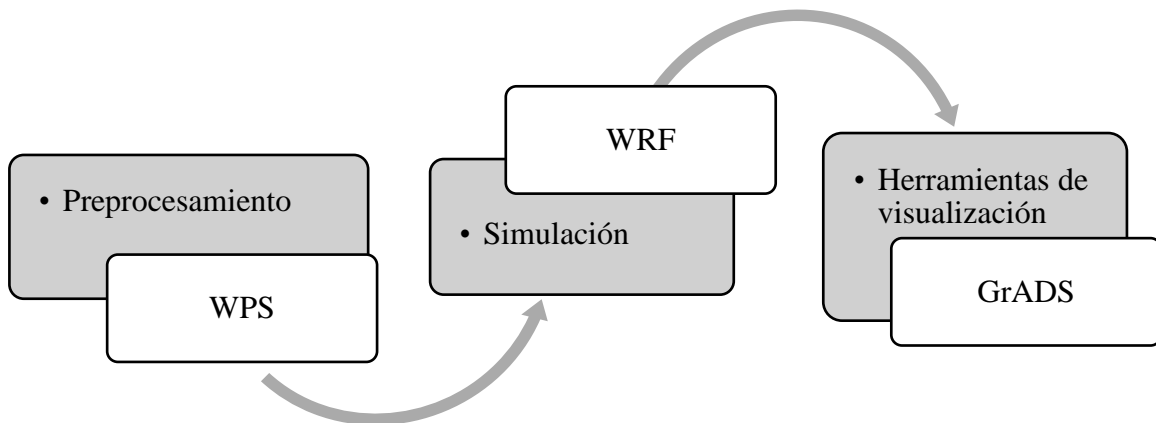


Figura 4 Componentes del programa WRF-Chem

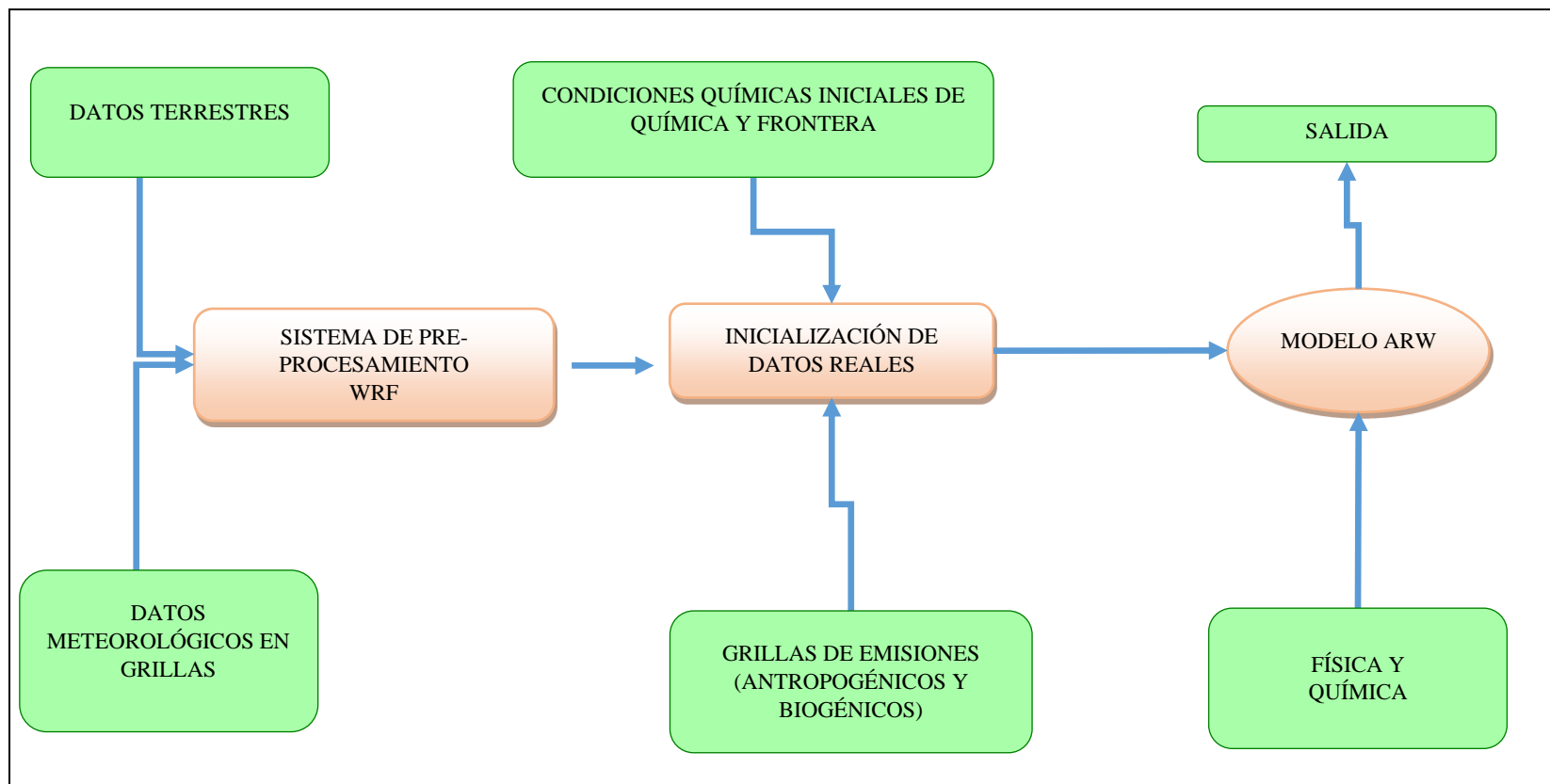


Figura 5. Componentes principales y diagrama de flujo del sistema del modelo WRF-Chem.

Nota: Los cuadros de color verde son aquellos datos externos que se necesitaran para realizar la simulación; mientras que los de color rosado indican los componentes principales del modelo. Adaptado del Manual del Usuario.

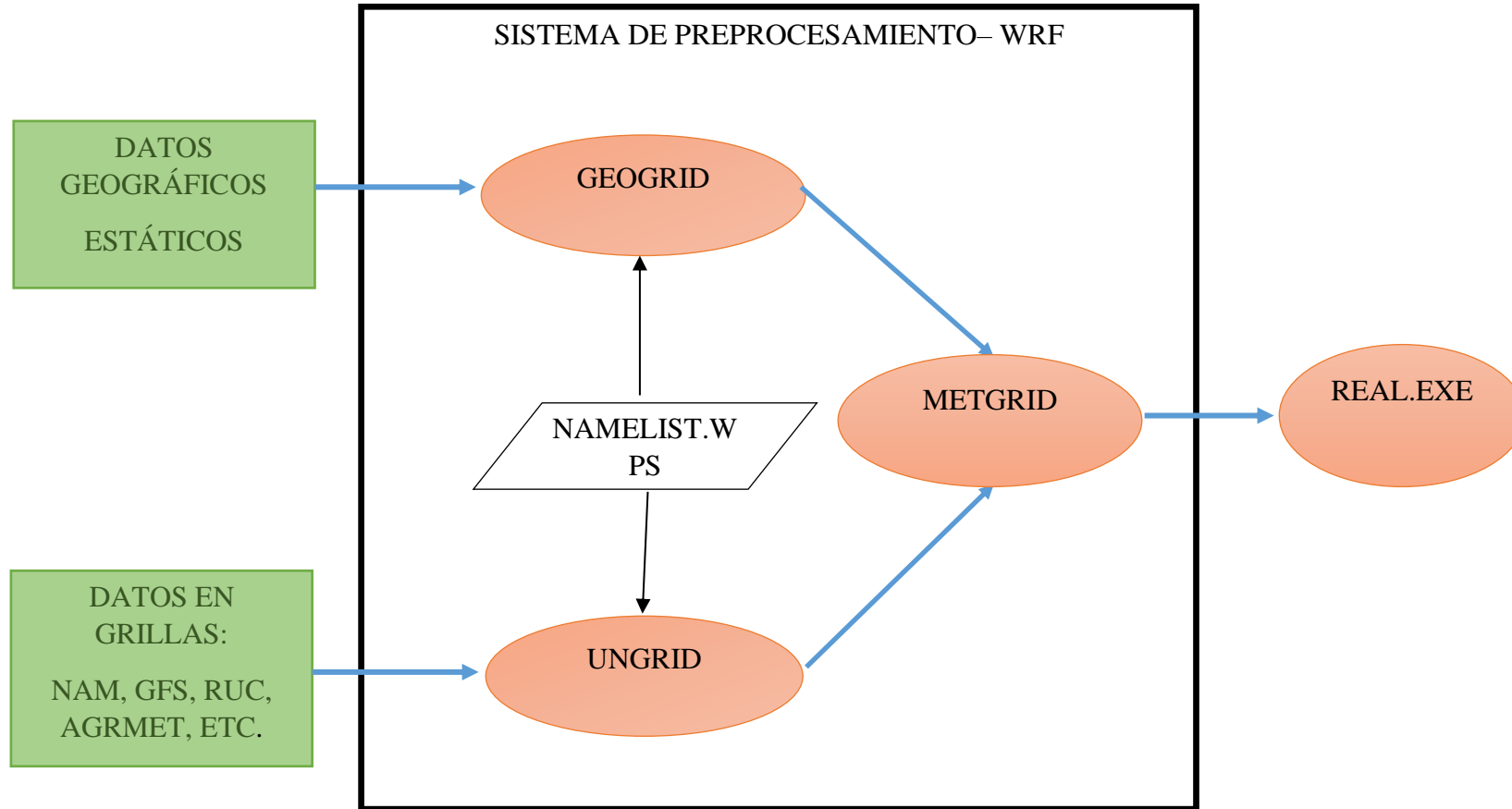


Figura 6. Esquema de funcionamiento de una simulación general; entre los componentes del WPS

Nota: Adaptado de Guía de Usuario WRF.Chem

2.2.6.1 WRF

Está compuesto por:

- Real.exe: realiza la interpolación vertical desde los niveles de presión hasta el sistema de coordenadas normalizados sigma de WRF, es decir; este componente se encarga de definir un sistema de coordenadas, considerando la orografía del área de estudio (Barraza,2017).
- Wrf.exe: este módulo es el que contiene las ecuaciones físicas de pronóstico y diagnóstico; las cuales son las que permiten realizar la predicción. Aquí también se incluyen las parametrizaciones que por medio de ellos se describirán los fenómenos físicos (Barraza, 2017).

2.2.6.2 Salida de WRF

Las salidas que proporciona el modelo poseen información pronosticada, para un intervalo de tiempo determinado. Los ficheros que componen estas salidas cumplen con las especificaciones de un formato conocido como netCDF (Network Data Form), es un grupo de interfaces de acceso para datos.

Posteriormente a la obtención de la salida, que el modelo nos proporciona, es necesario procesarla y poder traducirla a un “lenguaje más sencillo”, que nos facilite el análisis; para ello se puede usar cualquier herramienta que pueda reconocer el formato de salida del modelo, entre las más conocidas tenemos a GrADS, RIP4, Vis5D, VAPOR y NCL.

2.2.6.3 Configuración del modelo WRF-Chem

Las condiciones iniciales meteorológicas utilizadas fueron obtenidas de FNL (Final Analysis) los cuales se poseen del National Center for Environmental Prediction (NCEP).

El dominio fue el área metropolitana de Lima, el cual se ha dividido en gradillas de 5 km por 5km, el cual es la distancia mínima requerida para que se realice una adecuada simulación del área seleccionada.

Para las etapas que se involucran el desarrollo de los procesos químicos, la configuración del modelo fue el RADM2 (Regional Acid Deposition Model 2) (Fernández et al, 2010).

En cuanto a la parametrización de aerosol, la información requerida se ha obtenido del modelo de dinámica para Europa/módulo de aerosol modelo de aerosol orgánicos secundario (MADE), en el cual, los aerosoles orgánicos secundarios son incorporados por SORGAM (secondary organic aerosol model).

2.2.8 Pruebas Estadísticas

Las evaluaciones estadísticas han sido utilizadas para evaluar de manera cuantitativamente el desempeño del modelo (Sánchez et al, 2007). Para esto se utilizaron las siguientes pruebas estadísticas (Emey et al.,2017):

- **Promedio Sesgo (BIAS)** proporciona información acerca de la predisposición del modelo a sobrevalorar o minimizar una variable, nos medirá el error sistemático del modelo.

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Pred_{x,t}^i - Obs_{x,t}^i)$$

Si el resultado es un sesgo negativo se interpretará como una predicción de menor con respecto a la variable meteorológica observada.

- **El Promedio Error Gros (ERROR)**, se calcula como el valor absoluto de la diferencia de las variables simuladas con el modelo menos las variables observadas, el promedio Error Gros siempre arrojará valores positivos.

$$ERROR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Pred_{x,t}^i - Obs_{x,t}^i|$$

- **Promedio Sesgo Normalizado (NMB)**, se calcula haciendo una división por variables observadas a cada una de las diferencias realizadas entre las variables simuladas y las observadas. De acuerdo a EPA (2005) si el rango de sesgo normalizado está en el rango $\pm 5-15\%$ el resultado de modelo es aceptable. Gómez (2019), indica que para realizar comparaciones se toman 3 rangos de valores en promedio sesgo normalizado: los valores menores a $\pm 20\%$ se consideran buenos, entre los $\pm 20\% - \pm 40\%$ son satisfactorios y los que presentan valores superiores a $\pm 40\%$ son insatisfactorios.

$$NMB = \frac{\sum_{i=1}^N (Pred_{x,t}^i - Obs_{x,t}^i)}{\sum_{i=1}^N (Obs_{x,t}^i)}$$

- **Error Normalizado Gross (MNGE)**, para tener en cuenta el peso del error respecto al valor de la variable medida se normaliza el error absoluto, teniendo el error absoluto medio normalizado. De acuerdo a EPA (2005) si el resultado de MNGE está en el rango de 0-35% se acepta el resultado de modelo.

$$MNGE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{|Pred_i - Obs_i|}{Obs_i} \right) \cdot 100\%$$

Un valor de cero de esta medida estadística indicaría que el modelo coincide exactamente con los valores observados en todos los horarios y en todas las estaciones de la calidad del aire del SENAMHI.

- **Razón de los promedios (RATIO)**, razón de los valores simuladas sobre los valores observados de las variables meteorológicas. Una relación mayor de 1 indica que los valores simulados o predecidos son mayores que los observados; caso contrario sucede cuando los valores son menores que 1 indica que las variables meteorológicas observadas son mayores que las simuladas (EPA, 2005).

$$RATIO = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Pred_{x,t}^i}{Obs_{x,t}^i}$$

- **Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)**, se calcula como la raíz cuadrada de la media de la diferencia entre los valores pronosticados y los observados elevado al cuadrado (Bessagnet et al, 2016). RMSE cuantifica cuan diferentes es un conjunto de valores. Cuanto más pequeño es un valor de RMSE, se interpreta que los valores simulados y los observados son más similares.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum (Pred_i - Obs_i)^2 \right]^{1/2}$$

- **Índice de Concordancia (IAO)**, se describe como la diferencia entre las variables simuladas y las observadas elevadas al cuadrado entre las diferencias de las variables simuladas y promedios

Además, es considerada como la medida estandarizada del grado de error de predicción del modelo y varía entre 0 y 1 (Zambrano, s.f.); donde 1 indica que existe una relación perfecta y 0 indica que no hay ninguna relación.

$$IOA = 1 - \frac{\sum (Pred_i - Obs_i)^2}{\sum (|Pred_i - Obs_{media}| + |Obs_i - Obs_{media}|)^2}$$

La comparación de las variables meteorológicas simuladas con el modelo (WRF-Chem); es mediante el análisis gráfico cualitativo de serie de tiempo (Sánchez et al,

2007), estas gráficas nos proporcionarán información importante de la relación entre las variables meteorológicas simuladas y observadas; además, manifestara la habilidad del modelo para reproducir el valor más alto de la simulación, así como comparar el tiempo de los valores máximos de las simulaciones y observaciones (EPA, 1992); considerando las 07 estaciones de calidad del aire del SENAMHI de las que tienen información; representando la temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento; medias horariamente.

En suma, el presente trabajo se realizará gráficos de dispersión de las variables simuladas y observadas en cada una de las estaciones (Tabla N°1) y medidas horariamente.

Para la cuantificación de la correlación entre el aerosol atmosférico y las variables meteorológicas se utilizará el coeficiente correlación; lo cual nos indicaran si las variables están linealmente relacionadas, si el resultado es 1 indica que existe una relación perfecta, mientras que un coeficiente de correlación 0 significa que no hay relación lineal entre las variables (EPA, 2005).

$$R = \frac{(\sum(M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O}))}{(\sqrt{\sum(M_i - \bar{M})^2 \times \sum(O_i - \bar{O})^2})}$$

Para la obtención del índice de correlación se realizó mediante el programa SPSS en la versión 6 del programa, es un sistema global que se usa principalmente para el análisis de datos, este programa puede admitir cualquier tipo de archivo y generar como resultados: gráficos, diagramas de distribuciones; así como también estadísticos descriptivos y análisis estadísticos complejos.

El Programa SPSS, cuenta con las siguientes opciones: estadística básica y avanzada, bootstrapping, categories, complex sample, conjoint, tablas personalizadas, data preparation, arboles de decisión, marketing directo, entre otros.

Para la siguiente investigación se utilizó el análisis de correlación de Pearson, es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente.

Pearson define una medida de asociación lineal entre dos variables cuantitativas X e Y. El coeficiente de correlación entre las variables aleatorias se escribe así:

$$\rho_{xy} = \frac{C(X, Y)}{\sqrt{V(X)V(Y)}}$$

El coeficiente de correlación oscila entre -1 y +1, esto se interpreta de la siguiente manera: cuando el resultado sea +1 se considera que ambas variables poseen una relación **perfecta positiva** (si una de las variables aumenta o disminuye la otra variable sigue el mismo comportamiento) y cuando el resultado sea -1 estas variables poseerán una relación **perfecta negativa** (si una de las variables aumenta o disminuye la otra se comporta de manera contraria).

III. VARIABLES E HIPÓTESIS

3.1. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Tabla 6

Operacionalización de las variables identificadas en el presente estudio

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Indicadores	Metodología
<p>General</p> <p>¿Cuál es la correlación entre el material particulado con las variables meteorológicas (velocidad del viento, humedad relativa y temperatura del aire) usando el modelo WRF-Chem en Lima Metropolitana en febrero de 2018?</p>	<p>General</p> <p>Correlacionar el material particulado y las variables meteorológicas utilizando el modelo WRF-CHEM en Lima metropolitana en el mes de febrero del 2018.</p>	<p>General</p> <p>Existe correlación entre el material particulado y las variables meteorológicas utilizando el modelo WRF-Chem en Lima metropolitana en febrero del 2018.</p>	<p>Independiente</p> <ul style="list-style-type: none"> - Velocidad del viento (m/s) - Humedad Relativa (%) - Temperatura (°C) 	<p>-+1 ambas variables poseen una relación perfecta positiva (si una de las variables aumenta o disminuye la otra se asemeja)</p> <p>--1 estas variables poseerán una relación perfecta negativa (si una de las variables aumenta o disminuye la otra variable sigue el adopta un comportamiento contrario)</p>	<p>1. Coeficiente de Pearson</p>
<p>Específicos</p> <p>¿Cuál es el desempeño del modelo de WRF-CHEM en la simulación de las variables meteorológicas en lima metropolitana en febrero de 2018?</p>	<p>Específicos</p> <p>Evaluar el desempeño de las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) simuladas con el modelo de la calidad del aire WRF-Chem en Lima Metropolitana en febrero de 2018</p>	<p>Específicos</p> <p>El modelo WRF-Chem se desempeña correctamente en la simulación de las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento) en Lima Metropolitana en febrero de 2018.</p>	<p>Dependiente</p> <p>Material Particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</p>	<p>Indicadores</p> <p>-BIAS: si es negativa (-) valor simulado es < valor observado.</p> <p>- NMB: $\pm 5-15\%$ es aceptable.</p> <p>- MNGE : 0-35% aceptable</p> <p>-RATIO: >1 entonces obs<pred.</p> <p>-IAO: varia entre 0 y 1.</p>	<p>1. Pruebas estadísticas (BIAS, ERROR, NMB,MNGE, RATIO, RMSE e IAO)</p> <p>2. Modelo WRF-Chem</p>
<p>¿El comportamiento de las variables meteorológicas simuladas utilizando el modelo WRF-Chem se asemejan a las variables meteorológicas medidas en lima metropolitana en febrero del 2018?</p>	<p>Comparar las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) medidas y simuladas con el modelo WRF-Chem en Lima Metropolitana en febrero de 2018.</p>	<p>Los resultados de la simulación usando el modelo WRF-Chem demuestran un comportamiento semejante a las variables meteorológicas medidas en lima metropolitana en febrero del 2018.</p>		<p>Ambos comportamientos son semejantes</p>	<p>1. Graficas de series de tiempo</p> <p>2. Modelo WRF-Chem</p>

3.2. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1. Hipótesis general

- Existe correlación entre el material particulado y las variables meteorológicas medidas y simuladas usando el modelo WRF-Chem en lima metropolitana en febrero del 2018.
- HO-1: No existe correlación entre el material particulado y las variables meteorológicas medidas y simuladas usando el modelo WRF-CHEM en Lima metropolitana en febrero del 2018.

3.2.2. Hipótesis específicas

- El modelo WRF-Chem se desempeña correctamente en la simulación de las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento) en Lima Metropolitana en febrero de 2018.
- Los resultados de la simulación usando el modelo WRF-Chem demuestran un comportamiento semejante a las variables meteorológicas medidas en lima metropolitana en febrero del 2018.

IV. METODOLOGÍA

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

4.1.1. Solicitud de datos horarios de la red de estaciones de calidad del aire de Lima Metropolitana al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

La presente investigación se realizó con datos emitidos por SENAMHI, los cuales son de acceso público. Los datos solicitados corresponden a las mediciones realizadas en el periodo del 2018 de las variables meteorológicas: temperatura, velocidad del viento y humedad relativa; así como de los datos obtenidos en las mediciones para el PM10 y PM2.5.

La información enviada corresponde a las siguientes estaciones: Ate, San Borja, Villa María del Triunfo, Huachipa, San Juan de Lurigancho, Carabaylo, Puente Piedra y Campo de Marte.

4.1.2. Validación de datos

En la validación de datos se procedió a realizar lo siguiente:

- a. Se procedió a verificar que todas estaciones contaran con datos de las mediciones de: variables meteorológicas (temperatura, velocidad del viento y humedad relativa), de la misma manera se verifico si tenían datos del material particulado PM10 y PM2.5. Al termino de esta verificación se determinó que la estación de Villa María del triunfo no cuenta con datos medidos para el material particulado PM10 y PM2.5, es por ello que esta estación de calidad de aire no se encuentra dentro de la presente investigación. A continuación, se presentan la ubicación de las estaciones analizadas en la presente tesis (tabla 7).

Tabla 7

Cuadro de las 7 estaciones de SENAMHI.

Código de Estación	Distrito	Longitud	Latitud
CDM	Campo de Marte	77° 02	12°04
SBJ	San Borja	77° 00	12°06
PPD	Puente Piedra	77° 04	11°51
CRB	Carabaylo	77° 02	11°54
ATE	Ate	76° 55	12°01
HCH	Huachipa	76° 56	12°01
SJL	San Juan de Lurigancho	76°59	12°01

- b. Posteriormente a la verificación de la existencia de los datos que fueron necesarios para la presente tesis, se procedió a realizar una comparación en donde se contabilizo la cantidad de datos que se contada en el año 2018 y 2019; en donde se determinó que el año 2018 poseía mayor cantidad de datos para realizar su respectivo análisis y realizar así una adecuada investigación.
- c. La evaluación de las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) fueron verificadas por medio de ecuaciones estadísticas (Huang et al, 2019) y en donde no se contaba con datos se procedió a codificar con “SD”, estos días sin datos; probamente fueron cuando el equipo se encontraba en mantenimiento.

A continuación, se presentan las evaluaciones estadísticas que fueron utilizadas para evaluar de manera cuantitativamente el desempeño del modelo (Sánchez et al, 2007); además se relacionara estas pruebas estadísticas con el objetivo general y los objetivos específicos.

Tabla 8

Metodología utilizada por objetivo general y específico

	Objetivo	Método de Análisis	
		Prueba Estadística	Formula
General	Determinar la correlación entre el material particulado y las variables meteorológicas utilizando el modelo WRF-CHEM en Lima metropolitana en el mes de febrero del 2018.	Correlación de Pearson	$R = \frac{(\sum(M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O}))}{(\sqrt{\sum(M_i - \bar{M})^2 \times \sum(O_i - \bar{O})^2}}$
		Promedio Sesgo (BIAS)	$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Pred_{x,t}^i - Obs_{x,t}^i)$
		El Promedio Error Gros (ERROR)	$ERROR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Pred_{x,t}^i - Obs_{x,t}^i $
		Promedio Sesgo Normalizado (NMB)	$NMB = \frac{\sum_{i=1}^N (Pred_{x,t}^i - Obs_{x,t}^i)}{\sum_{i=1}^N (Obs_{x,t}^i)}$
Específicos	Evaluar el desempeño de las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) simuladas con el modelo de la calidad del aire WRF-Chem en Lima Metropolitana en febrero de 2018.	Error Normalizado Gross (MNGE)	$MNGE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{ Pred_i - Obs_i }{Obs_i} \right) \cdot 100\%$
		Razón de los promedios (RATIO)	$RATIO = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Pred_{x,t}^i}{Obs_{x,t}^i}$
		Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)	$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum (Pred_i - Obs_i)^2 \right]^{1/2}$
		Índice de Concordancia (IAO)	$IOA = 1 - \frac{\sum(Pred_i - Obs_i)^2}{\sum(Pred_i - Obs_{media} + Obs_i - Obs_{media})^2}$
	Comparar las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) medidas y simuladas con el modelo WRF-Chem en Lima Metropolitana en febrero de 2018.	<p>Método de Análisis</p> <p>Se realizó el análisis gráfico cualitativo de serie de tiempo (Sánchez et al, 2007), estas gráficas nos proporcionarán información importante de la relación entre las variables meteorológicas simuladas y observadas; además, manifestara la habilidad del modelo para reproducir el valor más alto de la simulación, así como comparar el tiempo de los valores máximos de las simulaciones y observaciones (EPA, 1992).</p>	

4.1.3. *Contrastación de hipótesis*

Para la contrastación de la hipótesis nula: No existe correlación entre el material particulado y las variables meteorológicas medidas y simuladas usando el modelo WRF-CHEM en Lima metropolitana en febrero del 2018; se utilizará el Coeficiente de Correlación de Pearson con un nivel de confianza de 99%.

4.2. IMPLEMENTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Para la ejecución de la presente tesis se realizó la compra de un servidor para la correcta instalación del programa de WRF-CHEM, el cual se encuentra de manera gratuita en el siguiente enlace:

https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/tutorial_presentation_summer_2019.htm

Posteriormente a la instalación del programa se realizó la corrida de este modelo.

4.2.1. *Pruebas estadísticas*

Las pruebas estadísticas que se usaron para la implementación de la tesis y la verificación de la correcta simulación realizada por el modelo WRF-CHEM de las variables meteorológicas (temperatura, velocidad del viento y humedad relativa) y del material particulado (PM10 y PM2.5) son las siguientes:

- Promedio Sesgo (BIAS)
- Promedio Error Gross (ERROR)
- Promedio Sesgo Normalizado (NMB)
- Error Normalizado Gross (MNGE)
- Razón de los promedios (RATIO)
- Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)
- Índice de Concordancia (IAO)

Y por último se hizo uso del Coeficiente de Correlación de Pearson, para determinar la correlación entre el material particulado y las variables meteorológicas.

4.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

4.3.1 Población

- 10 estaciones de calidad del aire de SENAMHI-Lima

4.3.2 Muestra

- 07 estaciones de calidad de aire de SENAMHI-Lima, los cuales son: PPD, SJL, CRB, SBJ, CDM, ATE y HCH.

4.4. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

- a. Revisión Bibliográfica, búsqueda a través de la web antecedentes de investigaciones relacionadas con la presente tesis.
- b. Las técnicas de la recolección de datos se realizaron mediante los informes de monitoreos que son emitidos por el SENAMHI, los cuales utilizan una estación meteorológica automática (EMA) los cuales están compuestos por un anemómetro (instrumento que mide velocidad y dirección del viento), termómetro, hidrógrafo (mide la humedad atmosférica) y barógrafo (mide presión atmosférica). El SENAMHI utiliza el equipo TEOM (Tanered Element Oscillating Microbalance) para medir el PM10, el cual recolecta una cantidad de masa de la muestra con una velocidad casi continua. Por otro lado, la frecuencia de oscilación cambia en una relación directa a la masa medida que se va acumulando en el filtro del equipo. (INEC,2020). Para la medición de las partículas de PM2.5 se hace uso del equipo Monitor de Atenuación de Rayos Beta reportan resultados en tiempo real, determina la concentración de partículas por medio de la medición de la cantidad de rayos beta después de que estos son atenuados por el material particulado fino el cual pasa por una cinta (Thermo, 2018).

c. Control de calidad es el sistema general de las actividades técnicas que miden los atributos y desempeños de un proceso, artículo o servicio respecto a estándares definidos, con el objetivo de verificar que se encuentren dentro de los requisitos establecidos por el usuario. Se desarrolla para asegurar que la incertidumbre de las mediciones se mantenga dentro de los criterios de aceptación (USEPA, 2017). Para lo cual se realizó los siguientes controles de calidad de serie de datos:

- Para una misma estación de calidad de aire y periodo de monitoreo, la relación geométrica del PM_{2.5} y PM₁₀ debe ser siempre menor o igual a 1.
- Las concentraciones de partículas PM₁₀, PM_{2.5} y las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) deberán ser consistentes en el tiempo (horas y días).
- Se requiere que el intervalo diario de captura de datos sea de por lo menos entre 75-80% de datos horarios y que la pérdida de datos este distribuida, en lo posible, a lo largo de todo el día de 24 horas.

4.5. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Para la presente investigación se realizó la obtención de datos de las estaciones meteorológicas automáticas (EMA), a continuación, se detallan los instrumentos que se usaron para realizar las mediciones de las variables meteorológicas y el material particulado (PM10 y PM2.5):

- Variables Meteorológicas (velocidad del viento, humedad relativa y temperatura): las mediciones se realizan cada hora, se encuentra a una altura de un metro; el equipo que se utiliza es VAISALA el cual es un instrumento automático. El equipo VAISALA cumple con los requisitos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) sobre validación de datos (SENAMHI, 2021).
- Material Particulado (PM0 Y PM2.5): las mediciones se realizan en forma horaria, el método es automático y la técnica que se usó para la medición fue la atenuación de rayos beta monitor 5014i de marca THERMO SCIENTIFIC. Este equipo tiene dos canales de muestras separados, este modelo avanza de manera automática; las mediciones que realiza el equipo son de forma continua y en tiempo real, sin saltos en la información.

V. RESULTADOS

5.1 DETERMINAR LA CORRELACIÓN ENTRE EL MATERIAL PARTICULAR Y LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS UTILIZANDO EL MODELO WRF-CHEM EN LIMA METROPOLITANA EN EL MES DE FEBRERO DEL 2018

Se realizó el análisis de correlación de Pearson con el Programa Estadístico SPSS a continuación se presentan los resultados obtenidos por cada estación de la calidad del aire del SENAMHI:

5.1.1 Estación de calidad del aire de Ate

En la tabla 9, se observa que la concentración promedio del PM10 simulado es de $40.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con una tendencia a variar por debajo o por encima de dicha concentración en $33.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el PM10 observado el promedio es de $107.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual tiene una tendencia a variar por encima o debajo en $\pm 61.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El promedio de PM2.5 simulado es $31.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y posee una predisposición a variar por encima o debajo de dicho valor en $\pm 27.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el promedio de PM2.5 observado es $33.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la desviación estándar es de $18.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

El promedio de la temperatura del aire simulada es de $24.2 \text{ }^\circ\text{C}$ y tiene la tendencia a variar entre $\pm 1.8 \text{ }^\circ\text{C}$, con respecto a la media, el promedio para la temperatura observada del aire es $24.1 \text{ }^\circ\text{C}$ y tiene una tendencia a variar entre $\pm 2.2 \text{ }^\circ\text{C}$, respecto a la media. Para la humedad relativa simulada el promedio es de $72.3 \text{ }^\circ\text{C}$ tiene la tendencia a variar $\pm 9.62\%$, respecto a la media. Para la humedad relativa observada el promedio es de 70.6% y varía por encima o por debajo de dicho valor en 10.80% .

El promedio de los valores de la velocidad del viento simulada es de 3.9 m/s , y podría variar por encima o por debajo de dicho valor en 1.82 m/s y el promedio para la velocidad del viento observada es de 1.2 m/s y poseería una predisposición a obtener valores por encima o por debajo de dicho valor en 0.64 m/s .

Tabla 9

Valores mínimo, máximo, media y desviación estándar de partículas y variables meteorológicas en la Estación de calidad de aire de Ate

Estadísticos descriptivos					
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
PM10pre	672	10.4786	173.3340	40.515430	33.8457541
PM10obs	603	35.35	686.2	107.894113	61.1256944
PM2.5pre	672	7.37543	142.84700	31.6743296	27.74169325
PM2.5obs	605	5.29200	159.70000	33.0902120	18.34765094
Tpre	672	20.6877	27.7476	24.153562	1.8712018
Tobs	376	19.88	29.14	24.1037	2.22420
Hrpre	672	52.5793	91.1756	72.3720537	9.62096033
Hrobs	376	46.94	93.30	70.5833	10.80228
Velpre	672	0.135077037	7.44133945	3.85207222	1.82344755
Velobs	376	0.07	2.99	1.1906	0.63699
N válido (por lista)	374	0	0	0	0

En la tabla 10, se presentan las correlaciones que poseen el material particulado (PM10 Y PM2.5) simulado y observados con las variables meteorológicas observadas y simuladas.

Para el material particulado **PM10 simulado**, posee una correlación positiva con PM2.5 observada (correlación de 0.524 con el valor de $p < 0.01$), es decir que cuando el valor de PM10 simulado aumenta el valor de PM2.5 observada se comporta de la misma manera. La humedad relativa simulada y observada también posee una correlación directa con el valor simulado de PM10 simulado con una correlación de 0.449 y 0.393 respectivamente para ambos el valor de $p < 0.01$.

Para PM10 simulado se correlaciona con temperatura simulada y observada -0.463, -0.373 respectivamente con significancia de $p < 0.01$. PM10 simulado se correlaciona con velocidad del viento simulado y observada de -0.777, -0.360 respectivamente, ambos con significancia

de $p < 0.01$; en ambos casos se relacionan de manera inversa, es decir que si una variable aumenta la otra disminuye.

Para el material particulado **PM10 observado**, posee una correlación positiva entre la concentración de PM2.5 simulada y PM2.5 observada con correlación de 0.528, 0.794 respectivamente para ambos con $p < 0.01$. En cuanto la correlación entre el PM10 observada y la humedad relativa simulada también comparte una correlación positiva de 0.218 con $p < 0.01$ (Tabla 13).

Para **PM2.5 simulado**, tiene una correlación positiva con PM2.5 observada de 0.526 con $p < 0.01$. PM2.5 simulado tiene una correlación negativa con temperatura simulada y temperatura observada de -0.468, -0.380 respectivamente para ambos con $p < 0.01$. PM2.5 simulado tiene correlación positiva con humedad relativa simulada y humedad relativa observada de 0.455, 0.400 respectivamente para ambos $p < 0.01$. La correlación entre la velocidad simulada y la velocidad observada tiene una correlación negativa con un PM2.5 simulada de -0.771 y -0.365 respectivamente para ambos $p < 0.01$.

Para el **PM2.5 observados**, tiene correlación negativa con temperatura simulada y temperatura observada de -0.195, -0.103 respectivamente con $p < 0.01$, $p < 0.05$ respectivamente. Para la humedad relativa simulada y humedad relativa observada poseen una correlación positiva con PM2.5 observado de 0.173 y 0.161 respectivamente para ambos con $p < 0.01$. Para la velocidad del viento simulada y velocidad del viento observada, también poseen una correlación negativa con PM2.5 observado de -0.391 y -0.239 respectivamente; para ambos con un $p < 0.01$.

Tabla 10

Correlación de Pearson entre las variables meteorológicas y partículas (PM10 y PM2.5) para la estación de calidad de aire de Ate

		Correlaciones									
		PM10pre	PM10obs	PM2.5pre	PM2.5obs	Tpre	Tobs	Hrpre	Hrobs	Velpre	Velobs
PM10pre	Correlación de Pearson	1	,524**	1,000**	,521**	-,463**	-,373**	,449**	,393**	-,777**	-,360**
	Sig. (bilateral)		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	603	672	605	672	376	672	376	672	376
PM10obs	Correlación de Pearson	,524**	1	,528**	,794**	-,237**	-0.069	,218**	0.095	-,417**	-,272**
	Sig. (bilateral)	0.000		0.000	0.000	0.000	0.180	0.000	0.066	0.000	0.000
	N	603	603	603	603	603	374	603	374	603	374
PM2.5pre	Correlación de Pearson	1,000**	,528**	1	,526**	-,468**	-,380**	,455**	,400**	-,771**	-,365**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	603	672	605	672	376	672	376	672	376
PM2.5obs	Correlación de Pearson	,521**	,794**	,526**	1	-,195**	-,103*	,173**	,161**	-,391**	-,239**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000		0.000	0.046	0.000	0.002	0.000	0.000
	N	605	603	605	605	605	375	605	375	605	375
Tpre	Correlación de Pearson	-,463**	-,237**	-,468**	-,195**	1	,899**	-,964**	-,782**	,575**	,711**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	603	672	605	672	376	672	376	672	376
Tobs	Correlación de Pearson	-,373**	-0.069	-,380**	-,103*	,899**	1	-,893**	-,934**	,511**	,663**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.180	0.000	0.046	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000
	N	376	374	376	375	376	376	376	376	376	376
Hrpre	Correlación de Pearson	,449**	,218**	,455**	,173**	-,964**	-,893**	1	,824**	-,547**	-,724**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000
	N	672	603	672	605	672	376	672	376	672	376
Hrobs	Correlación de Pearson	,393**	0.095	,400**	,161**	-,782**	-,934**	,824**	1	-,550**	-,623**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.066	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000
	N	376	374	376	375	376	376	376	376	376	376
Velpre	Correlación de Pearson	-,777**	-,417**	-,771**	-,391**	,575**	,511**	-,547**	-,550**	1	,518**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000
	N	672	603	672	605	672	376	672	376	672	376
Velobs	Correlación de Pearson	-,360**	-,272**	-,365**	-,239**	,711**	,663**	-,724**	-,623**	,518**	1
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	N	376	374	376	375	376	376	376	376	376	376

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

5.1.2 Estación de calidad del aire de Campo de Marte

En la tabla 11, se observa que la concentración promedio del PM10 simulado es de 34.27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con una tendencia a variar por debajo o por encima de dicha concentración en 21.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el PM10 observado el promedio es de 25.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual tiene una tendencia a variar por encima o debajo en $\pm 11.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El promedio de PM2.5 simulado es 25.69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el cual posee una predisposición a variar por encima o debajo de dicho valor en $\pm 17.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el PM2.5 observado la media tiene un valor de 13.66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ varía entre $\pm 4.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con respecto a la media.

El promedio para la temperatura del aire simulada es de 24.25 °C y tiene la tendencia a variar entre ± 1.67 °C, con respecto a la media, para la temperatura observada el promedio 22.08 °C tendrá una tendencia a variar entre ± 1.86 °C, respecto a la media. Para la humedad relativa simulada el promedio tiene el valor de 74.45% y tiene la tendencia a variar $\pm 8.6\%$, respecto a la media. Para la humedad relativa observada el promedio es de 79.97% y tiene a variar por encima o por debajo de dicho valor en 8.7%. Para los valores de la velocidad del viento simulada, el promedio 3.97 m/s podría variar por encima o por debajo de dicho valor en 1.11 m/s y para la velocidad del viento observada el valor es de 2.54 m/s, el promedio tiene una predisposición a obtener valores por encima o por debajo de dicho valor en 1.2 m/s.

Tabla 11

Valores mínimo, máximo, media y desviación estándar de partículas y variables meteorológicas en la Estación de Calidad de Aire de Campo de Marte

Estadísticos descriptivos					
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
PM10pre	672	9.84709	116.94500	34.2719680	21.13622941
PM10obs	439	6.5	90.3	25.01139408	11.27262676
PM2.5pre	672	6.59493	94.86060	25.6927430	17.01084697
PM2.5obs	439	5.1	29.9	13.666	4.2592
Tpre	672	20.8303	27.4704	24.255122	1.6684948
Tobs	641	19.0	29.4	22.804	1.8569
Hrpre	672	56.8475	89.2111	74.451091	8.6312233
Hrobs	641	53.0	96.0	79.967	8.7673
Velpre	672	0.34378531	6.031491127	3.979244219	1.107002665
Velobs	641	0.0	6.5	2.548	1.2953
N válido (por lista)	419	0	0	0	0

En la tabla 12, se presentan las correlaciones que poseen el material particulado (PM10 Y PM2.5) simulado y observados con las variables meteorológicas observadas y simuladas en la estación de calidad del aire de Campo de Marte.

Para el material particulado **PM10 simulado**, posee una correlación positiva con PM2.5 observado (correlación de 0.258 y con un valor de $p < 0.01$), es decir que cuando el valor de PM10 aumenta el valor de PM2.5 se comporta de la misma manera. La humedad relativa simulada y observada también poseen una correlación positiva de 0.644 y 0.626 respectivamente y ambas con $p < 0.01$ para PM10 simulado

do, mientras que con la temperatura simulada y observada la correlación que mantiene indirecta y negativa con un valor de -0.594 y -0.654 respectivamente, ambas con un valor de $p < 0.01$, es decir cuando la temperatura aumente de valor, el dato que se registrará de PM10 será menor.

Para la velocidad del viento simulados y observados, poseen una correlación inversa con un valor de -0.857 y -0.632 respectivamente y para ambos casos el valor de $p < 0.01$; es decir que cuando la temperatura y la velocidad del viento aumenta el valor que se obtiene del PM10 disminuye y cuando la variable meteorológica disminuya la concentración del PM10 aumenta. Para el material particulado **PM10 observado**, posee una relación significativa positiva entre la concentración de PM2.5 observado el cual el valor de correlación es de $0.620 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y con $p < 0.01$. Mientras que para el PM2.5 simulado no posee una relación significativa. Para la variable meteorológica de la temperatura simulada y la observada poseen una correlación positiva con valores de 0.125 y 0.313 respectivamente, con un $p < 0.01$ para ambos casos. Para la humedad relativa simulada y observada poseen una correlación con valor de -0.189 y -0.380 respectivamente con un valor de $p < 0.01$, para ambos casos; es decir la correlación es negativa y significativa.

En cuanto a **PM2.5 simulado**, con PM2.5 observado su correlación es positiva y tiene el valor de 0.279 con $p < 0.01$. Para la temperatura simulada y observada poseen una correlación indirecta y negativa sus valores son de -0.576 y -0.641 con $p < 0.01$. La humedad relativa simulada y observada tiene una correlación positiva con un valor de 0.628 y 0.617 con un $p < 0.01$. Para la velocidad del viento simulada y observada la correlación tiene un valor de -0.863 y -0.618 con $p < 0.01$; es decir, que poseen una relación negativa y significativa.

Para el **PM2.5 observados**, posee una correlación directa, positiva y significativa con PM10 simulada y observada, con valor de 0.285 y 0.620 respectivamente con un valor de $p < 0.01$. Para la temperatura del aire simulada y observada, la correlación es negativa, indirecta y significativa posee un valor de -0.354 y -0.268 respectivamente con un valor de $p < 0.01$, para ambos casos. Para la humedad relativa simulada y observada la relación es positiva y significativa, el valor es 0.369 y 0.249 respectivamente con $p < 0.01$, para ambos casos. Y la velocidad del viento simulada y observada es negativa, indirecta y significativa el valor de correlación es de -0.271 y -0.377 respectivamente con $p < 0.01$, para ambos casos.

Tabla 12

Correlación de Pearson entre las variables meteorológicas y partículas (PM10 y PM2.5) para la estación de calidad de aire de Campo de Marte

		Correlaciones									
		PM10pre	PM10obs	PM2.5pre	PM2.5obs	Tpre	Tobs	Hrpre	Hrobs	Velpre	Velobs
PM10pre	Correlación de Pearson	1	-0.086	,999**	,285**	-,594**	-,654**	,644**	,626**	-,857**	-,632**
	Sig. (bilateral)		0.072	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	439	672	439	672	641	672	641	672	641
PM10obs	Correlación de Pearson	-0.086	1	-0.082	,620**	,125**	,313**	-,189**	-,380**	-0.043	0.073
	Sig. (bilateral)	0.072		0.085	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.368	0.136
	N	439	439	439	439	439	419	439	419	439	419
PM2.5pre	Correlación de Pearson	,999**	-0.082	1	,279**	-,576**	-,641**	,628**	,617**	-,863**	-,618**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.085		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	439	672	439	672	641	672	641	672	641
PM2.5obs	Correlación de Pearson	,285**	,620**	,279**	1	-,354**	-,268**	,369**	,249**	-,271**	-,377**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	439	439	439	439	439	419	439	419	439	419
Tpre	Correlación de Pearson	-,594**	,125**	-,576**	-,354**	1	,758**	-,951**	-,620**	,321**	,634**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.009	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	439	672	439	672	641	672	641	672	641
Tobs	Correlación de Pearson	-,654**	,313**	-,641**	-,268**	,758**	1	-,778**	-,927**	,464**	,646**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000
	N	641	419	641	419	641	641	641	641	641	641
Hrpre	Correlación de Pearson	,644**	-,189**	,628**	,369**	-,951**	-,778**	1	,723**	-,376**	-,696**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000
	N	672	439	672	439	672	641	672	641	672	641
Hrobs	Correlación de Pearson	,626**	-,380**	,617**	,249**	-,620**	-,927**	,723**	1	-,480**	-,615**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000
	N	641	419	641	419	641	641	641	641	641	641
Velpre	Correlación de Pearson	-,857**	-0.043	-,863**	-,271**	,321**	,464**	-,376**	-,480**	1	,522**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.368	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000
	N	672	439	672	439	672	641	672	641	672	641
Velobs	Correlación de Pearson	-,632**	0.073	-,618**	-,377**	,634**	,646**	-,696**	-,615**	,522**	1
	Sig. (bilateral)	0.000	0.136	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	N	641	419	641	419	641	641	641	641	641	641

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

5.1.3 Estación de calidad del aire de Carabayllo

En la tabla 13, se observa que la concentración promedio del PM10 simulado es de 63.72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y varía por debajo o por encima de dicha concentración media en 36.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el PM10 observado el promedio es de 57.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual varía por encima o debajo en $\pm 25.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El promedio de PM2.5 simulado tiene el valor de 50.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y tiende a variar por encima o debajo de dicho valor en $\pm 29.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la media de PM2.5 observado tiene un valor de 34.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y varía entre $\pm 22.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con respecto a la media.

El promedio para la temperatura simulada es de 24.27 °C y varía entre $\pm 1.95^\circ\text{C}$, con respecto a la media, para la temperatura observada el promedio es de 24.62 °C tiende a variar entre $\pm 2.2^\circ\text{C}$, respecto a la media. Para la humedad relativa simulada el promedio es de 71.84% tiene la tendencia a variar $\pm 10.12\%$, respecto a la media. Para la humedad relativa observada el promedio es de 68.57% y varía por encima o por debajo de dicho valor en 9.86%.

Para la velocidad del viento simulada el promedio es de 3.58 m/s y con la tendencia de variar ± 2.00 m/s, el promedio de la velocidad observada es de 1.272 m/s y tiene una tendencia a variar entre ± 1.07 m/s.

Tabla 13

Valores mínimo, máximo, media y desviación estándar de partículas y variables meteorológicas en la Estación de Calidad de aire de Carabayllo

Estadísticos descriptivos					
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
PM10pre	672	18.3996	154.8110	63.733312	36.0322624
PM10obs	632	8.22	175	57.57642801	25.37880095
PM2.5pre	672	12.7799	128.2690	50.016136	29.8222237
PM2.5obs	308	3.1	131.6	34.614	22.2402
Tpre	672	20.4727	28.0621	24.271077	1.9493930
Tobs	405	20.26	29.66	24.6221	2.18946
Hrpre	672	52.3661	92.1936	71.836048	10.1211714
Hrobs	405	47.08	90.30	68.5776	9.86583
Velpre	672	0.039851335	7.624889006	3.587446945	2.007356939
Velobs	406	0.07	6.72	1.7274	1.07087
N válido (por lista)	102	0	0	0	0

En la tabla 14, se presentan las relaciones que poseen el material particulado (PM10 Y PM2.5) simulado y observados con las variables meteorológicas observadas y simuladas.

Para el material particulado **PM10 simulado**, posee una relación negativa y no significativa con PM2.5 observado dando como resultado el valor de correlación de 0.001. La temperatura simulada y observada poseen una relación negativa, indirecta y significativa; -0.834 y -0.776 respectivamente con un $p < 0.01$. La humedad relativa simulada y observada posee una relación positiva y significativa, los valores son 0.829 y 0.755 respectivamente con un valor de $p < 0.01$ para ambos casos. La velocidad del viento simulada y observada posee una relación negativa, inversa y significativa con valores de -0.915 y -0.683 con un $p < 0.01$.

Para el material particulado **PM10 observado**, posee una relación significativa y positiva entre la concentración de PM2.5 observada, la correlación tiene valor de 0.776 con $p < 0.01$. La temperatura simulada y observada posee una relación positiva y significativa; el valor de

la correlación es de 0.331 y 0.445 respectivamente con un valor de $p < 0.01$, para ambos casos. La humedad relativa simulada y observada poseen una relación negativa y significativa con valor de -0.335 y -0.294 respectivamente, con un valor de $p < 0.01$, para ambos casos.

La velocidad del viento simulado y observado, posee una correlación de 0.079 y 0.281, respectivamente con significancia de $p < 0.05$ y $p < 0.01$, respectivamente.

En cuanto a **PM2.5 simulado**, la temperatura simulada y la observada se relacionan con PM2.5 de manera negativa y significativa, el valor de la correlación es de -0.828 y -0.765 respectivamente con un valor de $p < 0.01$, para ambos casos. En cuanto a la humedad relativa simulada y observada posee una relación positiva y significativa, el valor de la correlación es 0.824 y 0.748 respectivamente. Cabe precisar que todas las variables se relacionan de manera significativa, es decir que el valor de $p < 0.01$.

La velocidad del viento simulado y observado se relaciona de manera negativa y significativa; el valor de la correlación es de -0.915 y -0.676 con $p < 0.01$.

Para el **PM2.5 observados**, posee una relación positiva y significativa con temperatura observada con un valor de $p < 0.01$; es decir que cuando la concentración de PM2.5 aumenta el valor de la temperatura aumenta. La humedad relativa simulada y observada, se relacionan de manera negativa y no significativa, el valor de la correlación es 0.369 y 0.249 respectivamente.

La velocidad del viento simulado y observada no poseen significancia con PM2.5.

Tabla 14

Correlación de Pearson entre las variables meteorológicas y partículas (PM10 y PM2.5) para la estación de calidad de aire de Carabayllo

		Correlaciones									
		PM10pre	PM10obs	PM2.5pre	PM2.5obs	Tpre	Tobs	Hrpre	Hrobs	Velpre	Velobs
PM10pre	Correlación de Pearson	1	-,201**	,999**	-0.001	-,834**	-,776**	,829**	,755**	-,915**	-,683**
	Sig. (bilateral)		0.000	0.000	0.983	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	632	672	308	672	405	672	405	672	406
PM10obs	Correlación de Pearson	-,201**	1	-,190**	,776**	,331**	,445**	-,335**	-,294**	,079*	,281**
	Sig. (bilateral)	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.046	0.000
	N	632	632	632	308	632	377	632	377	632	378
PM2.5pre	Correlación de Pearson	,999**	-,190**	1	0.011	-,828**	-,765**	,824**	,748**	-,915**	-,676**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000		0.843	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	632	672	308	672	405	672	405	672	406
PM2.5obs	Correlación de Pearson	-0.001	,776**	0.011	1	0.083	,394**	-0.075	-0.187	-0.107	0.109
	Sig. (bilateral)	0.983	0.000	0.843		0.148	0.000	0.187	0.060	0.061	0.276
	N	308	308	308	308	308	102	308	102	308	102
Tpre	Correlación de Pearson	-,834**	,331**	-,828**	0.083	1	,875**	-,969**	-,762**	,737**	,714**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.148		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	632	672	308	672	405	672	405	672	406
Tobs	Correlación de Pearson	-,776**	,445**	-,765**	,394**	,875**	1	-,863**	-,884**	,681**	,755**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000
	N	405	377	405	102	405	405	405	405	405	405
Hrpre	Correlación de Pearson	,829**	-,335**	,824**	-0.075	-,969**	-,863**	1	,781**	-,722**	-,707**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.187	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000
	N	672	632	672	308	672	405	672	405	672	406
Hrobs	Correlación de Pearson	,755**	-,294**	,748**	-0.187	-,762**	-,884**	,781**	1	-,727**	-,710**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.060	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000
	N	405	377	405	102	405	405	405	405	405	405
Velpre	Correlación de Pearson	-,915**	,079*	-,915**	-0.107	,737**	,681**	-,722**	-,727**	1	,633**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.046	0.000	0.061	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000
	N	672	632	672	308	672	405	672	405	672	406
Velobs	Correlación de Pearson	-,683**	,281**	-,676**	0.109	,714**	,755**	-,707**	-,710**	,633**	1
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.276	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	N	406	378	406	102	406	405	406	405	406	406

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

5.1.4 Estación de calidad del aire de Huachipa

En la tabla 15, se observa que la concentración promedio del PM10 simulado es de 40.52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con una tendencia a variar por debajo o por encima de dicha concentración en 33.85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el PM10 observado el promedio es de 83.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, varía por encima o debajo en $\pm 38.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El promedio de PM2.5 simulado es de 31.67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y varía por encima o debajo de dicho valor en $\pm 27.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

El promedio para la temperatura simulada es de 24.15 °C, tiende a variar entre $\pm 1.8^\circ\text{C}$, con respecto a la media, para la temperatura observada el promedio tiene un valor de 23.95 °C y varía entre $\pm 2.1^\circ\text{C}$, respecto a la media. Para la humedad relativa simulada el promedio tiene un valor de 73.37% y varía $\pm 9.62\%$, respecto a la media. Para la humedad relativa observada el promedio es 70.73% varía por encima o por debajo de dicho valor en 10.68%.

Para los valores de la velocidad del viento simulada, el promedio es de 3.85 m/s varía por encima o por debajo de dicho valor en 1.82 m/s y para la velocidad del viento observada, el promedio tiene el valor de 2.11 m/s varía por encima o por debajo de dicho valor en 1.22 m/s.

Tabla 15

Valores mínimo, máximo, media y desviación estándar de partículas y variables meteorológicas en la Estación de Calidad de Aire de Huachipa

Estadísticos descriptivos					
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
PM10pre	672	10.4786	173.3340	40.515430	33.8457541
PM10obs	371	14.45	350.4	83.89263477	38.4592263
PM2.5pre	672	7.37543	142.84700	31.6743296	27.74169325
PM2.5obs	0				
Tpre	672	20.6877	27.7476	24.153562	1.8712018
Tobs	432	20.00	28.41	23.9556	2.10957
Hrpre	672	52.5793	91.1756	72.372054	9.6209603
Hrobs	431	46.18	90.70	70.7342	10.68373
Velpre	672	0.135077037	7.441339446	3.852072222	1.823447551
Velobs	430	0.06	5.24	2.1138	1.22496
N válido (por lista)	0				

En la tabla 16, se presentan las relaciones que poseen el material particulado (PM10 y PM2.5) simulado y observados con las variables meteorológicas observadas y simuladas.

Para el material particulado **PM10 simulado**, posee una relación positiva y significativa con PM10 observado de valor 0.367 con $p < 0.01$. Para la temperatura simulada y la observada poseen un valor de correlación de -0.463 y -0.268 respectivamente, con $p < 0.01$; cabe agregar que la relación que guardan es negativa y significativas. La humedad relativa simulada y observada tienen un valor de 0.449 y 0.413, respectivamente; y tiene una relación positiva y significativa ($p < 0.01$), para ambos casos.

La velocidad del viento simulada y observada, poseen una relación negativa y significativa; el valor de las correlaciones es de -0.777 y -0.490 respectivamente.

Para el material particulado **PM10 observado**, tiene una relación positiva y significativa con valor de 0.367 con PM10 observado. La relación que existe entre el PM2.5 simulado es positiva y significativa el cual el valor es de 0.371.

Para la temperatura del aire simulado es negativo y significativo, el cual el valor es de -0.183, para la temperatura observada la relación no es significativa. En caso de la humedad relativa simulada, la relación es positiva y significativa que tiene el valor de 0.152. La velocidad del viento simulado y observado tiene una relación negativa y significativa que tiene el valor de -0.321 y -0.261 respectivamente.

En cuanto a **PM2.5 simulado**, tiene una relación positiva y significativa con PM10 observada el cual tiene un valor de 0.371. Para la temperatura simulada y observada tiene una relación negativa y significativa el valor es -0.468 y -0.268.

Para la humedad relativa simulada y observada posee una relación positiva y significativa su valor es de 0.455 y 0.414. Para la velocidad simulada y la observada la relación que existe es negativa y significativa el valor es -0.771 y -0.492 respectivamente.

Cabe recalcar que para todos los casos el valor de p, es $p < 0.01$ el cual determina que la significancia es buena.

Tabla 16

Correlación de Pearson entre las variables meteorológicas y partículas (PM10 y PM2.5) para la estación de calidad de aire de Huachipa

		PM10pre	PM10obs	PM2.5pre	Tpre	Tobs	Hrpre	Hrobs	Velpre	Velobs
PM10pre	Correlación de Pearson	1	,367**	1,000**	-,463**	-,268**	,449**	,413**	-,777**	-,490**
	Sig. (bilateral)		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	371	672	672	432	672	431	672	430
PM10obs	Correlación de Pearson	,367**	1	,371**	-,183**	0.074	,152**	0.066	-,321**	-,261**
	Sig. (bilateral)	0.000		0.000	0.000	0.158	0.003	0.209	0.000	0.000
	N	371	371	371	371	368	371	368	371	368
PM2.5pre	Correlación de Pearson	1,000**	,371**	1	-,468**	-,268**	,455**	,414**	-,771**	-,492**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	371	672	672	432	672	431	672	430
Tpre	Correlación de Pearson	-,463**	-,183**	-,468**	1	,823**	-,964**	-,833**	,575**	,836**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	371	672	672	432	672	431	672	430
Tobs	Correlación de Pearson	-,268**	0.074	-,268**	,823**	1	-,826**	-,826**	,463**	,683**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.158	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000
	N	432	368	432	432	432	432	431	432	430
Hrpre	Correlación de Pearson	,449**	,152**	,455**	-,964**	-,826**	1	,858**	-,547**	-,812**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000
	N	672	371	672	672	432	672	431	672	430
Hrobs	Correlación de Pearson	,413**	0.066	,414**	-,833**	-,826**	,858**	1	-,621**	-,757**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.209	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000
	N	431	368	431	431	431	431	431	431	430
Velpre	Correlación de Pearson	-,777**	-,321**	-,771**	,575**	,463**	-,547**	-,621**	1	,665**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000
	N	672	371	672	672	432	672	431	672	430
Velobs	Correlación de Pearson	-,490**	-,261**	-,492**	,836**	,683**	-,812**	-,757**	,665**	1
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	N	430	368	430	430	430	430	430	430	430

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

5.1.5 Estación de calidad del aire de Puente Piedra

En la tabla 17, se observa que la concentración promedio del PM10 simulado es de 50.28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y varía por debajo o por encima de dicha concentración en 33.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el PM10 observado el promedio es de 110.91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual tiene a variar por encima o debajo en $\pm 47.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El promedio de PM2.5 simulado tiene el valor de 46.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y varía por encima o debajo de dicho valor en $\pm 27.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para la concentración de PM2.5 observada el promedio tiene el valor de 32.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tiene a variar entre $\pm 15.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respecto a la media.

El promedio para la temperatura simulada tiene un valor de 24.05 °C y tendrá la tendencia a variar entre ± 2.1 °C, con respecto a la media, para la temperatura observada el promedio tiene un 24.59 °C y tendrá una tendencia a variar entre ± 2.67 °C, respecto a la media. Para la humedad relativa simulada el promedio 72.37% tendrá la tendencia a variar $\pm 9.62\%$, respecto a la media. Para la humedad relativa observada el promedio que se obtuvo fue de 68.89 % podría variar por encima o por debajo de dicho valor en 11.16%.

Para la velocidad del viento simulada el promedio tiene un valor de 3.25 m/s y varía por encima o por debajo de dicho valor en 1.67 m/s y para la velocidad del viento observada, el promedio tiene un valor de 1.57 m/s y varía encima o por debajo de dicho valor en 0.99 m/s.

Tabla 17

Valores mínimo, máximo, media y desviación estándar de partículas y variables en la Estación de Calidad de aire de Puente Piedra

Estadísticos descriptivos					
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
PM10pre	672	13.6661	139.0250	59.281969	33.5466672
PM10obs	626	14.88	321.8	110.1917911	47.47947069
PM2.5pre	672	8.53555	113.63800	46.4209777	27.43011327
PM2.5obs	625	3.0	109.4	32.235	15.7742
Tpre	672	19.7313	28.3806	24.045754	2.1320953
Tobs	672	19.62	31.08	24.5937	2.66889
Hrpre	672	52.5793	91.1756	72.372054	9.6209603
Hrobs	663	41.44	90.30	68.8673	11.15718
Velpre	672	0.094430859	6.885469588	3.257993739	1.667175971
Velobs	663	0.05	4.76	1.5746	0.98611
N válido (por lista)	620				

En la tabla 18, se presentan las correlaciones que poseen el material particulado (PM10 Y PM2.5) simulado y observados con las variables meteorológicas observadas y simuladas.

Para el material particulado **PM10 simulado**, posee una correlación positiva y significativa con PM2.5 observado el cual tiene el valor de 0.130 y con $p < 0.01$, es decir que cuando el valor de PM10 aumenta el valor de PM2.5 se comporta de la misma manera. La temperatura simulada y observada poseen un valor de -0.842 y -0.348 respectivamente con $p < 0.01$ para ambos casos, es decir que la relación que guarda entre PM10 es negativa y significativa. La humedad relativa simulada y observada posee una relación positiva y significativa, el valor es de 0.819 y 0.786 respectivamente y ambos con un valor de $p < 0.01$.

Para la velocidad del viento simulados y observados, tienen como valor de -0.905 y -0.722 respectivamente poseen una correlación negativa y significativa; con el valor de $p < 0.01$.

Para el material particulado **PM10 observado**, la correlación que tiene con PM2.5 observado tiene un valor de 0.707, el cual es positivo y significativo y con $p < 0.01$. Para la temperatura simulada y observada tienen una correlación positiva y significativa ($p < 0.01$), el valor es 0.144 y 0.344 respectivamente. La humedad relativa simulada y observada posee una correlación negativa y significativa, el valor es de -0.129 y -0.0195; y el valor de $p < 0.01$ y $p < 0.05$ respectivamente.

Para la velocidad del viento simulada y observada posee una correlación negativa y significativa con valor de -0.079 y -0.102 respectivamente; ambos tienen el valor de $p < 0.05$.

En cuanto a **PM2.5 simulado**, se observa que para la temperatura simulada y observada posee una correlación negativa y significativa ($p < 0.01$); el valor de la correlación es de -0.837 y -0.332. Para la humedad relativa simulada y observada posee una correlación positiva y significativa ($p < 0.01$); el cual tiene como valor 0.813 y 0.782 respectivamente.

Para la velocidad del viento simulada y la observada se determina que tiene una correlación negativa y significativa ($p < 0.01$) el valor es de -0.906 y -0.716, respectivamente.

Para el **PM2.5 observados**, el parámetro de PM10 simulada y observado tiene una correlación positiva y significativa ($p < 0.01$); el valor es de 0.130 y 0.707, respectivamente. El PM2.5 simulado guarda una relación positiva y significativa ($p < 0.01$), el valor es 0.141. La temperatura observada, guarda correlación positiva, negativa y significativa ($p < 0.01$), el valor es 0.271.

La humedad relativa observada se correlaciona de manera positiva y significativa ($p < 0.01$) el cual el valor es de 0.112.

La velocidad del viento simulada y observada, tienen una correlación negativa y significativa ($p < 0.01$) el valor es de -0.218 y -0.129, respectivamente.

Tabla 18

Correlación de Pearson entre las variables meteorológicas y partículas (PM10 y PM2.5) para la estación de calidad de aire de Puente Piedra

		Correlaciones									
		PM10pre	PM10obs	PM2.5pre	PM2.5obs	Tpre	Tobs	Hrpre	Hrobs	Velpre	Velobs
PM10pre	Correlación de Pearson	1	-0.016	,999**	,130**	-,842**	-,348**	,819**	,786**	-,905**	-,722**
	Sig. (bilateral)		0.694	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	626	672	625	672	672	672	663	672	663
PM10obs	Correlación de Pearson	-0.016	1	-0.006	,707**	,144**	,344**	-,129**	-,095*	-,079*	-,102*
	Sig. (bilateral)	0.694		0.871	0.000	0.000	0.000	0.001	0.018	0.047	0.011
	N	626	626	626	625	626	626	626	621	626	621
PM2.5pre	Correlación de Pearson	,999**	-0.006	1	,141**	-,837**	-,332**	,813**	,782**	-,906**	-,716**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.871		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	626	672	625	672	672	672	663	672	663
PM2.5obs	Correlación de Pearson	,130**	,707**	,141**	1	0.061	,271**	-0.034	,112**	-,218**	-,129**
	Sig. (bilateral)	0.001	0.000	0.000		0.127	0.000	0.403	0.005	0.000	0.001
	N	625	625	625	625	625	625	625	620	625	620
Tpre	Correlación de Pearson	-,842**	,144**	-,837**	0.061	1	,476**	-,934**	-,784**	,801**	,722**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.127		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	626	672	625	672	672	672	663	672	663
Tobs	Correlación de Pearson	-,348**	,344**	-,332**	,271**	,476**	1	-,518**	-,420**	,261**	,360**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	626	672	625	672	672	672	663	672	663
Hrpre	Correlación de Pearson	,819**	-,129**	,813**	-0.034	-,934**	-,518**	1	,839**	-,724**	-,723**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.001	0.000	0.403	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000
	N	672	626	672	625	672	672	672	663	672	663
Hrobs	Correlación de Pearson	,786**	-,095*	,782**	,112**	-,784**	-,420**	,839**	1	-,748**	-,663**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.018	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000
	N	663	621	663	620	663	663	663	663	663	663
Velpre	Correlación de Pearson	-,905**	-,079*	-,906**	-,218**	,801**	,261**	-,724**	-,748**	1	,701**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.047	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000
	N	672	626	672	625	672	672	672	663	672	663
Velobs	Correlación de Pearson	-,722**	-,102*	-,716**	-,129**	,722**	,360**	-,723**	-,663**	,701**	1
	Sig. (bilateral)	0.000	0.011	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	N	663	621	663	620	663	663	663	663	663	663

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

5.1.6 Estación de calidad del aire de San Borja

En la tabla 19, se observa que la concentración promedio del PM10 simulado es de 35.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y varía por debajo o por encima de dicha concentración en 23.11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el PM10 observado el promedio es de 79.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, tiene a variar por encima o debajo en ± 29.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El promedio de PM2.5 simulado tiene valor de 26.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y varía por encima o debajo de dicho valor en ± 18.39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para la concentración de PM2.5 observada el promedio tiene un valor de 12.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ varía entre ± 5.77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respecto a la media.

El promedio para la temperatura simulada tiene un valor de 19.35 °C y tiene la tendencia a variar entre ± 0.59 °C, con respecto a la media, para la temperatura observada el promedio tiene 23.41 °C y varía entre ± 2.78 °C, respecto a la media.

Para la humedad relativa simulada el promedio tiene el valor de 78.72 % y tiene a variar $\pm 8.71\%$, respecto a la media. Para la humedad relativa observada el promedio tiene el valor de 81.42 % y varía por encima o por debajo de dicho valor en 12.35%.

Para los valores de la velocidad simulada, el promedio tiene el valor de 5.72 m/s y varía por encima o por debajo de dicho valor en 1.52 m/s y para la velocidad observada, el promedio tiene el valor de 1.2 m/s y varía por encima o por debajo de dicho valor en 0.72 m/s.

Tabla 19

Valores mínimos, máximos, media y desviación estándar de partículas y variables meteorológicas para la Estación de Calidad de Aire de San Borja

Estadísticos descriptivos					
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
PM10pre	672	11.9666	155.6970	35.451888	23.1143279
PM10obs	625	23.84	221.3	79.557898	29.22366977
PM2.5pre	672	8.05469	122.85400	26.2922408	18.38814077
PM2.5obs	584	3.031000	35.970000	12.58102816	5.773294936
Tpre	672	17.7698	21.1798	19.355693	0.5937195
Tobs	207	19.6	30.3	23.417	2.7805
Hrpre	672	60.5043	93.7077	78.727828	8.7140339
Hrobs	207	54.2	98.9	81.421	12.3504
Velpre	672	0.25094988	8.487260957	5.728157794	1.518244482
Velobs	207	0.0	3.2	1.218	0.7204
N válido (por lista)	139				

En la tabla 20, se presentan las relaciones que poseen el material particulado (PM10 Y PM2.5) simulado y observados con las variables meteorológicas observadas y simuladas.

Para el material particulado **PM10 simulado**, posee una relación negativa y significativa ($p < 0.01$) con PM2.5 observado, el valor de correlación es de -0.162, es decir que cuando el valor de PM10 aumenta el valor de PM2.5 disminuye. Para la temperatura simulada, se tiene una correlación positiva y significativa; el valor de la correlación es de 0.343 y para la temperatura observada, poseen una correlación negativa y significativa, el cual el valor es de -0.604; cabe recalcar que para todos los casos presentan un valor de significancia de $p < 0.01$.

La humedad relativa simulada y observada, manifiestan una relación positiva y significativa con valor de $p < 0.01$. El valor de la correlación es de 0.525 y 0.621 respectivamente, esta

relación se traduce de la siguiente manera en el que, si el valor del PM10 simulado aumenta, los valores de la humedad relativa simulada y observada también tendrán la tendencia a aumentar.

La velocidad del viento simulada y observada posee una relación inversa, es decir que, si el valor de la velocidad del viento aumenta, el valor de la concentración del PM10 disminuye, en adición la relación que guardan es negativa y significativa ($p < 0.01$); el valor de la correlación es -0.833 y -0.565 respectivamente.

Para el material particulado **PM10 observado**, posee una correlación significativa positiva y significativa ($p < 0.01$) entre la concentración de PM2.5 simulado y observado, el valor de la correlación es de 0.363 y 0.134 respectivamente.

Para la variable de temperatura del aire simulado, posee una relación positiva y significativa con $p < 0.01$, y con valor de correlación de 0.114; sin embargo, para la temperatura observada la correlación que se manifiesta es negativa, inversa y significativa con $p < 0.01$, el valor de la correlación es de -0.280.

Para la humedad relativa comparte una correlación positiva significativa.

Para la variable meteorológica de velocidad del viento simulada y observada manifiestan una relación negativa y significativa con $p < 0.01$, el valor de la correlación es de -0.424 y -0.345 respectivamente; estas relaciones se traducen de la siguiente manera, que, si el valor de PM10 aumenta, los valores de la velocidad del viento simulados y observados también tendrán a aumentar.

En cuanto a **PM2.5 simulado**, se observa que la correlación con la variable meteorológica de la temperatura simulada; es positiva y significativa con $p < 0.01$; el valor de la correlación es de 0.343; sin embargo, la correlación con la temperatura observada es negativa y significativa con el valor de $p < 0.01$; el valor de la correlación es de -0.591, esta correlación se explica de la siguiente manera; que si el valor de PM2.5 simulado aumenta el valor de la temperatura observada disminuye.

En cuanto a la humedad relativa simulada y observada, la correlación que tienen es positiva y significativa con valor de $p < 0.01$; el valor de la correlación es de 0.517 y 0.608 respectivamente; entonces se determina que si el valor de PM2.5 simulado aumenta, los valores de la humedad relativa simulada y observada también aumentarían.

La velocidad del viento simulado y observado se correlacionan de manera negativa y significativa con $p < 0.01$, el valor de la correlación es de -0.835 y -0.563 respectivamente, para este caso el comportamiento se realizará de la siguiente manera; si el valor de PM2.5 simulado aumenta los valores de la velocidad simulada y observada disminuirán.

Para el **PM2.5 observado**, posee una correlación negativa y significativa ($p < 0.01$) con temperatura simulada, el valor de la correlación es de -0.117; sucede todo lo contrario para la temperatura observada, el cual tiene una relación positiva y significativa ($p < 0.01$) en este caso el valor de la correlación es de 0.408. Para la humedad relativa simulada y observada, posee una correlación negativa, y significativa, el valor de la correlación es -0.273 y -0.409 respectivamente.

Para la velocidad de viento observada, se correlacionan de la siguiente manera positiva y significativa ($p < 0.01$) en donde el valor de la correlación es de 0.327, cabe recalcar para la velocidad del viento simulada no tiene significancia.

Las relaciones directas se interpretan de la siguiente manera, si el valor del PM2.5 observada aumenta los parámetros meteorológicos como: velocidad observada y temperatura observada también aumentarían, caso contrario sucede con las variables que poseen una relación inversa o negativa.

Tabla 20

Correlación de Pearson entre las variables meteorológicas y partículas (PM10 y PM2.5) para la estación de calidad de aire en San Borja

		Correlaciones									
		PM10pre	PM10obs	PM2.5pre	PM2.5obs	Tpre	Tobs	Hrpre	Hrobs	Velpre	Velobs
PM10pre	Correlación de Pearson	1	,360**	,999**	-,162**	,343**	-,604**	,525**	,621**	-,833**	-,565**
	Sig. (bilateral)		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	625	672	584	672	207	672	207	672	207
PM10obs	Correlación de Pearson	,360**	1	,363**	,134**	,114**	-,280**	0.025	,296**	-,424**	-,345**
	Sig. (bilateral)	0.000		0.000	0.002	0.004	0.000	0.539	0.000	0.000	0.000
	N	625	625	625	547	625	207	625	207	625	207
PM2.5pre	Correlación de Pearson	,999**	,363**	1	-,161**	,343**	-,591**	,517**	,608**	-,835**	-,563**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	625	672	584	672	207	672	207	672	207
PM2.5obs	Correlación de Pearson	-,162**	,134**	-,161**	1	-,117**	,408**	-,273**	-,409**	0.038	,327**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.002	0.000		0.004	0.000	0.000	0.000	0.356	0.000
	N	584	547	584	584	584	139	584	139	584	139
Tpre	Correlación de Pearson	,343**	,114**	,343**	-,117**	1	-,631**	,547**	,656**	-,264**	-,444**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.004	0.000	0.004		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	625	672	584	672	207	672	207	672	207
Tobs	Correlación de Pearson	-,604**	-,280**	-,591**	,408**	-,631**	1	-,855**	-,986**	,506**	,630**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000
	N	207	207	207	139	207	207	207	207	207	207
Hrpre	Correlación de Pearson	,525**	0.025	,517**	-,273**	,547**	-,855**	1	,853**	-,222**	-,548**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.539	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000
	N	672	625	672	584	672	207	672	207	672	207
Hrobs	Correlación de Pearson	,621**	,296**	,608**	-,409**	,656**	-,986**	,853**	1	-,525**	-,668**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000
	N	207	207	207	139	207	207	207	207	207	207
Velpre	Correlación de Pearson	-,833**	-,424**	-,835**	0.038	-,264**	,506**	-,222**	-,525**	1	,603**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.356	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000
	N	672	625	672	584	672	207	672	207	672	207
Velobs	Correlación de Pearson	-,565**	-,345**	-,563**	,327**	-,444**	,630**	-,548**	-,668**	,603**	1
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	N	207	207	207	139	207	207	207	207	207	207

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

5.1.6 Estación de calidad del aire de San Juan de Lurigancho

5.1.6 Estación de calidad del aire de San Juan de Lurigancho

En la tabla 21, se observa que la concentración promedio del PM10 simulado es de 52.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y varía por debajo o por encima de dicha concentración en 32.13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el PM10 observado el promedio es de 79.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual se encuentra variando por encima o debajo en $\pm 29.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El promedio de PM2.5 simulado es de 41.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el cual se encuentra variando por encima o debajo de dicho valor en $\pm 25.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para la concentración de PM2.5 observada el promedio y varía entre $\pm 11.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respecto a la media.

El promedio para la temperatura simulada es de 23.16 °C y tendrá la tendencia a variar entre $\pm 1.82 \text{ }^\circ\text{C}$, con respecto a la media, para la temperatura observada el promedio tiene un valor 24.78 °C y varía entre $\pm 2.27^\circ\text{C}$, respecto a la media. Para la humedad relativa simulada el promedio tiene el valor de 76.38% tiene a variar $\pm 9.94\%$, respecto a la media. Para la humedad relativa observada el promedio tiene el valor de 66.92% podría variar por encima o por debajo de dicho valor en 10.39%.

Para los valores de la velocidad simulada, el promedio tiene valor de 3.8 m/s y varía por encima o por debajo de dicho valor en 1.88 m/s y para la velocidad observada, el promedio tiene valor de 2.11 m/s los valores por encima o por debajo de dicho valor en 1.19 m/s.

Tabla 21

Variación máxima, mínima, media y desviación estándar de partículas y variables meteorológicas en la Estación de Calidad de aire de San Juan de Lurigancho

Estadísticos descriptivos					
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
PM10pre	672	16.3854	172.3160	52.968721	32.1274472
PM10obs	625	23.84	221.3	79.557898	29.22366977
PM2.5pre	672	11.6451	142.8630	41.072565	26.4786487
PM2.5obs	625	3.1	79.8	25.551	11.4759
Tpre	672	19.4925	26.8598	23.164381	1.8204502
Tobs	664	20.42	29.72	24.7817	2.26557
Hrpre	672	55.0998	95.1894	76.380688	9.9386710
Hrobs	664	44.44	89.30	66.9210	10.39557
Velpre	672	0.089325091	7.940886519	3.802436736	1.880290266
Velobs	664	0.08	4.89	2.1158	1.19826
N válido (por lista)	621				

En la tabla 22, se presentan las correlaciones que poseen el material particulado (PM10 Y PM2.5) simulado y observados con las variables meteorológicas observadas y simuladas.

Para el material particulado **PM10 simulado**, posee una correlación positiva y significativa ($p < 0.01$), con un valor de correlación de 0.373 con PM10 observado. La correlación que se manifiesta con PM2.5 observado es positiva y significativa ($p < 0.01$), el valor de la correlación es de 0.391; es decir que cuando el valor de PM10 aumenta el valor de PM2.5 se comporta de la misma manera. La temperatura simulada y la observada poseen una relación negativa y significativa ($p < 0.01$), el valor de la correlación es de -0.621 y -0.568, respectivamente.

La humedad relativa simulada y observada poseen una relación positiva y significativa ($p < 0.01$) el valor de la correlación es de 0.613 y 0.552 respectivamente; esta relación se

interpreta de la siguiente manera; si el valor de PM10 simulado aumenta el valor de la humedad relativa simulada y observada también aumentan.

La velocidad del viento simulada y observada poseen una relación negativa y significativa ($p < 0.01$), el valor de la correlación obtenida es de -0.869 y -0.663 respectivamente, la correlación que se obtuvo se interpreta; que, si el valor de la velocidad del viento o de temperatura aumenta, el valor de la concentración del PM10 disminuye.

Para el material particulado **PM10 observado**, posee una correlación significativa ($p < 0.01$), directa y positiva; con la concentración de PM2.5 simulado y observado, el valor de la correlación es de 0.377 y 0.754 respectivamente. La temperatura simulada, posee una relación negativa y significativa ($p < 0.01$) el valor de la correlación es de -0.094; cabe recalcar que no existe una relación significativa entre la temperatura observada y el valor de PM10 observado, de igual manera se manifiesta para la humedad relativa simulada; sin embargo, para la humedad observada presenta una significancia de $p < 0.05$ y el valor de la correlación es de 0.093.

Para la velocidad del viento simulada y observada la correlación que tiene es negativa y significativa ($p < 0.01$), el valor de la correlación es de -0.349 y -0.251 respectivamente.

En cuanto a **PM2.5 simulado**, se observa que la correlación que tiene con la temperatura del aire simulada y observada es negativa y significativa ($p < 0.01$) el valor de la correlación es de -0.612 y -0.558 respectivamente. Para la humedad relativa simulada y observada presenta una relación positiva y significativa ($p < 0.01$) el valor de la correlación es de 0.605 y 0.545.

La velocidad del viento simulada y observada, mantienen una correlación negativa y significativa ($p < 0.01$) el valor de la correlación es de -0.861 y -0.656.

Para el **PM2.5 observados**, posee una relación negativa y significativa ($p < 0.01$) con la temperatura simulada y observada. El valor de la correlación es de -0.212 y -0.215 respectivamente. Para la humedad relativa simulada y observada poseen una correlación positiva y significativa ($p < 0.01$) el valor de la correlación es de 0.237 y 0.300 respectivamente. Mientras que la relación que guarda el PM2.5 observada y la velocidad simulada y observada es negativa y significativa ($p < 0.01$) en el cual el valor de la correlación es de -0.375 y -0.368.

Tabla 22

Correlación de Pearson entre las variables meteorológicas y partículas (PM10 y PM2.5 para la estación de calidad del aire de San Juan de Lurigancho)

		Correlaciones									
		PM10pre	PM10obs	PM2.5pre	PM2.5obs	Tpre	Tobs	Hrpre	Hrobs	Velpre	Velobs
PM10pre	Correlación de Pearson	1	,373**	,999**	,391**	-,621**	-,568**	,613**	,552**	-,869**	-,663**
	Sig. (bilateral)		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	625	672	625	672	664	672	664	672	664
PM10obs	Correlación de Pearson	,373**	1	,377**	,754**	-,094*	-0.039	0.074	,093*	-,349**	-,251**
	Sig. (bilateral)	0.000		0.000	0.000	0.018	0.329	0.063	0.020	0.000	0.000
	N	625	625	625	625	625	621	625	621	625	621
PM2.5pre	Correlación de Pearson	,999**	,377**	1	,393**	-,612**	-,558**	,605**	,545**	-,861**	-,656**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	625	672	625	672	664	672	664	672	664
PM2.5obs	Correlación de Pearson	,391**	,754**	,393**	1	-,212**	-,215**	,237**	,300**	-,375**	-,368**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	625	625	625	625	625	621	625	621	625	621
Tpre	Correlación de Pearson	-,621**	-,094*	-,612**	-,212**	1	,909**	-,963**	-,811**	,672**	,688**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.018	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	672	625	672	625	672	664	672	664	672	664
Tobs	Correlación de Pearson	-,568**	-0.039	-,558**	-,215**	,909**	1	-,897**	-,928**	,645**	,658**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.329	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000
	N	664	621	664	621	664	664	664	664	664	664
Hrpre	Correlación de Pearson	,613**	0.074	,605**	,237**	-,963**	-,897**	1	,861**	-,668**	-,709**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.063	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000
	N	672	625	672	625	672	664	672	664	672	664
Hrobs	Correlación de Pearson	,552**	,093*	,545**	,300**	-,811**	-,928**	,861**	1	-,630**	-,626**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000
	N	664	621	664	621	664	664	664	664	664	664
Velpre	Correlación de Pearson	-,869**	-,349**	-,861**	-,375**	,672**	,645**	-,668**	-,630**	1	,748**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000
	N	672	625	672	625	672	664	672	664	672	664
Velobs	Correlación de Pearson	-,663**	-,251**	-,656**	-,368**	,688**	,658**	-,709**	-,626**	,748**	1
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	N	664	621	664	621	664	664	664	664	664	664

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

5.2 EVALUAR EL DESEMPEÑO DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS (TEMPERATURA DEL AIRE, HUMEDAD RELATIVA Y VELOCIDAD DEL VIENTO) SIMULADAS CON EL MODELO DE LA CALIDAD DEL AIRE WRF-CHEM EN LIMA METROPOLITANA EN FEBRERO DE 2018

A continuación, se presentan los resultados por cada variable meteorológica analizada:

5.2.1 Humedad relativa (%)

En la Tabla 23 (Humedad Relativa) se observa el resultado de las pruebas estadísticas para la variable meteorológica de humedad relativa para las 7 estaciones de calidad del aire del SENAMHI.

- a) Ate: para esta estación la prueba estadística de Promedio Sesgo (BIAS), se observa que los valores simulados por el modelo WRF-Chem son mayores en 2 %, respecto a la humedad relativa observada. En cuanto a la prueba estadística de Sesgo Normalizado (MNB), se observa que el valor de la humedad relativa que se obtiene del modelo es mayor que el observado, el resultado obtenido (0.03%) es aceptable, ya que de acuerdo a EPA (2005) si el rango del sesgo normalizado se encuentra entre $\pm 5-15\%$ el resultado de modelo es aceptable. Para la prueba estadística de Razón de los Promedios (RATIO), el valor es de 1.039 lo cual indica que el valor de la humedad relativa simulado es ligeramente mayor que la observada.

En la prueba estadística Erros Gross (ERROR) se obtiene como resultado 5.306%, para la prueba estadística de Error Normalizado Gross (MNGE) es de 0.077%, indica que es un resultado aceptable, de acuerdo a EPA (2005) si el resultado se MNGE se encuentran en el rango de 0-35% se acepta el resultado. Para la Raíz de Error Cuadrático Medio (RMSE), el resultado fue de 6.608%, lo cual indica que existe una diferencia mínima entre los valores obtenidos del modelo y los valores observados; y para el Índice de Concordancia (IAO) el

resultado fue de 0.89, este resultado se interpreta que el modelo ha realizado una simulación, ya que el valor se asemeja a la unidad.

- b) Campo de Marte, para la prueba estadística de BIAS se determina que los valores observados son mayores en 5%, respecto a la humedad relativa simulada por el modelo. Para la prueba estadística del sesgo normalizado (MNB) se observa que el resultado es negativo, es porque el valor de la humedad relativa observado es mayor que el simulado. El valor obtenido en el resultado fue de (-0.063%), el cual es aceptado de acuerdo a EPA (2005) y según Gómez (2019); en donde se establecen los rangos de aceptación $\pm 5-15\%$ y $\pm 20\%$, respectivamente. En específico para la prueba estadística de RATIO el valor fue de 0.938 lo cual indica que el valor de la humedad relativa simulada es ligeramente menor que la observada.

Para las pruebas estadísticas de ERROR Gross (ERROR) fue de 6.602%, para la prueba estadística de Error Normalizado Gross (MNGE) es de 0.082%, de acuerdo con EPA (2005) si el resultado de MNGE se encuentra entre 0-35% se acepta el resultado. Para la prueba estadística de Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) fue de 8.178%, lo cual indica que los valores de humedad relativa obtenidos del modelo y observados poseen una diferencia mínima y para el IAO fue de 0.779, esto demuestra que el modelo simula de manera adecuada la variable meteorológica humedad relativa, para la estación de campo de marte.

- c) Carabayllo, para la primera prueba estadística (BIAS) se observa que los valores de humedad relativa simulados son mayores en 3.21 % respecto a los valores observados. En la prueba estadística de sesgo normalizado (MNB), se observa que el resultado es positivo, lo cual se interpreta que los valores simulados del modelo para la humedad relativa son mayores que los valores observados. El resultado obtenido fue de 0.047%, el cual es aceptado de acuerdo a EPA (2005) y según Gómez (2019); en donde se establecen los rangos de aceptación $\pm 5-15\%$ y $\pm 20\%$, respectivamente. En específico para la prueba estadística de RATIO el valor fue de 1.05 lo cual indica que el valor de la humedad relativa simulada es ligeramente mayor que la observada.

Para las pruebas estadísticas de ERROR Gross (ERROR) fue de 5.866%, para la prueba estadística de Error Normalizado Gross (MNGE) es de 0.087%, de acuerdo con EPA (2005) si el resultado de MNGE se encuentra entre 0-35% se acepta el resultado. Para la prueba estadística de RMSE fue de 7.28%, lo cual

indica que los valores obtenidos del modelo y observados poseen una diferencia mínima y para el IAO fue de 0.85, lo cual se interpreta que el modelo simula de manera adecuada la variable meteorológica humedad relativa, para la estación de Carabayllo.

- d) Huachipa, en BIAS el resultado es positivo, por lo que se puede deducir que el valor de la humedad relativa simulado es mayor en 1.25% respecto a los valores observados. Mientras que el Sesgo Normalizado (MNB), se observa que el resultado es 0.01%, el cual es aceptado de acuerdo a EPA (2005) y según Gómez (2019); en donde se establecen los rangos de aceptación $\pm 5-15\%$ y $\pm 20\%$, respectivamente, además se puede decir que se interpreta que los valores de humedad relativa simulados son mayores que los valores observados. En específico para la prueba estadística de RATIO el valor fue de 1.023 lo cual indica que el valor de la humedad relativa simulada es ligeramente mayor que la observada.

Para las pruebas estadísticas de ERROR Gross (ERROR) fue de 4.450%, para la prueba estadística de Error Normalizado Gross (MNGE) es de 0.065%, acuerdo con EPA (2005) si el resultado de MNGE se encuentra entre 0-35% se acepta el resultado. Para la prueba estadística de RMSE fue de 5.6299%, lo cual indica que los valores obtenidos del modelo y observados poseen una diferencia mínima. Y para el IAO fue de 0.918; lo cual indica que el modelo simula de manera adecuada la variable meteorológica humedad relativa, para la estación de Huachipa.

- e) Puente Piedra: en BIAS el resultado es positivo, por lo que se puede deducir que el valor de la humedad relativa simulados es mayor en 3.64%, para humedad relativa observada. Mientras que el Sesgo Normalizado, se observa que el resultado es 0.053%, el cual es aceptado de acuerdo a EPA (2005) y según Gómez (2019); en donde se establecen los rangos de aceptación $\pm 5-15\%$ y $\pm 20\%$, respectivamente, además se puede interpretar que los valores de la humedad relativa simulada son mayores que los observado. En específico para la prueba estadística de RATIO el valor fue de 1.062 lo cual indica que el valor de la humedad relativa simulada es ligeramente mayor que la observada.

Para las pruebas estadísticas de ERROR fue de 5.896%, para la prueba estadística de MNGE es de 0.092%, de acuerdo a EPA (2005) si el resultado de MNGE se encuentra entre 0-35% se acepta el resultado. Para la prueba

estadística de RMSE fue de 7.075%, lo cual indica que los valores obtenidos del modelo y observados para la humedad relativa poseen una diferencia mínima. Y para el IAO fue de 0.88, lo cual indica que el modelo simula de manera adecuada la humedad relativa.

- f) San Borja: en BIAS el resultado es negativo, por lo que se puede deducir que el valor de los datos simulados en humedad relativa, es menor en 3.64% respecto a los observados. Mientras que el Sesgo Normalizado (MNB), se observa que el resultado es -0.0454 lo que se interpreta que los valores de humedad relativa simulados son menores que los observados, además; el valor obtenido es aceptado de acuerdo a EPA (2005) y según Gómez (2019); en donde se establecen los rangos de aceptación $\pm 5-15\%$ y $\pm 20\%$, respectivamente. En específico para la prueba estadística de RATIO el valor fue de 0.9640 lo cual indica que el valor de la humedad relativa simulada es ligeramente menor que la observada.

Para las pruebas estadísticas de ERROR fue de 6.09%, para la prueba estadística de MNGE es de 0.0733%, para la prueba estadística de RMSE fue de 7.697%, de acuerdo con EPA (2005) si el resultado de MNGE se encuentra entre 0-35% se acepta el resultado y para el IAO fue de 0.86; lo cual se interpreta que el modelo simula de manera adecuada la variable meteorológica humedad relativa, para la estación de San Borja.

- g) San Juan de Lurigancho, en BIAS el resultado es positivo, por lo que se puede deducir que el valor de humedad relativa de los datos simulados es mayor en 9.54% respecto a los observados. Mientras que el Sesgo Normalizado, se observa que el resultado es 0.14%, el resultado obtenido es aceptable según EPA (2005) y según Gómez (2019); en donde se establecen los rangos de aceptación $\pm 5-15\%$ y $\pm 20\%$, respectivamente; además, se interpreta que los datos simulados son mayores que los observados. En específico para la prueba estadística de RATIO el valor fue de 1.79 lo cual indica que el valor de la humedad relativa simulada es ligeramente mayor que la observada.

Para las pruebas estadísticas de ERROR fue de 9.851%, para la prueba estadística de MNGE es de 0.154%, acuerdo con EPA (2005) si el resultado de MNGE se encuentra entre 0-35% se acepta el resultado. Para la prueba estadística de RMSE fue de 13.69%, lo cual indica que existe una diferencia significativa entre los valores simulados del modelo y los observados. Para el

IAO fue de 0.76, lo cual indica que el modelo simula de manera adecuada la variable meteorológica humedad relativa.

Tabla 23

Pruebas estadísticas de Humedad Relativa (%) en las 7 estaciones de calidad de aire

Pruebas Estadísticas							
Estación	BIAS (%)	ERROR Gross (%)	Sesgo Normalizado (%)	Error Normalizado Gross (%)	Razón de los promedios	Raíz de error cuadrático medio (%)	Índice de concordancia
Ate	2.344	5.306	0.033	0.077	1.039	6.609	0.893
Campo de Marte	-5.062	6.602	-0.063	0.082	0.938	8.178	0.779
Carabaylo	3.21	5.866	0.047	0.087	1.053	7.281	0.857
Huachipa	1.256	4.451	0.018	0.065	1.024	5.620	0.918
Puente Piedra	3.640	5.896	0.053	0.092	1.062	7.075	0.882
San Borja	-3.702	6.090	-0.045	0.073	0.964	7.697	0.864
San Juan de Luriganc	9.543	9.852	0.143	0.154	1.795	13.691	0.761

5.2.2 Temperatura (°C)

En la tabla 24 se observa el resultado de las pruebas estadísticas para la variable meteorológica de temperatura para las 7 estaciones de calidad de aire del SENAMHI:

- a) Ate: para esta estación la prueba estadística de Promedio Sesgo (BIAS), se observa que los valores de temperatura de aire simulados por el modelo son mayores en 0.098 °C, respecto a los datos observados. En cuanto a la prueba estadística de Sesgo Normalizado (MNB), se observa que el valor que se obtiene es positivo, 0.004% lo cual demuestra que los valores de temperatura del aire simulado son ligeramente mayores que los valores de temperatura observados, en adición se puede determinar que el resultado es aceptable de acuerdo a EPA (2005) si el rango del sesgo normalizado se encuentra entre $\pm 5-15\%$ el resultado de modelo es aceptable y según Gómez (2019), determina que el rango de aceptación varía entre $\pm 20\%$. En específico para la prueba estadística de RATIO el valor fue de 1.006 lo cual indica que el valor de la temperatura simulada llega a ser casi igual que el valor de la temperatura observada.

Para las pruebas estadísticas de ERROR Gross (ERROR) fue de 0.812 °C, para la prueba estadística de ERROR Normalizado Gross (MNGE) es de 3.428%, de acuerdo con EPA (2005) si el resultado de MNGE se encuentra entre 0-35% se acepta el resultado. Para la prueba estadística de RMSE fue de 0.983 °C, lo cual indica que existe una diferencia mínima entre los valores obtenidos del modelo y los valores observados; para el IAO fue de 0.940, lo cual indica que el modelo simula de manera adecuada la variable meteorológica.

- b) Campo de Marte, se observa que la temperatura del aire observados es mayores en 1.356 °C, respecto a la temperatura del aire simulados por el modelo. Para la prueba estadística del sesgo normalizado (MNB), el resultado fue de 0.059%; se observa que el resultado es positivo (valor precedido es mayor que observado), además el valor obtenido se encuentra dentro del rango de aceptación ($\pm 5-15\%$) según EPA (2005) y según Gómez (2019) en donde se establecen los rangos de aceptación $\pm 5-15\%$ y $\pm 20\%$. En específico para la prueba estadística de RATIO el valor fue de 1.832 lo cual indica que el valor de la temperatura simulada es ligeramente mayor que la observada.

Para las pruebas estadísticas de ERROR Gross fue de 1.48 °C, para la prueba estadística de MNGE es de 0.067%, de acuerdo con EPA (2005) si el resultado de MNGE se encuentra entre 0-35% se acepta el resultado; para la prueba estadística de RMSE fue de 0.98°C, lo cual indica que existe una diferencia mínima entre los valores obtenidos del modelo y los valores observados; para el IAO fue de 0.75, lo cual indica que el modelo simula de manera adecuada la variable meteorológica.

- c) Carabayllo, para la primera prueba estadística, promedio sesgo (BIAS) se observa que los valores de temperatura del aire simulados por el modelo son menores en 0.512 °C respecto a los valores de temperatura del aire. En la prueba estadística de sesgo normalizado (MNB), se observa que el resultado (-0.021%) es negativo, lo cual se interpreta que el valor simulado del modelo es menor que el observado, en adición se determina que el valor obtenido es aceptable, ya que se encuentra dentro del rango de aceptación ($\pm 5-15\%$) según EPA (2005) y según Gómez (2019) el rango de aceptación es de ($\pm 20\%$). En específico para la prueba estadística de RATIO el valor fue de 0.980 lo cual indica que el valor de la temperatura del aire simulada es menor que la observada.

Para las pruebas estadísticas de ERROR fue de 0.9327°C, para la prueba estadística de MNGE es de 0.0375%, de acuerdo con EPA (2005) si el resultado de MNGE se encuentra entre 0-35% se acepta el resultado para la prueba estadística de RMSE fue de 1.176°C, y para el IAO fue de 0.91, lo cual indica que existe una diferencia mínima entre los valores obtenidos del modelo y los valores observados.

- d) Huachipa, en BIAS el resultado es positivo, por lo que se puede deducir que el valor de los valores de la temperatura del aire simulados es mayor en 0.49 °C respecto a los valores de la temperatura del aire observados. Mientras que el Sesgo Normalizado, se observa que el resultado es 0.020% lo que se interpreta que los valores de la temperatura del aire simulados son ligeramente mayores que los valores de la temperatura del aire observados, además se puede determinar que el valor obtenido es un valor aceptable de acuerdo a EPA (2005) y Gómez (2019). En específico para la prueba estadística de RATIO el valor fue de 1.023 lo cual indica que el valor de la temperatura del aire simulada es ligeramente mayor que el valor de la temperatura del aire observada.

Para las pruebas estadísticas de ERROR Gross fue de 1.064 °C, para la prueba estadística de MNGE es de 0.0453%, el cual se encuentra dentro del rango de aceptación 0-35% (EPA,2005). Para la prueba estadística de RMSE fue de 5.01°C, el cual demuestra que existe una mínima diferencia entre los valores obtenidos por el modelo y los observados. Y para el IAO fue de 0.88, lo cual indica que existe una diferencia mínima entre los valores de temperatura del aire obtenidos del modelo y los valores de la temperatura del aire observados.

- e) **Puente Piedra:** en BIAS el resultado es negativo, por lo que se puede deducir que el valor de la temperatura del aire simulada es menor en -0.554 °C respecto a los observados. Mientras que el Sesgo Normalizado, se observa que el resultado es -0.067% lo que se interpreta que los valores de temperatura del aire simulados son menores que los valores de temperatura del aire observados, en suma, se determina que el valor obtenido es aceptable de acuerdo ($\pm 5-15\%$) a EPA (2005) y según Gómez (2019) el rango de aceptación es de ($\pm 20\%$). En específico para la prueba estadística de RATIO el valor fue de 1.459 lo cual indica que el valor de la temperatura del aire simulada es ligeramente mayor que la observada.

Para las pruebas estadísticas de ERROR fue de 1.67 °C, para la prueba estadística de MNGE es de 0.066%,el cual se encuentra dentro del rango de aceptación,0-35%, según EPA (2005). Para la prueba estadística de RMSE fue de 2.379°C, lo cual indica que existe una diferencia mínima entre los valores obtenidos por el modelo y los valores observados; y por último para el IAO fue de 0.811, el cual demuestra que el modelo realiza una adecuada simulación para la variable meteorológica, temperatura.

- f) **San Borja:** en BIAS el resultado es negativo, por lo que se puede deducir que el valor de los valores de temperatura del aire simulados es menor en 4.01 respecto a los valores de la temperatura del aire observados. Mientras que el Sesgo Normalizado, se observa que el resultado es -0.1714%, lo que se interpreta que los valores de la temperatura del aire simulados son menores que los valores de la temperatura del aire observados, en suma, se determina que el valor obtenido es aceptable de acuerdo EPA (2005) y Gómez (2019). En específico para la prueba estadística de RATIO el valor fue de 0.84 lo cual indica que el valor de la temperatura del aire simulada es ligeramente menor que el valor de la temperatura del aire observada.

Para las pruebas estadísticas de ERROR fue de 4.01 °C, para la prueba estadística de MNGE es de 0.1588%, el cual se encuentra dentro del rango de aceptación, 0-35%, según EPA (2005). Para la prueba estadística de RMSE fue de 5.0821°C, lo cual indica que existe una diferencia mínima entre los valores obtenidos por el modelo y los valores de temperatura del aire observados y para el IAO fue de 0.4098, el cual demuestra que el modelo realiza una adecuada simulación para la variable meteorológica, temperatura del aire.

- g) San Juan de Lurigancho: en BIAS el resultado es negativo, por lo que se puede deducir que el valor de la temperatura del aire simulados es menor con respecto a los valores de la temperatura del aire observados. Mientras que el Sesgo Normalizado, se observa que el resultado es -0.06 lo que se interpreta que los valores de la temperatura del aire simulados son menores que los valores de la temperatura del aire observado, además se puede determinar que el valor obtenido se encuentra en el rango aceptable: $\pm 5-15\%$, EPA (2005) y según Gómez (2019) el rango de aceptación es de $\pm 20\%$. En específico para la prueba estadística de RATIO el valor fue de 1.459 lo cual indica que el valor de la temperatura del aire simulada es ligeramente mayor que el valor de la temperatura del aire observada.

Para las pruebas estadísticas de ERROR fue de 1.67 °C, para la prueba estadística de MNGE es de 0.066%, el cual se encuentra dentro del rango de aceptación, 0-35%, según EPA (2005). Para la prueba estadística de RMSE fue de 2.379°C, lo cual indica que existe una diferencia mínima entre los valores obtenidos por el modelo y los valores observados y para el IAO fue de 0.811, el cual demuestra que el modelo realiza una adecuada simulación para la variable meteorológica, temperatura.

Tabla 24

Pruebas estadísticas de temperatura (°C) en 7 estaciones de la calidad del aire

Pruebas Estadísticas							
Estación	BIAS (°C)	ERROR GROSS (°C)	Sesgo Normaliz ado (%)	Error Normaliz ado Gross (%)	Razón de los promed ios	Raíz de error cuadrát ico medio (°C)	Índice de concordan cia
Ate	0.098	0.812	0.004	3.428	1.006	0.983	0.940
Campo de Marte	1.356	1.488	0.059	0.067	1.060	1.832	0.757
Carabay llo	-0.513	0.933	-0.021	0.038	0.981	1.176	0.916
Huachip a	0.497	1.065	0.021	0.045	1.023	5.012	0.884
Puente Piedra	-0.554	1.671	-0.066	0.066	1.459	2.379	0.812
San Borja	-4.014	4.016	-0.171	0.159	0.841	5.082	0.409
San Juan de Luriganc ho	-1.635	1.671	-0.066	0.066	1.459	2.379	0.812

5.2.3 Velocidad del viento (m/s)

En la tabla 25 se observa el resultado de las pruebas estadísticas para la variable meteorológica de la velocidad del viento en 7 estaciones de la calidad del aire en Lima Metropolitana:

- a) Ate: para esta estación la prueba estadística de promedio sesgo (BIAS), se observa que los valores de velocidad del viento simulados por el modelo son mayores en 2.99 m/s, respecto a los valores de velocidad observados. En cuanto a la prueba estadística de Sesgo Normalizado, se observa que el valor (2.514%) que se obtiene es positivo lo cual demuestra que los valores de velocidad del viento simulado son ligeramente mayores que los valores de la velocidad observado, en suma, se determina que el resultado es aceptable según: $\pm 5-15\%$, EPA (2005) y según Gómez (2019) el rango de aceptación es de $\pm 20\%$. En específico para la prueba estadística de RATIO el valor fue de 4.64 lo cual indica que el valor de la velocidad del viento simulada es mayor que la observada.

Para las pruebas estadísticas de ERROR Gross fue de 3.03 m/s, para la prueba estadística de MNGE es de 3.67%, el cual se encuentra dentro del rango de aceptación, 0-35%, según EPA (2005). Para la prueba estadística de RMSE fue de 3.37 m/s, demostrando que aparentemente existe diferencia significativa entre los valores obtenidos por el modelo y los observados y para el IAO fue de 0.286, el cual demuestra que el modelo WRF - Chem no realiza una adecuada simulación, ya que el valor obtenido se encuentra muy alejado de la unidad.

- b) Campo de Marte, se observa que los valores de velocidad del viento simulado son mayores en 1.398 m/s, respecto a los valores de viento observado por el modelo. Para la prueba estadística del sesgo normalizado (0.549 m/s) se observa que el resultado es positivo es porque el valor precedido es mayor que observado, en suma, se determina que el resultado es aceptable según: $\pm 5-15\%$, EPA (2005) y según Gómez (2019) el rango de aceptación es de $\pm 20\%$. En específico para la prueba estadística de RATIO el valor fue de 2.308 lo cual indica que el valor de la velocidad del viento simulada es mayor que los valores de velocidad del viento observada.

Para las pruebas estadísticas de ERROR fue de 1.579 m/s, para la prueba estadística de MNGE es de 1.384%, el cual se encuentra dentro del rango de

aceptación, 0-35%, según EPA (2005). Para la prueba estadística de RMSE fue de 1.83 m/s, lo cual demuestra una diferencia mínima entre los valores de la velocidad del viento simulado y el observado; y para el IAO fue de 0.60, el cual demuestra que el modelo realiza una adecuada simulación.

- c) Carabayllo, para la primera prueba estadística, BIAS; se observa que los valores de velocidad del viento simulados son menores en 1.84 m/s respecto a los valores de velocidad observados. En la prueba estadística de sesgo normalizado, (0.989%); se observa que el resultado es positivo, lo cual se interpreta que el valor simulado del modelo es mayor que el observado, además se puede determinar que el valor obtenido se encuentra en el rango aceptable: $\pm 5-15\%$, EPA (2005) y según Gómez (2019) el rango de aceptación es de $\pm 20\%$. En específico para la prueba estadística de RATIO el valor fue de 2.85 lo cual indica que el valor de la velocidad del viento simulada es mayor que el valor de velocidad del viento observada.

Para las pruebas estadísticas de ERROR fue de 2.24 m/s, para la prueba estadística de MNGE es de 1.93%, el cual se encuentra dentro del rango de aceptación, 0-35%, según EPA (2005). Para la prueba estadística de RMSE fue de 4.03 m/s, se determina que la diferencia entre los valores obtenidos del modelo y los observados es significativa. Y para el IAO fue de 0.321, el cual demuestra que el modelo no realiza una adecuada simulación, ya que el valor obtenido se encuentra muy alejado de la unidad.

- d) Huachipa, en BIAS el resultado es positivo, por lo que se puede deducir que el valor de la velocidad del viento simulados es mayor en 1.76 respecto a los observados. Mientras que el Sesgo Normalizado, se observa que el resultado es 0.836% lo que se interpreta que los valores de la velocidad del viento simulados son mayores que los observados, además se puede determinar que el valor obtenido se encuentra en el rango aceptable: $\pm 5-15\%$, EPA (2005) y según Gómez (2019) el rango de aceptación es de $\pm 20\%$. En específico para la prueba estadística de RATIO el valor fue de 2.643 lo cual indica que el valor de la velocidad del viento simulada es mayor que la observada.

Para las pruebas estadísticas de ERROR fue de 1.88 m/s, para la prueba estadística de MNGE es de 1.71%, para la prueba estadística de RMSE fue de 2.2305 m/s, el cual se encuentra dentro del rango de aceptación, 0-35%, según

EPA (2005). Y para el IAO fue de 0.613, el cual demuestra que el modelo realiza una razonable simulación para la variable meteorológica.

- e) Puente Piedra: en BIAS el resultado es positivo, por lo que se puede deducir que el valor de la velocidad del viento simulados es mayor en 1.657 m/s respecto a los observados. Mientras que el Sesgo Normalizado, se observa que el resultado es 1.052% lo que se interpreta que los valores de la velocidad del viento simulados son mayores que los observados, además se puede determinar que el valor obtenido se encuentra en el rango aceptable: $\pm 5-15\%$, EPA (2005) y según Gómez (2019) el rango de aceptación es de $\pm 20\%$. En específico para la prueba estadística de RATIO el valor fue de 3.079 lo cual indica que el valor de la velocidad del viento simulada es mayor que la observada.

Para las pruebas estadísticas de ERROR fue de 1.708 m/s, para la prueba estadística de MNGE es de 2.117%, el cual se encuentra dentro del rango de aceptación, 0-35%, según EPA (2005). Para la prueba estadística de RMSE fue de 2.0421 m/s, lo cual indica que existe una diferencia mínima entre los valores obtenidos por el modelo y los valores observados; mientras que para el IAO fue de 0.579, el cual demuestra que el modelo realiza una razonable simulación.

- f) San Borja: en BIAS el resultado es positivo, por lo que se puede deducir que el valor de la velocidad del viento simulados es mayor en 4.19 m/s respecto a los observados. Mientras que el Sesgo Normalizado, se observa que el resultado es 3.442% lo que se interpreta que los datos simulados son menores que los observados, además se puede determinar que el valor obtenido se encuentra en el rango aceptable: $\pm 5-15\%$, EPA (2005) y según Gómez (2019) el rango de aceptación es de $\pm 20\%$. En específico para la prueba estadística de RATIO el valor fue de 6.1060 lo cual indica que el valor de la velocidad del viento simulada es considerablemente mayor que la observada.

Para las pruebas estadísticas de ERROR fue de 4.1990 m/s, para la prueba estadística de MNGE es de 5.1249%, el cual se encuentra dentro del rango de aceptación, 0-35%, según EPA (2005). Para la prueba estadística de RMSE fue de 4.40 m/s, lo cual indica una diferencia significativa entre los valores de la velocidad del viento obtenidos por el modelo y los observados. Para el IAO fue de 0.25, el cual demuestra que el modelo no realiza una adecuada simulación, ya que el valor obtenido se encuentra muy alejado de la unidad.

g) San Juan de Lurigancho: en BIAS el resultado es positivo, por lo que se puede deducir que el valor de la velocidad del viento simulados es mayor en respecto a los observados. Mientras que el Sesgo Normalizado, se observa que el resultado es 0.790% lo que se interpreta que los datos simulados son mayores que los observado, en suma, se determina que el resultado es aceptable según: $\pm 5-15\%$, EPA (2005) y según Gómez (2019) el rango de aceptación es de $\pm 20\%$. En específico para la prueba estadística de RATIO el valor fue de 3.78 lo cual indica que el valor de la velocidad del viento simulada es mayor que la observada.

Para las pruebas estadísticas de ERROR fue de 1.78 m/s, para la prueba estadística de MNGE es de 1.49%, el cual se encuentra dentro del rango de aceptación, 0-35%, según EPA (2005). Para la prueba estadística de RMSE fue de 2.617 m/s, lo cual demuestra una diferencia mínima entre los valores de la velocidad del viento simulado y el observado y para el IAO fue de 0.645, el cual demuestra que el modelo realiza una razonable simulación.

Tabla 25

Pruebas estadísticas de velocidad (m/s) en 7 estaciones de calidad del aire

Pruebas Estadísticas							
Estación	BIAS (m/s)	ERROR (m/s)	Sesgo Normaliza do (%)	Error Normaliza do Gross (%)	Razón de los promedi os	Raíz de error cuadráti co medio (m/s)	Índice de concordan cia
Ate	2.993	3.032	2.514	3.676	4.643	3.373	0.287
Campo de Marte	1.398	1.579	0.549	1.384	2.308	1.834	0.602
Carabayl lo	1.849	2.241	0.989	1.932	2.851	4.037	0.321
Huachipa	1.767	1.887	0.836	1.715	2.643	2.231	0.613
Puente Piedra	1.657	1.708	1.052	2.117	3.079	2.042	0.579
San Borja	4.194	4.199	3.442	5.125	6.106	4.401	0.254
San Juan de Luriganc ho	1.672	1.783	0.790	1.494	3.789	2.617	0.645

5.3 COMPARACIÓN ENTRE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS MEDIDAS Y SIMULADAS

A continuación, se presenta los resultados de comparación entre las variables meteorológicas por cada estación de la calidad del aire de SENAMHI:

5.3.1 Humedad relativa (%)

5.3.1.1. Estación de calidad de aire- Ate

En la figura 7, se observa que la variación horaria de la humedad relativa simulada en el mes de febrero se asemeja al comportamiento de la humedad relativa horaria observada en el mes de febrero de 2018.

En los valores de humedad relativa observados, el valor mínimo fue de 46.9% el día 25 a las 3 de tarde, ya que en horas después de máxima radiación solar y temperatura del aire ocurre bajos valores de humedad relativa; cabe precisar que mientras que el valor mínimo para la humedad relativa simulada fue de 52.6% en el día 13 de febrero de 2018 a las 12:00 del mediodía; además se observa que el valor simulado es mayor en 5.7% respecto al observado. Mientras que el valor de humedad relativa con mayor valor observados fue de 93.3% el cual se generó el día 16 a la 01: 00 de la madrugada, mientras que las concentraciones simuladas fueron de 91.18% el día 23 a las 06:00 a.m.

Como se aprecia los rangos de valores mínimos y máximos de los valores de humedad relativa observados y simulados poseen una mínima variación, lo que significa que el modelo representa bastante bien la información real.

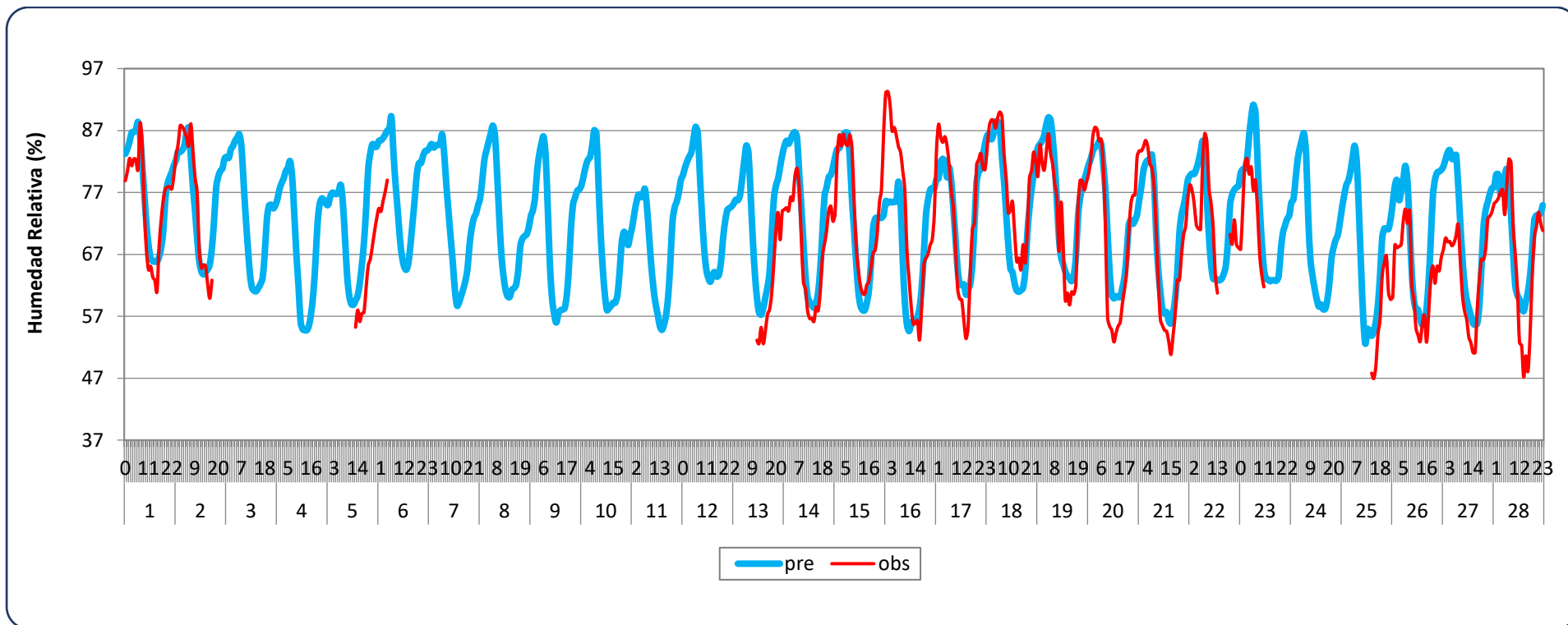


Figura 7 Variación horaria de la Humedad Relativa observada (color rojo) y simulada (color celeste) en la Estación de Calidad de aire – Ate

5.3.1.2. Estación de calidad de aire- Campo de Marte

En la figura 8, se observa que la variación horaria de la humedad relativa simulada se asemeja al comportamiento de la humedad relativa horaria observada en el mes de febrero del 2018.

El valor máximo de humedad relativa simulada fue de 89.211% que se dio en el día 1 a las 6:00 am; mientras que el valor mínimo fue de 56.84% que se presentó el día 25 a las 10 a.m. Para la humedad relativa observada el valor máximo fue de 96% el día 19 a las 3:00 am, mientras que el valor mínimo fue de 53% el día 13 a las 11 a.m., en este día se presentó uno el día con alta temperaturas (29.4°C).

Las horas medidas observadas de humedad relativa, con los que se cuenta fueron un total de 641 lo que representa un 95.39%, demostrando así una mínima diferencia con los datos simulados (672) y mejorando el análisis.

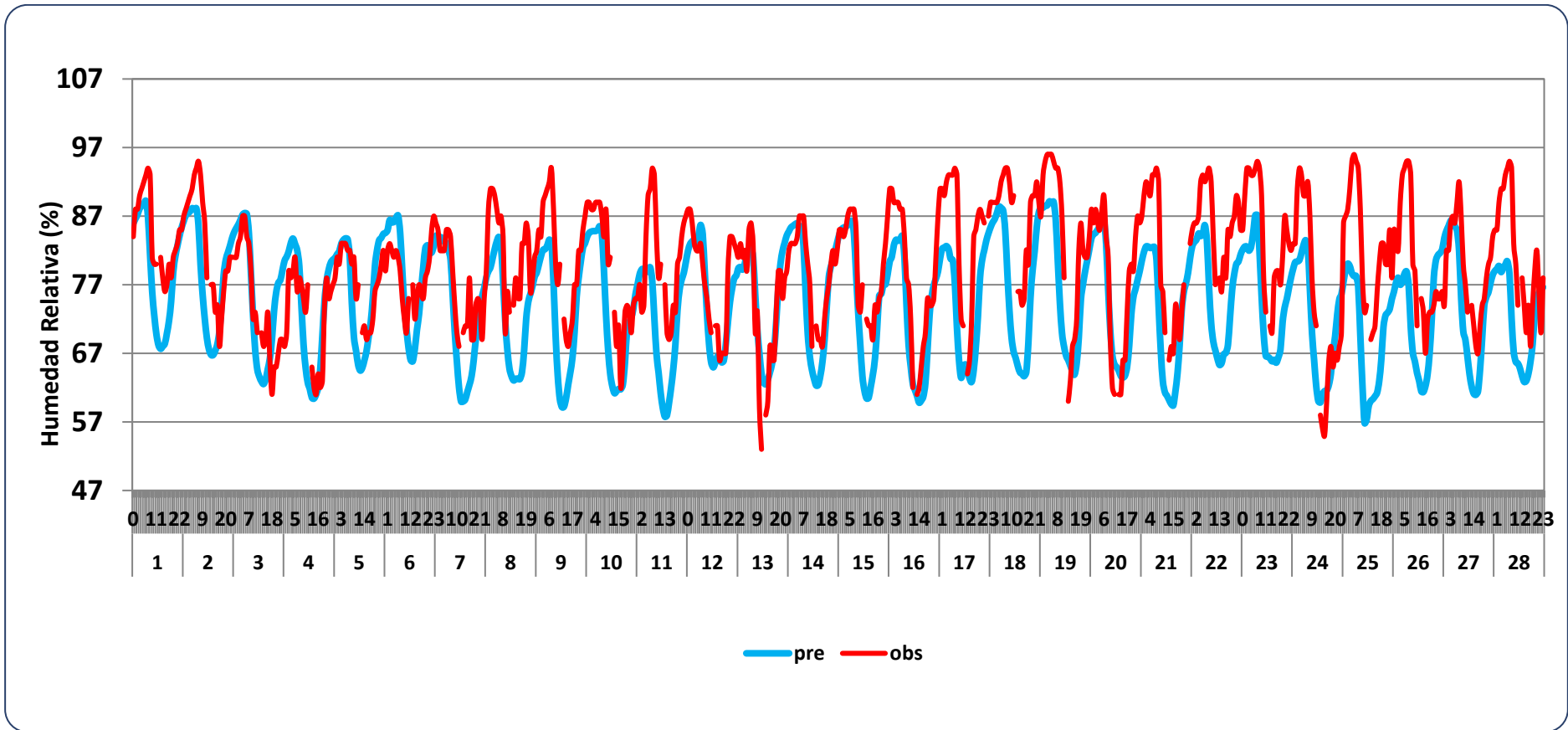


Figura 8 Variación horaria de humedad relativa observada (rojo) y simulada (azul) para la Estación Meteorológica de Campo – Marte.

5.3.1.3. Estación de Calidad de Aire – Carabayllo

En la figura 9, se observa que el valor mínimo de la humedad relativa simulada fue de 52.37% dicho valor se encuentra el día 25 a las 12:00 pm, en el cual se presentó uno de los días con valor máximo de temperatura, mientras que el valor máximo fue de 92.19% el cual se registró el día 12 a las 6:00 am, día en el que se presentó la temperatura mínima.

Para los datos observados el valor mínimo fue de 47.1 % el cual se presencié el día 27 a las 3:00 pm, día en el que se presenta con alta temperatura (29.7°C); el valor máximo fue de 90.3 % el cual se presencié el día 6 a las 6:00 am.

La cantidad de horas medidos de humedad relativa con la que se cuento para este análisis es de 405 lo que representa el 60.27%, mientras que el 39.73% representa el porcentaje de los datos en blanco que tiene la estación; esta diferencia afecta en el análisis no se podrá realizar la comparación con la totalidad de datos; sin embargo, en el grafico se puede observar que la variación horaria de la humedad relativa simulada se asemeja al comportamiento temporal de la humedad relativa observada.

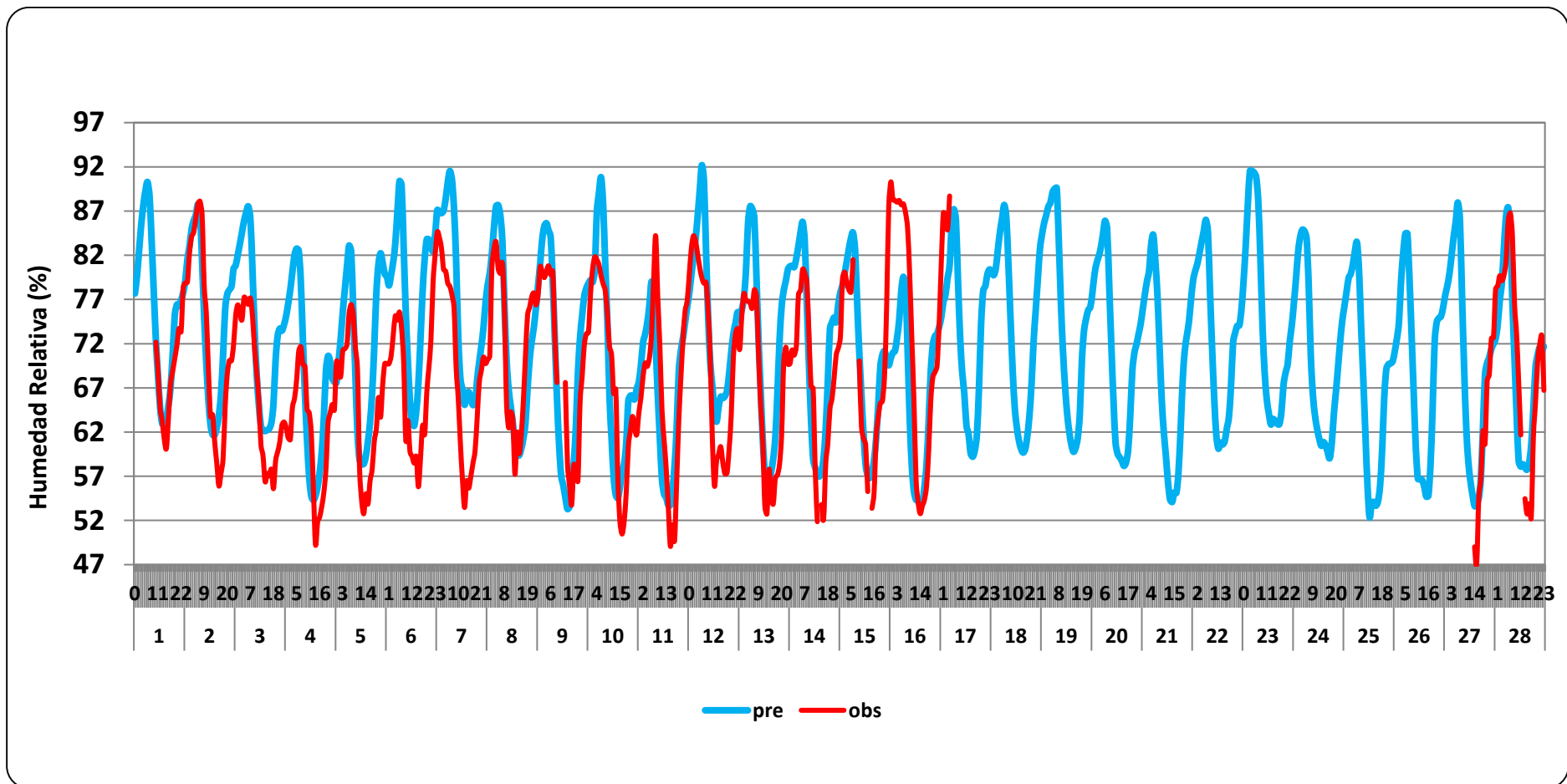


Figura 9 Variación horaria de la humedad relativa observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de aire de Carabayllo

5.3.1.4. Estación de Calidad del Aire – Huachipa

En la Figura 10, el valor mínimo de la simulación fue de 52.58%, el cual se manifestó el día 25 a las 11 :00 am; mientras que los datos observados el valor mínimo fue de 46.18%, se manifestó el día 28 a las 2:00 pm, día en el cual se encuentra una de los días con alta temperatura. Para los valores máximos el valor de la simulación fue de 91.18% el cual se manifestó el día 23 a las 6:00 a.m. Mientras que para los datos observados fue de 91.17%, el cual se expresó el día 23 a las 6:00 am.

La cantidad de horas medidos de humedad relativa con los que se cuenta para el siguiente análisis fue de 431 el cual representa un 64.14% de la totalidad; se observa que la variación horaria de la humedad relativa observada y de los simulados son similares, aunque queda en la incertidumbre el comportamiento de los días en el que no se cuenta con los datos

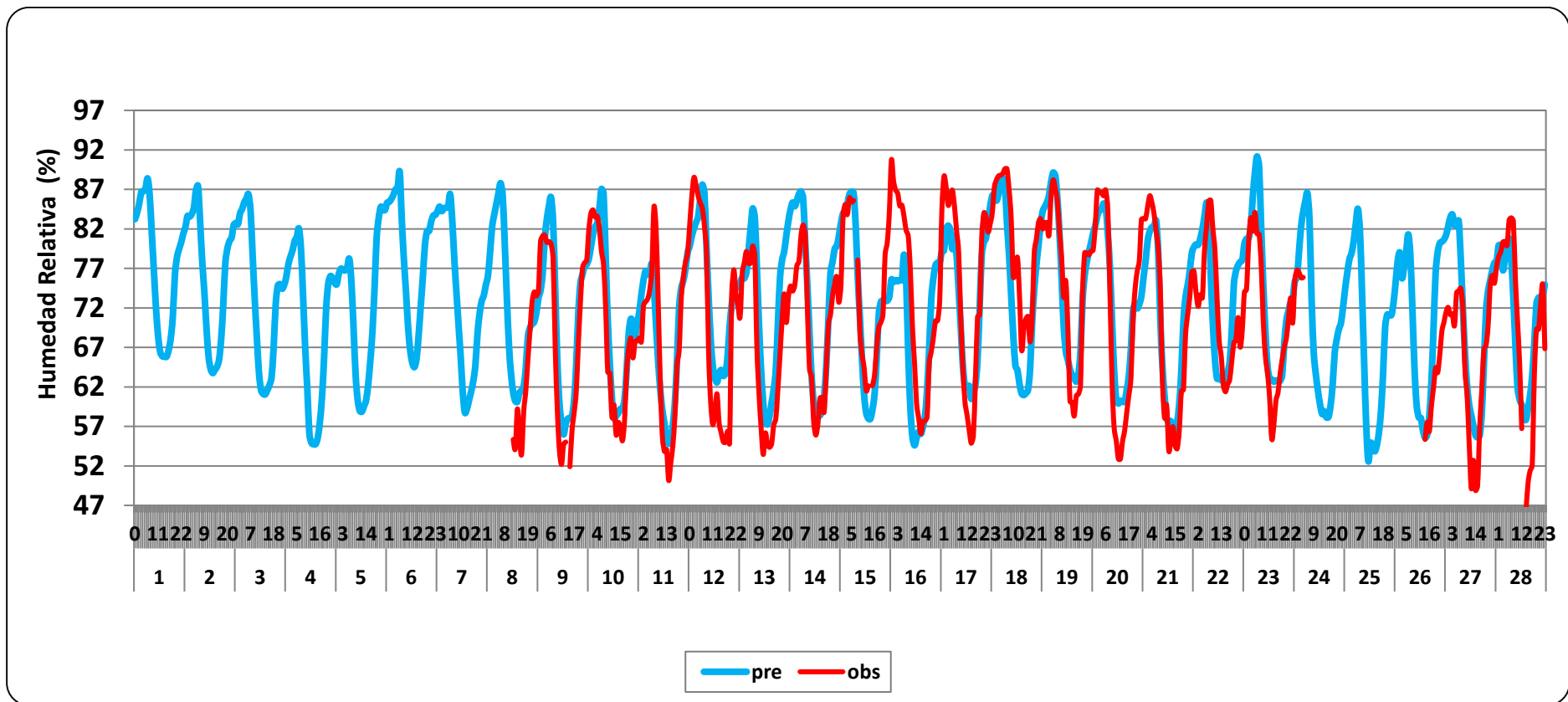


Figura 10 Variación horaria de la humedad relativa observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de Aire Huachipa.

5.3.1.5. Estación de Calidad de Aire – Puente Piedra

En la figura 11, se determina que el valor mínimo de la humedad relativa observada fue de 41.4% el cual se sintió el día 25 a las 3:00 p.m., mientras que el valor máximo fue de 90.3% que se dio el día 19 a las 5: 00 am; en cuanto al valor mínimo de la humedad relativa simulada fue de 52. 58% que se presenció el día 25 a las 11:00 am, y el valor máximo fue de 91.2% en el día 23 a las 6:00 am, día en el que se presenta la temperatura cerca a la mínima determinada.

El número de horas medidas con los que se contó para el análisis fue de 663 el cual presenta el 98.66 del total de datos, el cual es muy representativa e importante para el análisis.

En el grafico se observa que ambos comportamientos de las horas medidas, tanto de los datos observados como de los simulados; son muy similares; lo que demuestra, que el modelo utilizado para la simulación de este parámetro.

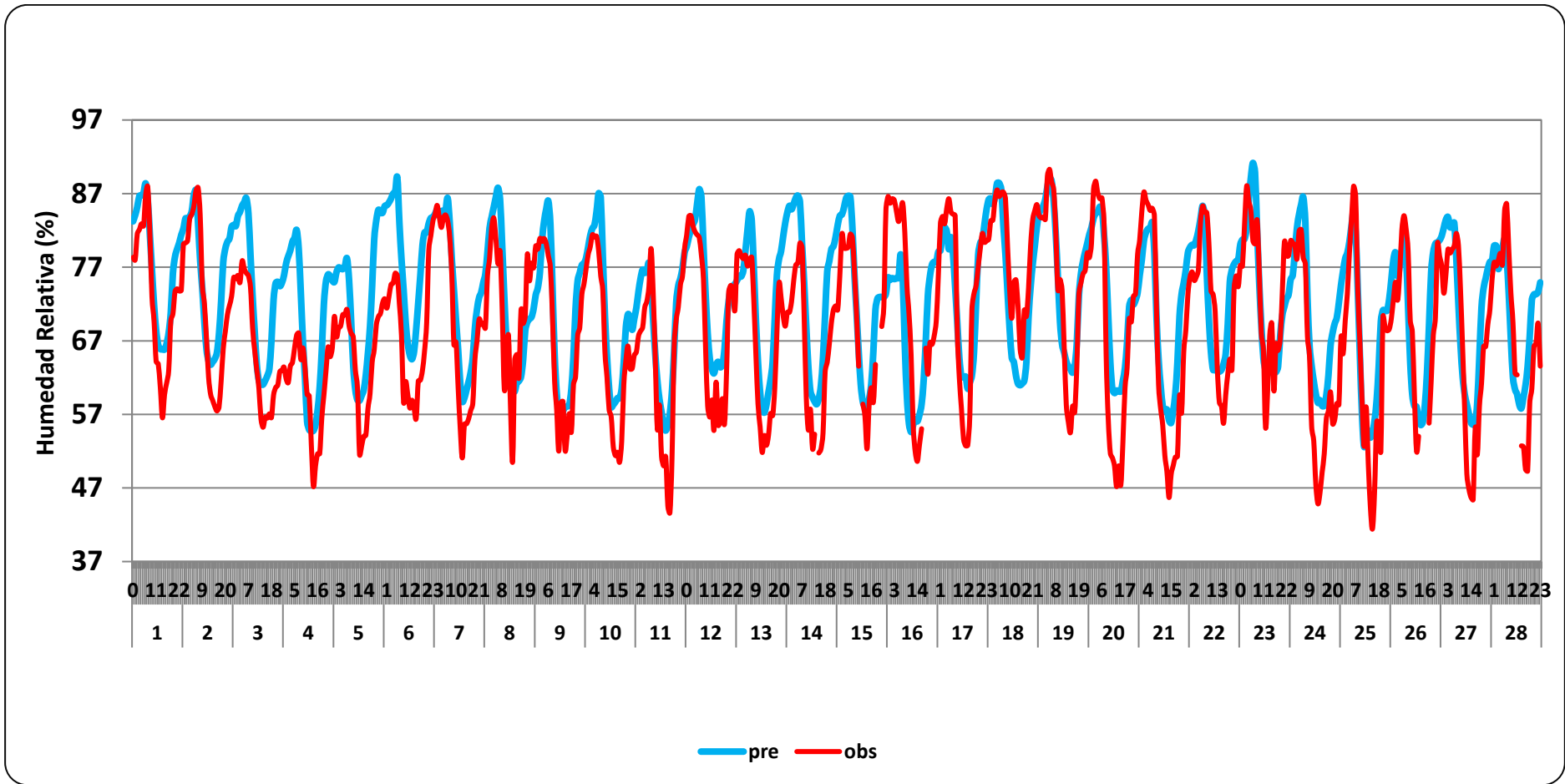


Figura 11 Variación horaria humedad relativa observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad del Aire para Puente Piedra.

5.3.1.6. Estación de Calidad de Aire – San Borja

En la Figura 12, valor mínimo de la simulación fue 60.50%, el cual se evidencio el día 25 a las 10:00 am mientras que para los datos observados fue de 54.2% el cual se manifestó el día 24 a las 3:00 pm, en donde se presenta uno de los días con alta temperatura. Mientras que el valor máximo simulado fue de 93.71% en el día 1 a las 6:00 am, donde se encuentra el menor valor de temperatura; mientras que para los datos observados fue de 98.9% en el día 23 a las 7:00 am, en donde se presenta uno de los días con menor temperatura.

Se puede observar que la variación horaria de la humedad relativa simulada se asemeja al comportamiento temporal de la humedad relativa observada; además se puede decir que el modelo realiza una subestimación de la variable meteorológica.

Se puede deducir que los valores observados poseen en su mayor proporción picos más altos, que los observados.

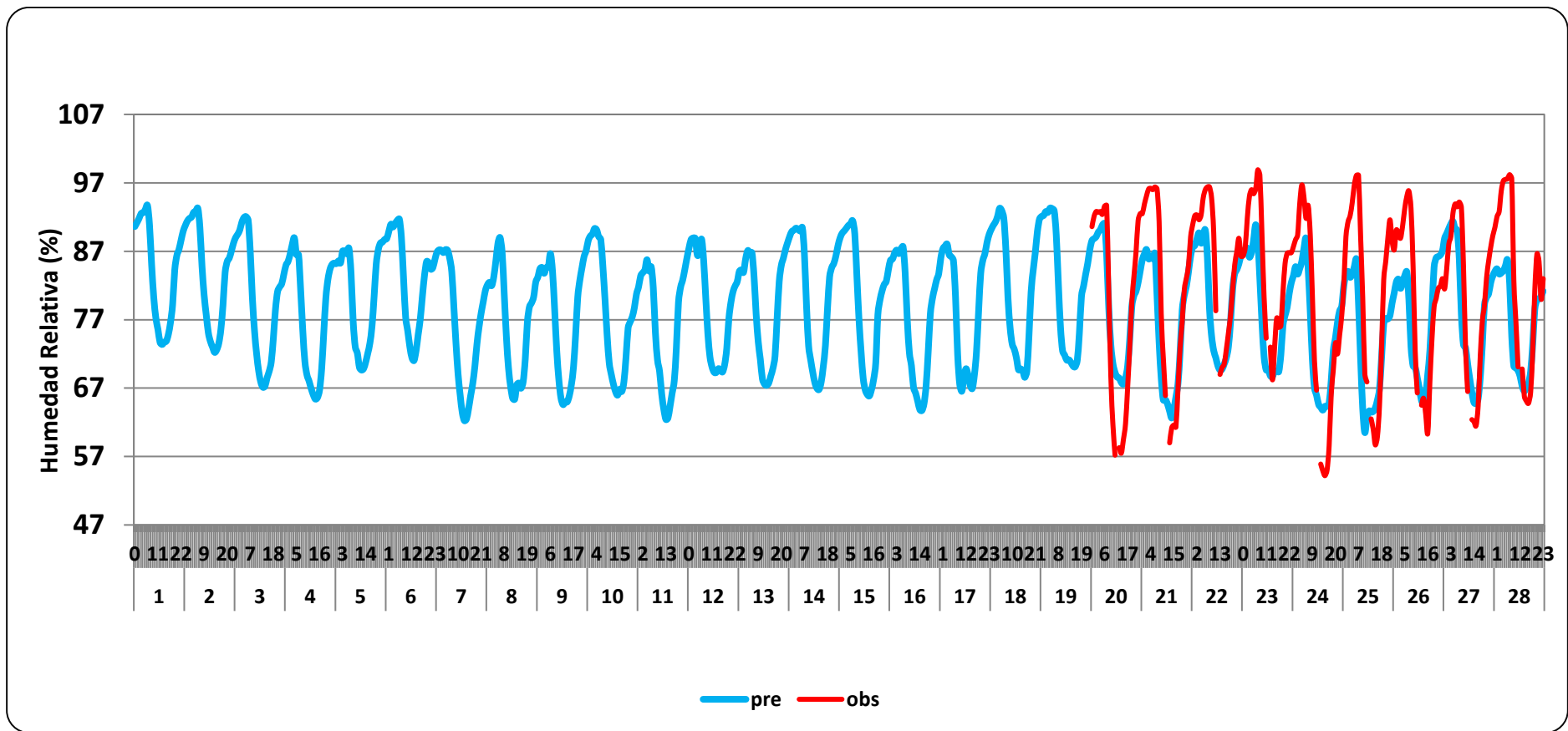


Figura 12 Variación horaria de la humedad relativa observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de Aire - San Borja.

5.3.1.7. Estación de Calidad de Aire – San Juan de Lurigancho

En la figura 13, valor mínimo simulados es de 55.09% el cual se dio el día 25 a las 11:00 am, en el cual se presentó la temperatura alta en el día mencionado. Mientras que el valor mínimo para los datos observados es de 44.4% del día 25 a las 3:00 pm, para ese día se reportó la temperatura alta (29.09 °C); en cuanto a los valores máximos simulados y observados, es de 95.19% al día 1 a las 6:00 am, en donde se presentó el día con menos temperatura y 89.3% el día 16 a las 0:00 am, respectivamente.

Como se puede observar en el grafico la variación horaria de la humedad relativa simulada son ligeramente mayores que los observados; pero el comportamiento de ambas series de tiempo es muy similar.

En este caso se obtuvo la mayor cantidad de datos observados mejorando así el análisis del comportamiento de los valores simulados.

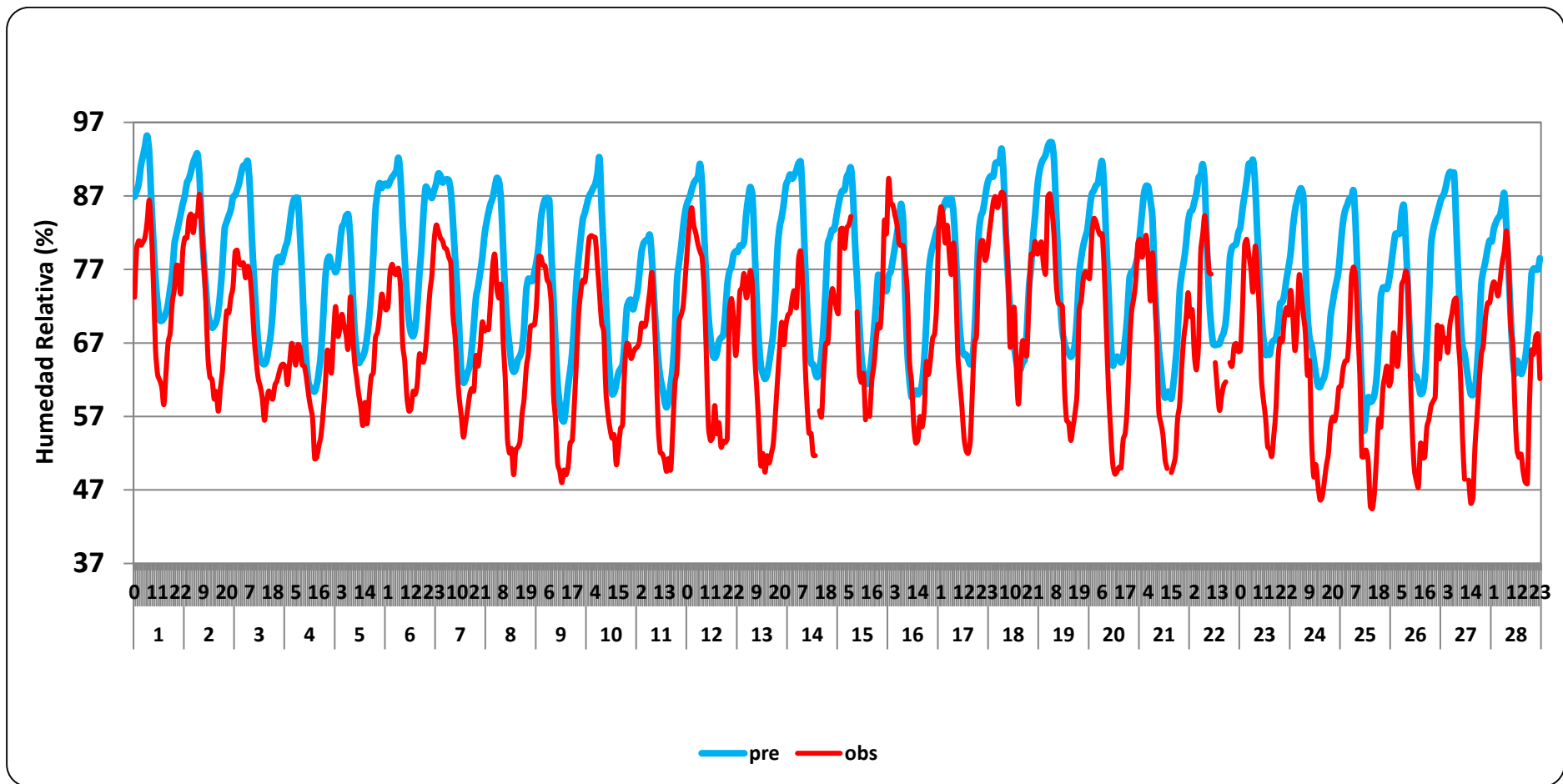


Figura 13 Variación horaria de la humedad relativa observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de Aire - San Juan de Lurigancho

5.3.2 *Temperatura (°C)*

5.3.2.1. *Estación de Calidad de Aire-Ate*

En la figura 14, se observa que la variación horaria de la temperatura simulada se asemeja al comportamiento temporal horaria de la temperatura observada en el mes de febrero de 2018.

En los datos observados la temperatura mínima fue de 19.9 °C el día 2 a las 2 de la mañana, y la temperatura simulada fue de 20.38 °C fue el día 2 a las 6:00 de la mañana, lo cual es correcto ya que, en las primeras horas del día, antes de la salida del sol, ocurre la temperatura es mínima; debido a la pérdida de energía que se produce durante las noches. Mientras que la temperatura del aire con mayor valor observados fue de 29.1 °C el cual se generó el día 17 a la 02: 00 de la tarde, mientras que la temperatura del aire simulados fue de 27.7 °C el día 11 a las 13:00 p.m

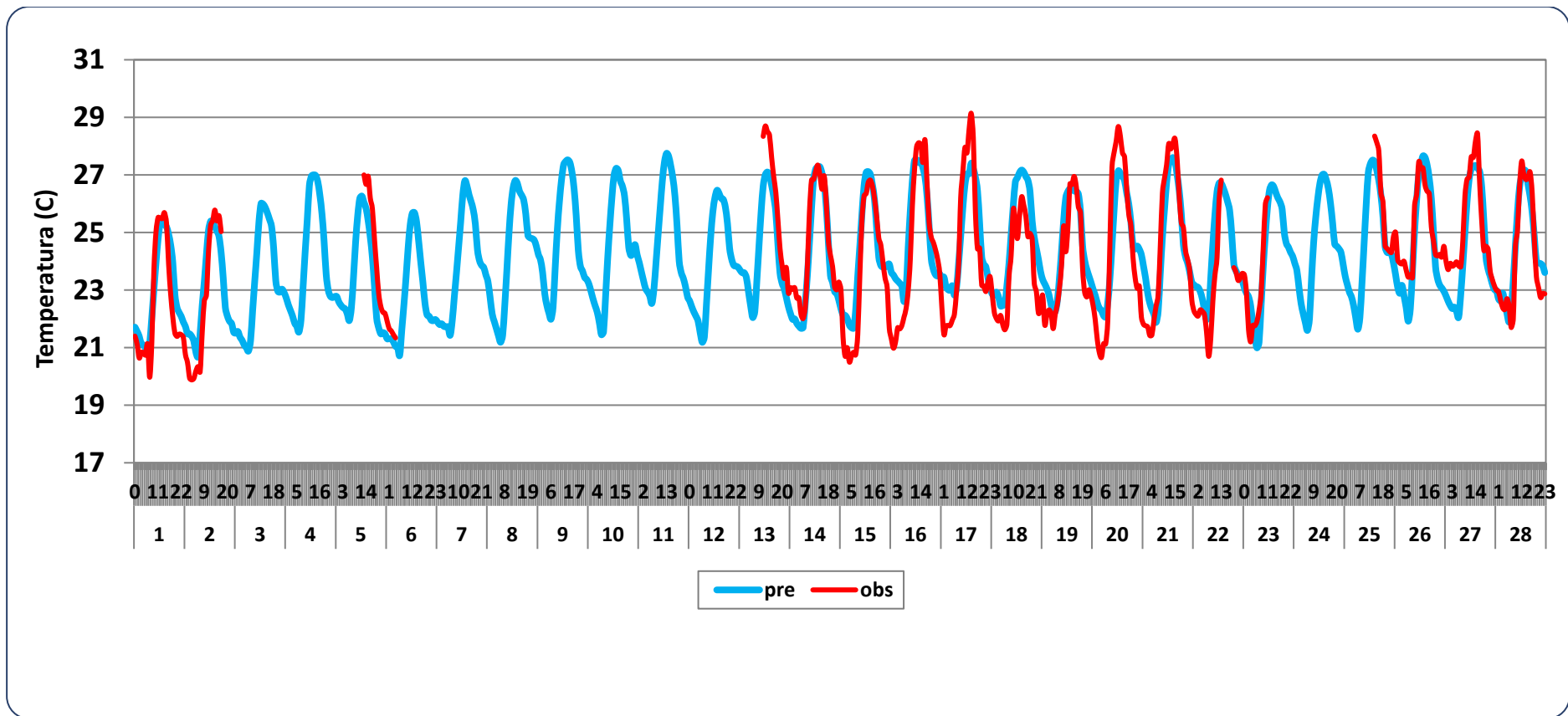


Figura 14 Variación horaria de la temperatura observada (color rojo) y simulada (color celeste) en la Estación Calidad de Aire de Ate

5.3.2.2. Estación de Calidad de Aire- Campo de Marte

La figura 15, muestra que la variación horaria de la temperatura simulada se asemeja al comportamiento temporal horaria de la temperatura observada, con una ligera sobreestimación de este parámetro meteorológico.

En los datos observados la temperatura mínima fue de 19.0 °C el día 28 a las 7 de la mañana, y la temperatura simulada fue de 20.83 °C fue el día 2 a las 6:00 de la mañana, lo cual se encuentra representado de manera correcta, ya que horas antes de la puesta del sol, las temperaturas son mínimas, debido a la pérdida de energía que se realiza durante las noches por parte de la superficie terrestre. Mientras que las temperaturas con mayor valor observados fueron de 29.4 °C el cual se generó el día 13 a la 11: 00 de la mañana, mientras que la concentración simulada fue de 27.47 el día 09 a las 13:00 p.m.

Cabe recalcar que se contó con solo 376 horas medidos de temperatura, del total de 672 horas; esto representa un 55.95%.

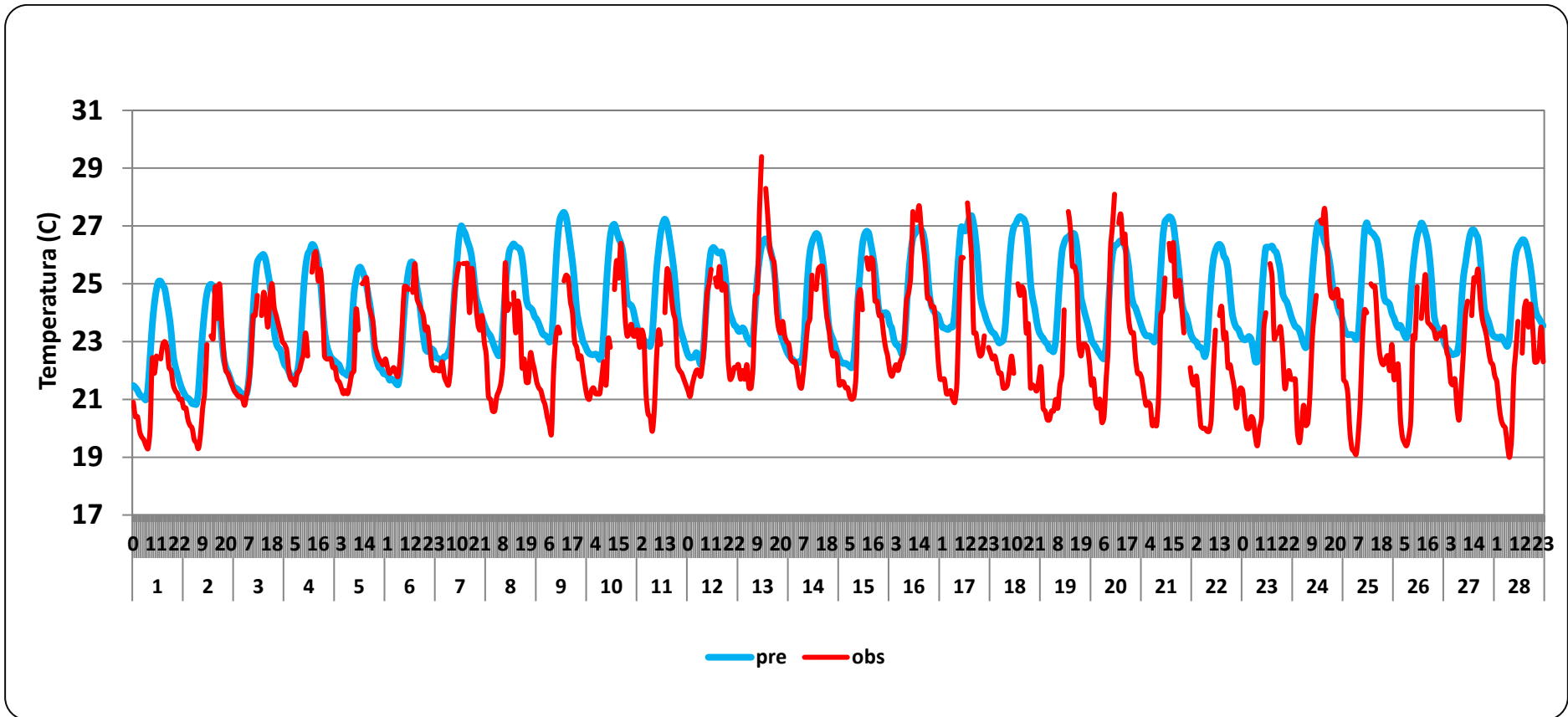


Figura 15 Variación horaria de temperatura observada (rojo) y simulada (celeste) para la Estación Calidad de aire en la Estación de Campo de Marte

5.3.2.3. Estación de Calidad de Aire – Carabayllo

En la figura 16 se observa que la variación horaria de la temperatura simulada se asemeja al comportamiento temporal horaria de la temperatura observada.

En los datos observados la temperatura mínima fue de 20.3 °C el día 2 a las 6 de la mañana, y la temperatura simulada fue de 20.47 °C fue el día 1 a las 6:00 de la mañana, lo cual se encuentra representado de manera correcta, ya que horas antes de la puesta del sol, las temperaturas son mínimas, debido a la pérdida de energía que se realiza durante las noches por parte de la superficie terrestre. Mientras que las temperaturas con mayor valor observados fueron de 29.7 °C el cual se generó el día 27 a la 14: 00 de la tarde, mientras que el valor de la temperatura de simulados fue de 28.06 el día 11 a las 13:00 p.

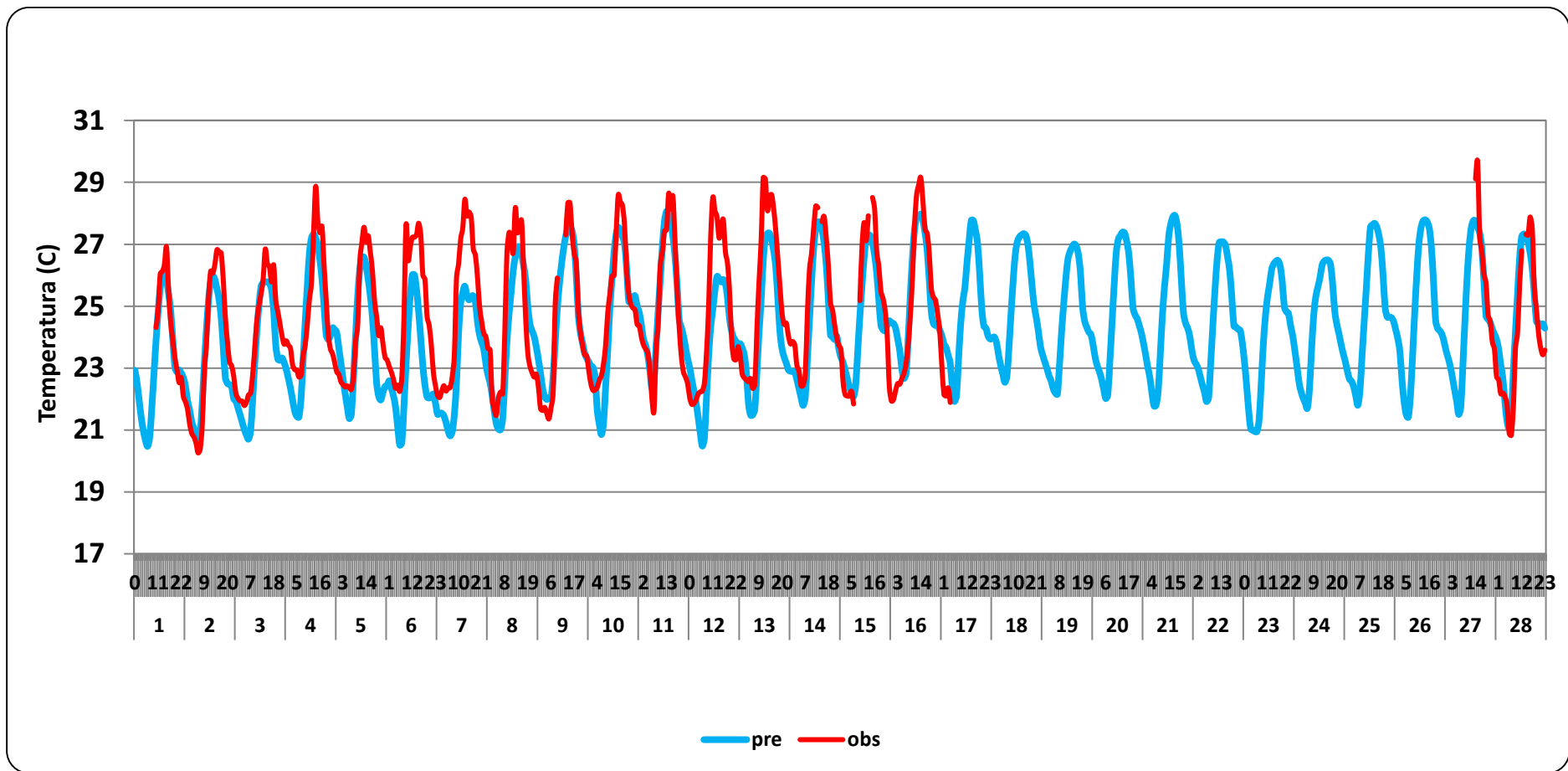


Figura 16 Variación horaria de la temperatura observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de aire de Carabayllo

5.3.2.4. Estación de Calidad de Aire – Huachipa

En la figura 17, se observa que la variación de la temperatura simulada se asemeja al comportamiento temporal horaria de la temperatura observada, lo cual demuestra que la simulación realizada por el modelo es de manera correcta para la variable meteorológica.

En los datos de la simulación se obtiene como temperatura mínima de 20.68°C para el día 11 a las 1 de la tarde, y la temperatura mínima observada fue de 20.00 °C para el día 24 a las 4:00 de la mañana. Mientras que las temperaturas con mayor valor observados fueron de 28.41 °C el cual se generó el día 17 a la 12: 00 de la tarde, mientras que la temperatura máxima simulada fue de 27.74 el día 11 a las 13:00 p.m.

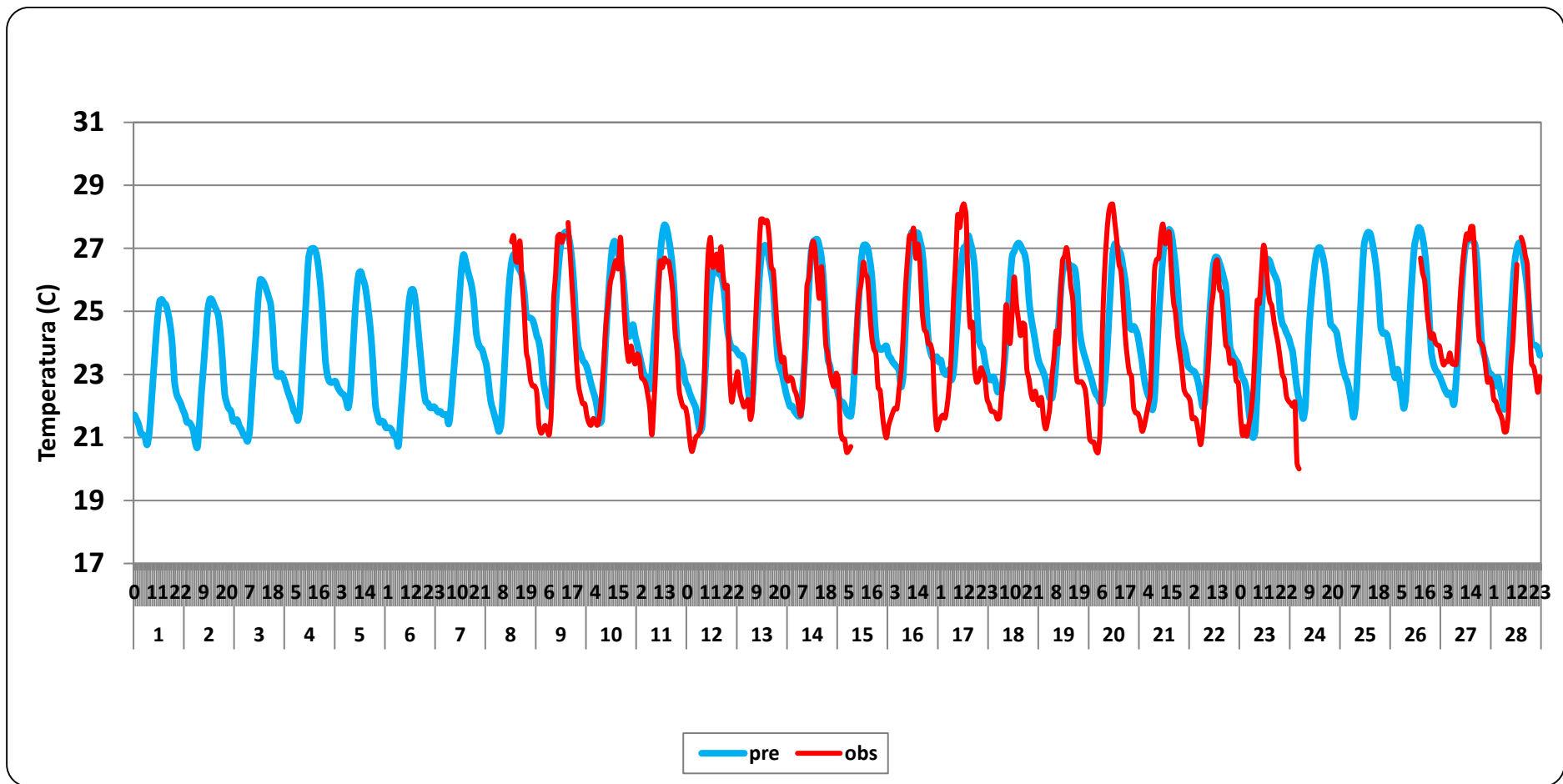


Figura 17 Variación horaria de la temperatura observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de Aire para Huachipa

5.3.2.5. Estación de Calidad de Aire – Puente Piedra

En la figura 18 se observa que la variación horaria de la temperatura simulada se asemeja al comportamiento temporal horaria de la temperatura observada, aunque cabe recalcar que los valores observados demuestran en mayor proporción, picos más altos y con valores mayores con los simulados.

En los valores observados la temperatura mínima fue de 19.60 °C el día 1 a las 6 de la mañana, y la temperatura simulada fue de 19.73 °C fue el día 1 a las 6:00 de la mañana. Mientras que la temperatura con mayor valor observados fue de 31.1 °C el cual se generó el día 27 a la 7:00 am, mientras que el valor de la temperatura simulada fue de 28.38 °C el día 1 a las 6:00 a.m.

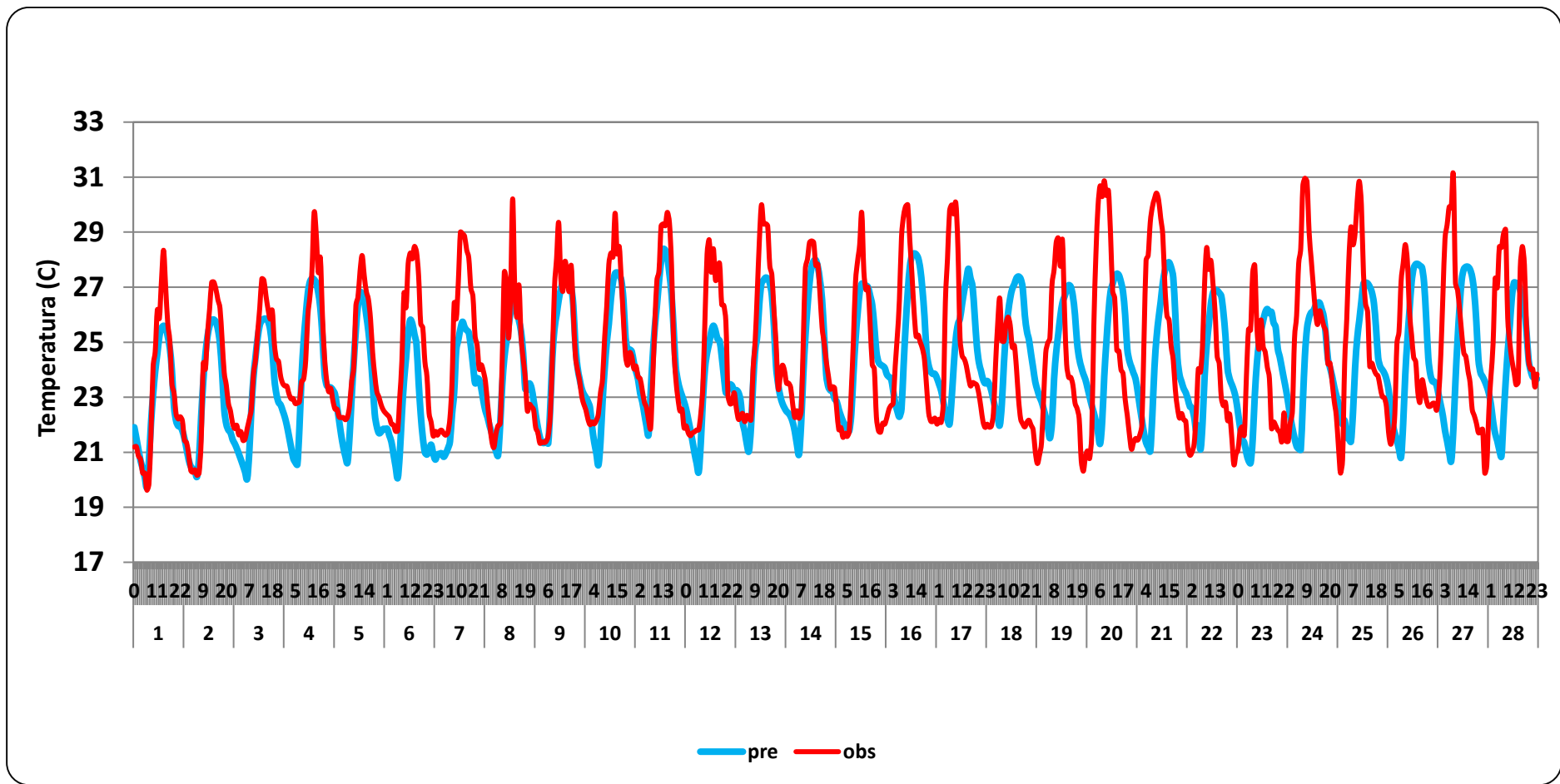


Figura 18 Variación horaria de la temperatura observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de Aire para Puente Piedra

5.3.2.6. Estación de Calidad de Aire – San Borja

En la Figura 19, se observa que la variación temporal horaria de la temperatura simulada, posee valores menores que los observados, como se observa en la figura estos valores, no realizan un comportamiento temporal horaria similar a lo que refleja los datos observados.

En los datos observados la temperatura mínima fue de 19.6 °C el día 28 a las 7:00 de la mañana, y la temperatura simulada fue de 17.77 °C fue el día 25 a las 10:00 de la mañana. Mientras que las temperaturas con mayor valor observados fueron de 30.3 °C el cual se generó el día 20 a la 11: 00 de la mañana, mientras que el simulado fue de 21.17 el día 18 a las 23:00 p.m.

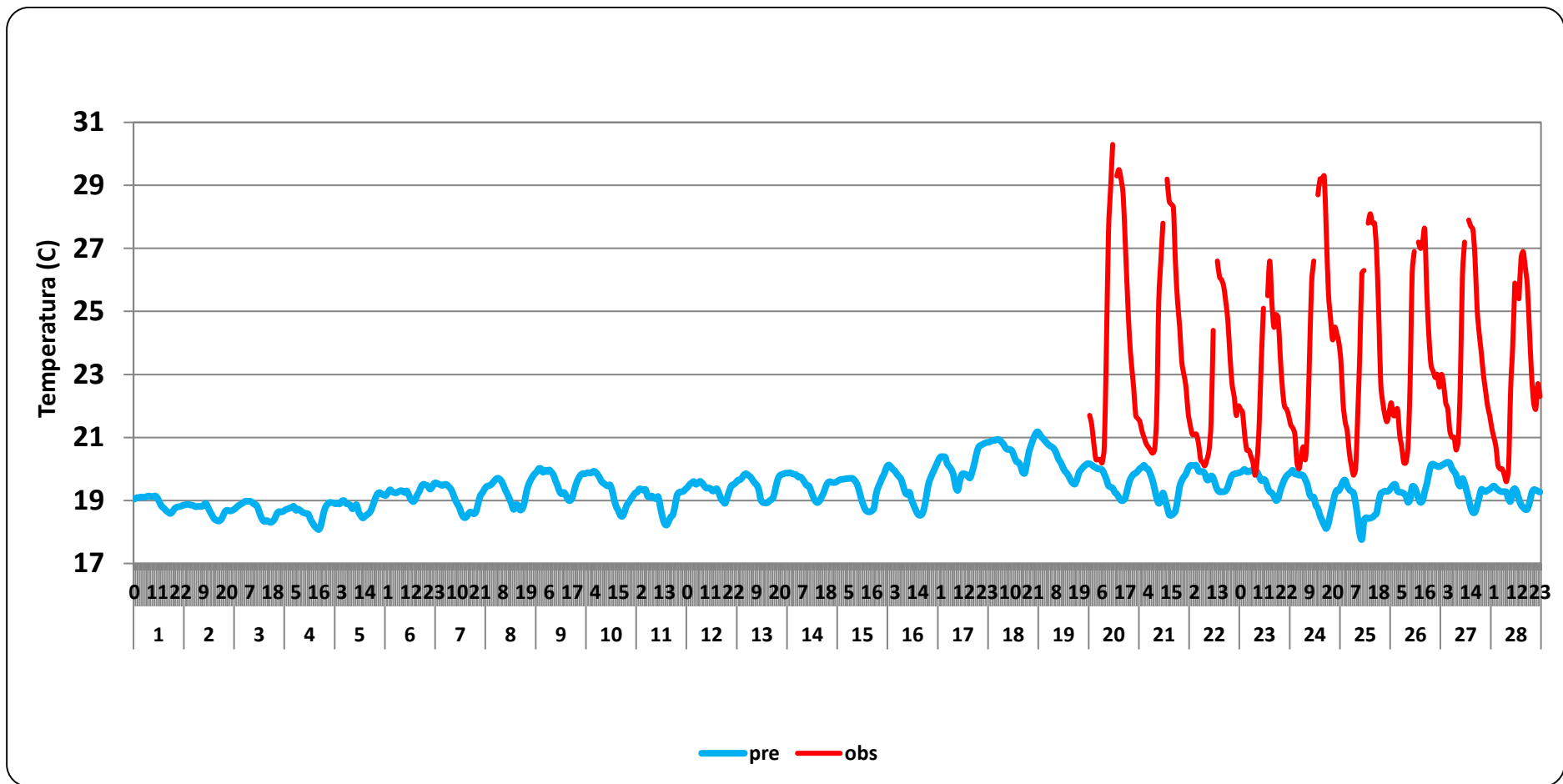


Figura 19 Variación horaria de la temperatura observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de aire - San Borja

5.3.2.7. Estación de Calidad de Aire – San Juan de Lurigancho

En la figura 20, se observa que la variación temporal de la temperatura simulada se asemeja al comportamiento temporal horaria de la temperatura observada, aunque, los datos observados muestran una mayor cantidad de picos altos, en comparación de los datos observados.

Se observa que los datos observados son mayores que los simulados, concluyendo así que la simulación subestima este parámetro.

En los datos observados la temperatura máxima fue de 29.7 °C en los días 20 y 27 a las 11 de la mañana y 3: 00 de la tarde, respectivamente, y la temperatura simulada fue de 26.85 °C fue el día 9 a la 1:00 de la tarde. Mientras que las temperaturas con menor valor observados fueron de 20.4 °C el cual se generó el día 1 a la 7: 00 de la mañana, mientras que la temperatura mínima simulados fue de 19.49 el día 1 a las 6:00 a.m.

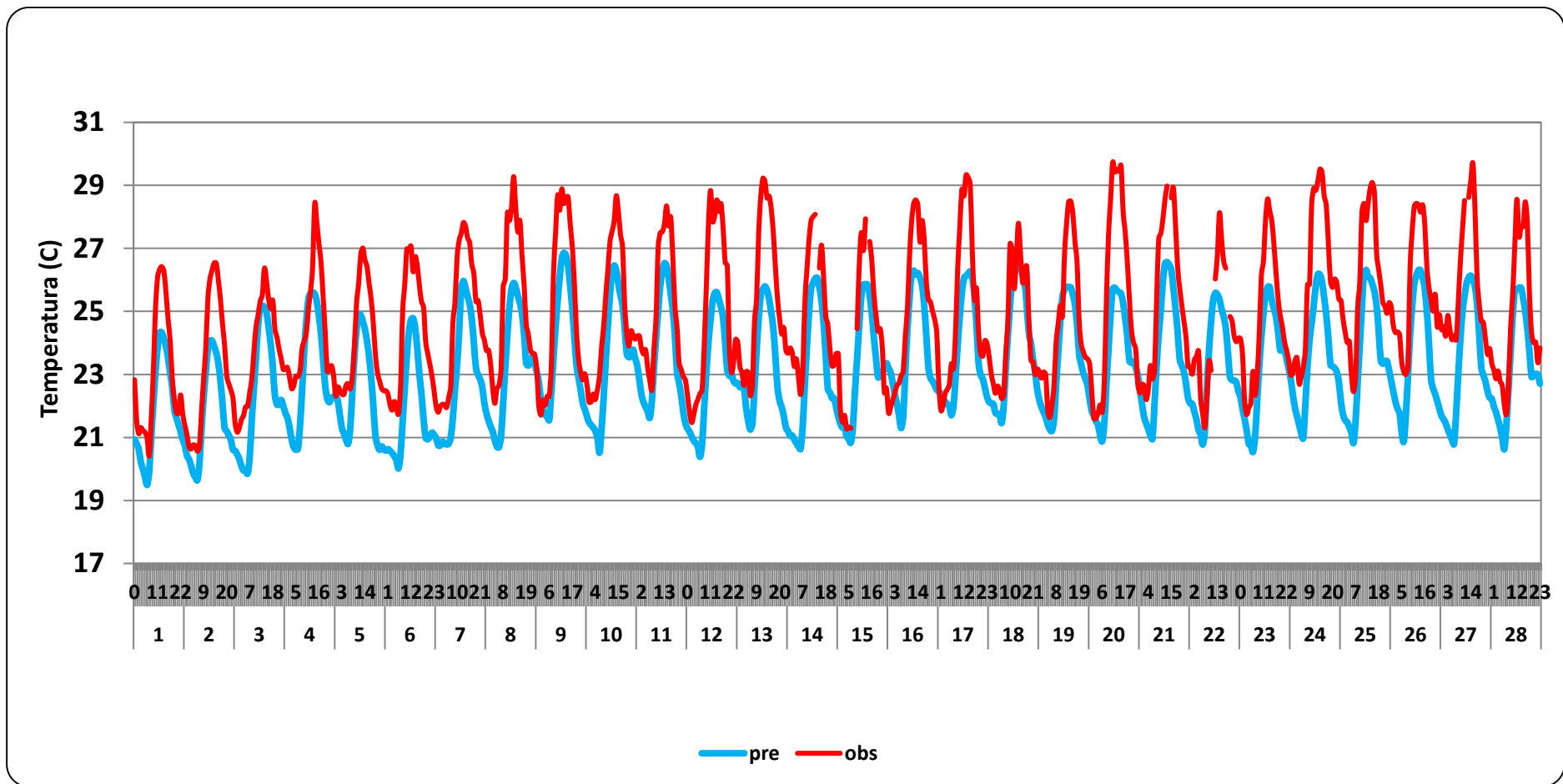


Figura 20 Variación horaria de la temperatura observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de Aire - San Juan de Lurigancho

5.3.3. *Velocidad del Viento (m/s)*

5.3.3.1. *Estación de calidad del Aire-Ate*

En la figura 21, se observa que la variación horaria de la velocidad simulada sobreestima al comportamiento de la variación temporal horaria de la velocidad del viento observada en el mes de febrero de 2018.

En los valores observados la velocidad del viento mínima fue de 0.1 m/s el día 21 a las 5 de la mañana, y la velocidad del viento simulada fue de 0.1350 m/s fue el día 3 a las 7:00 de la mañana. Mientras que la velocidad de viento con mayor valor observados fue de 2.99 m/s el cual se generó el día 26 a la 01:00 de la tarde, mientras que el valor de la velocidad del viento simulado fue de 7.44 m/s el día 11 a las 3:00 p.m

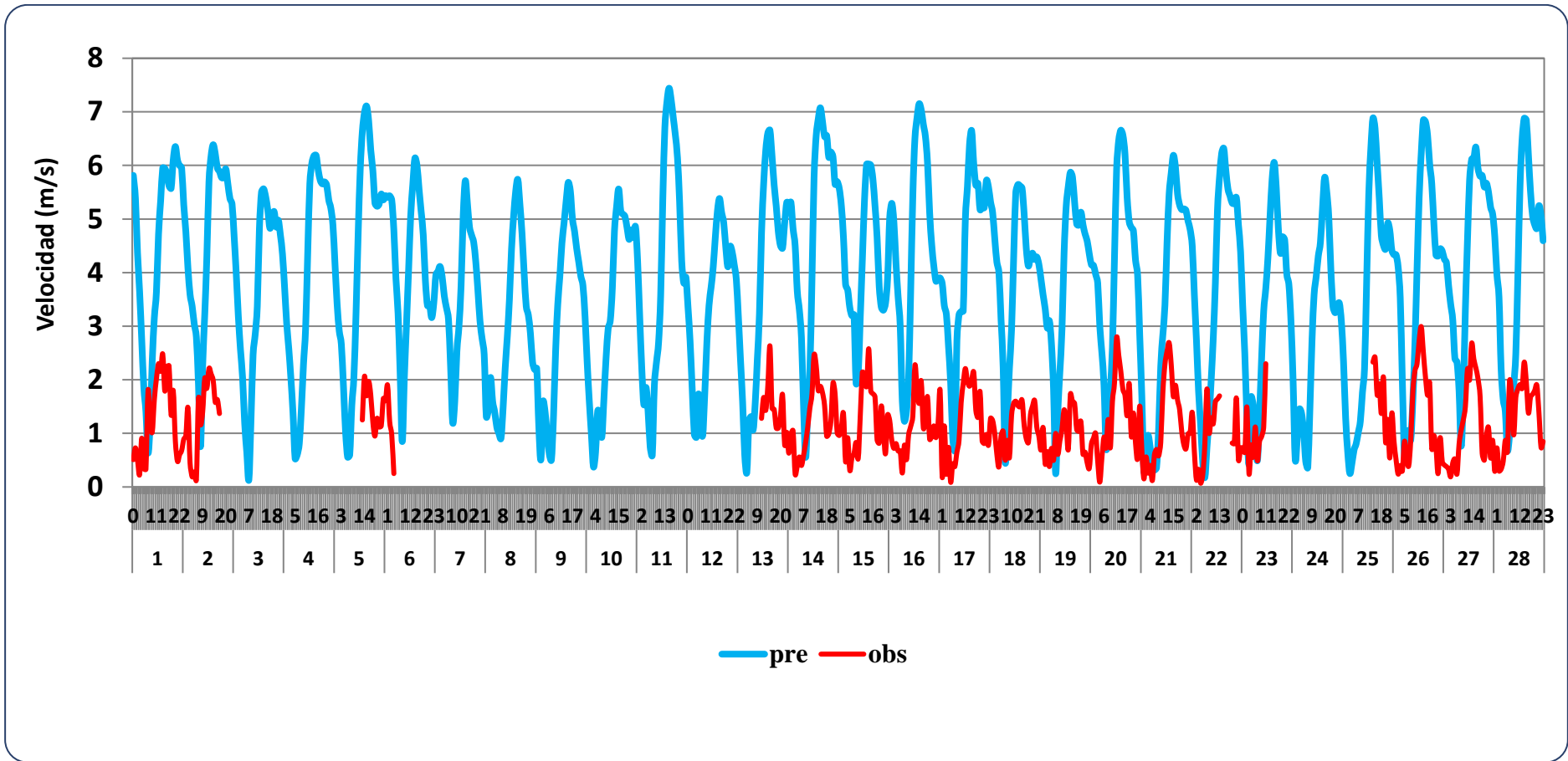


Figura 21 Variación horaria de la velocidad del viento observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad del aire - Ate

5.3.3.2. Estación de Calidad del Aire – Campo de Marte

En la figura 22, se observa que la variación horaria de la velocidad del viento simulada sobreestima al comportamiento de la variación temporal horaria de la velocidad del viento observada.

En los valores observados la velocidad del viento simulada mínima fue de 0.1 m/s en los días 10,16,18,19, 20 y 24 a las 6:00 am, 4: 00 am, a las 10:00 pm, a las 5:00 am, a las 5:00-6:00 am y a la 1:00 am; respectivamente. La velocidad de viento simulada fue de 0.3 m/s fue el día 21 a las 8:00 de la mañana. Mientras que los valores mayores de la velocidad simulada fueron de 6:00 m/s el cual se generó el día 11 a la 02:00 de la tarde, mientras que la el valor máximo de los valores observados fue de 6.5 m/s el día 4 a las 4:00 p.m.

Cabe recalcar que se contó con solo 376 horas medidos de la velocidad del viento, del total de 672 horas en febrero de 2018; esto representa un 55.95%.

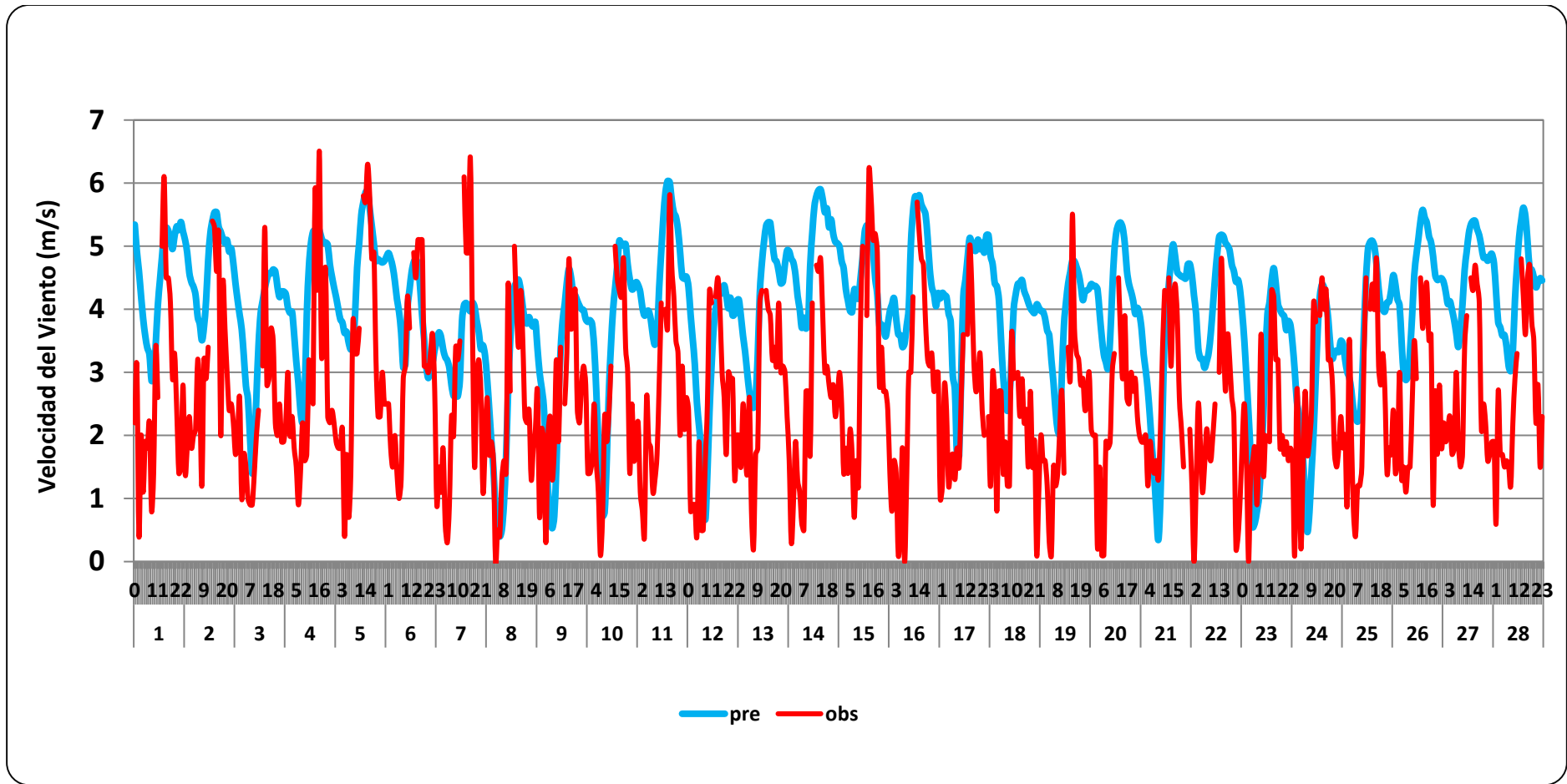


Figura 22 Variación horaria de la velocidad del viento observada (rojo) y simulada (celeste) para la Estación de Calidad del aire para Campo de Marte

5.3.3.3. Estación de Calidad de Aire – Carabayllo

En la figura 23, se observa que la variación horaria de la velocidad simulada sobreestima al comportamiento temporal horaria de la velocidad observada.

En los datos observados la velocidad máxima fue de 6.7 m/s en el día 28 a las 11:00 pm y la velocidad máxima simulada fue de 7.6 m/s fue el día 11 a las 4:00 de la tarde. Mientras que la velocidad del viento con menor valor simulados fue de 0 m/s el cual se generó el día 9 a la 06:00 de la mañana, mientras que el valor mínimo de los datos observados fue de 0.1 m/s los días 8, 9 y 16 manifestándose a las 4: 00 am, 5:00 am y las 07:00 am, respectivamente.

Como se observa en el gráfico los valores del modelo sobrevalua los resultados con respecto a los valores observad

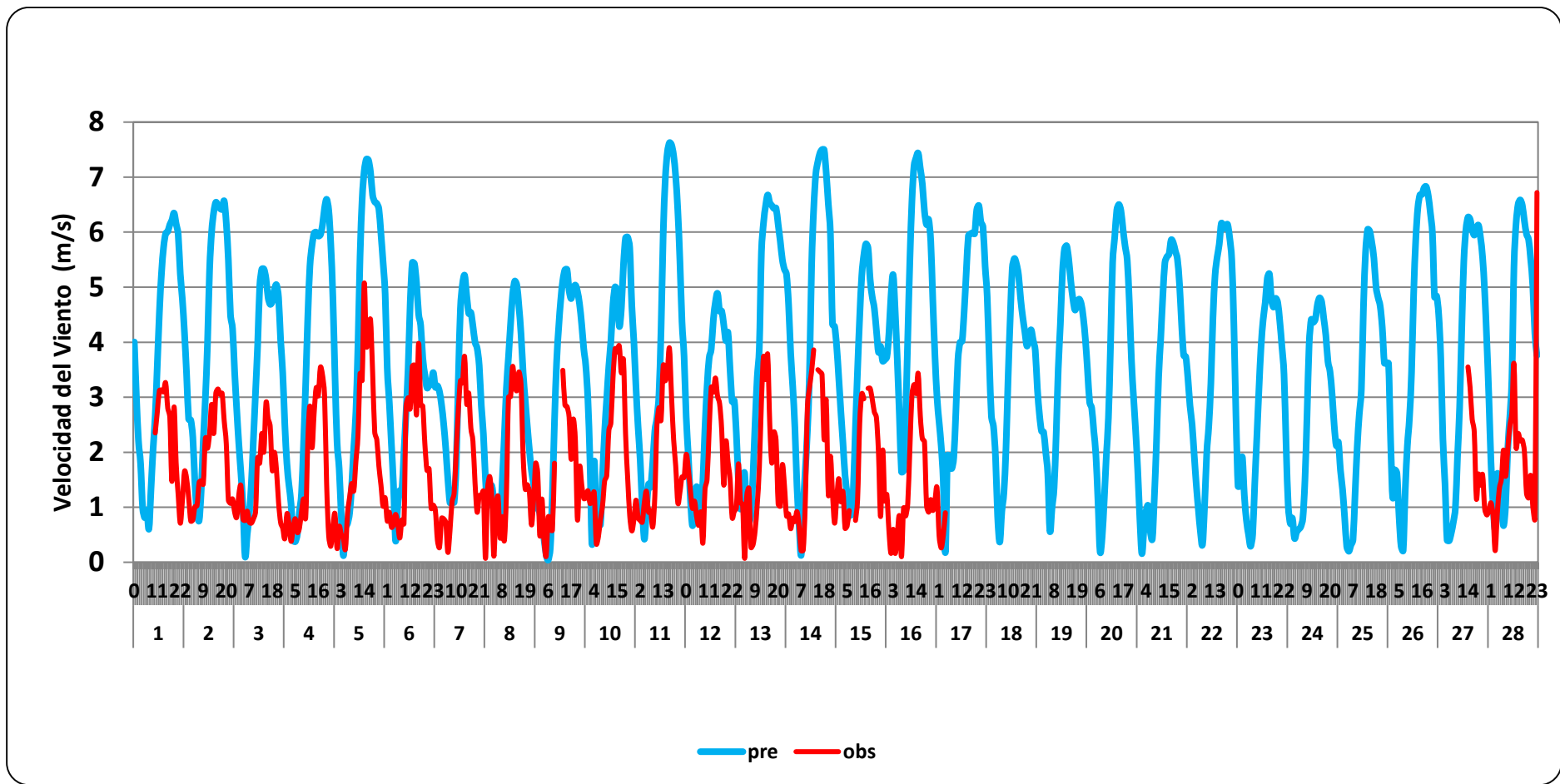


Figura 23 Variación temporal horaria de la velocidad del viento observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación calidad de aire de Carabayllo

5.3.3.4. Estación de Calidad de Aire – Huachipa

En la figura 24, se observa que la variación horaria de la velocidad simulada sobreestima al comportamiento temporal horaria de la velocidad observada.

En los datos observados la velocidad máxima fue de 5.24 m/s en el día 8 a las 02:00 pm y la velocidad máxima simulada fue de 7.44 m/s fue el día 11 a las 3:00 de la tarde. Mientras que la velocidad con menor valor simulados fue de 0.13 m/s el cual se generó el día 3 a la 07:00 de la mañana, mientras que la el valor mínimo de los datos observados fue de 0.03 m/s los días 10 y 16 manifestándose a las 06:00 am, en ambos casos.

Se puede concluir que el modelo no realiza la predicción de la velocidad, de manera correcta; pues todos los valores son mayores a los observados, a lo largo del mes de evaluació

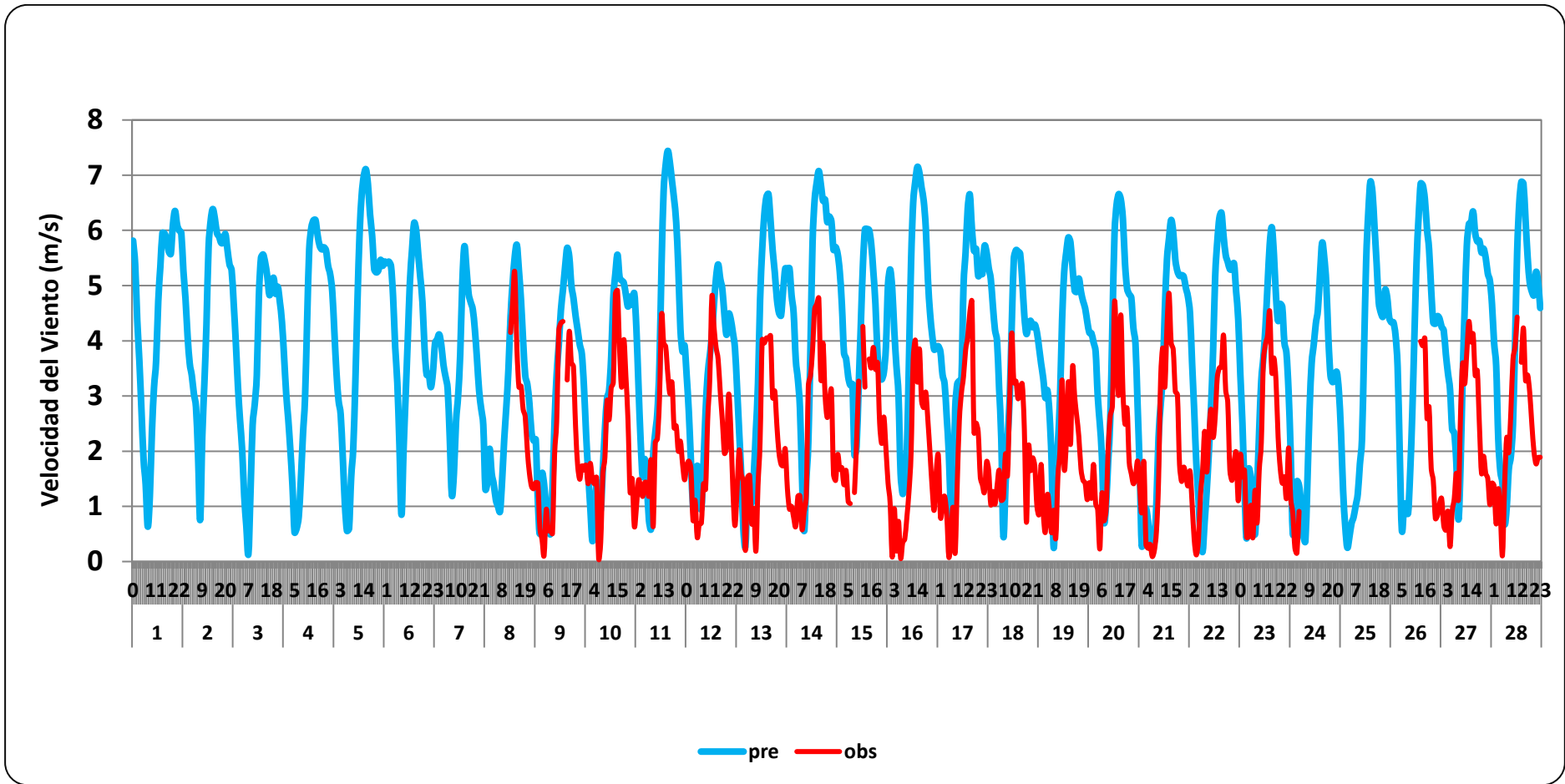


Figura 24 Variación horaria de la velocidad del viento observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de calidad de aire - Huachipa

5.3.3.5. Estación de Calidad de Aire – Puente Piedra

En la figura 25, se observa que la variación horaria de la velocidad simulada sobreestima al comportamiento temporal horaria de la velocidad observada.

En los datos observados la velocidad máxima fue de 4.8 m/s en el día 28 a las 12:00 pm y la velocidad máxima simulada fue de 6.9 m/s fue el día 8 a las 2:00 de la tarde. Mientras que la velocidad del viento con menor valor simulado fue de 0.1 m/s el cual se generó los días 10 y 16 a la 06:00 de la mañana en ambos casos. Mientras que el valor mínimo de los datos observados fue de 0.1 m/s los días 17,18, 19, 26 y 28 manifestándose a las 5: 00 am, 4:00 am, 0:00 am, 01:00 am y las 03:00 am, respectivamente.

Como se observa en el gráfico los valores del modelo sobrevalua los resultados con respecto a los valores observados, lo que demuestra que el modelo no realiza una representación considerable para el parámetro meteorológico, de la velocidad

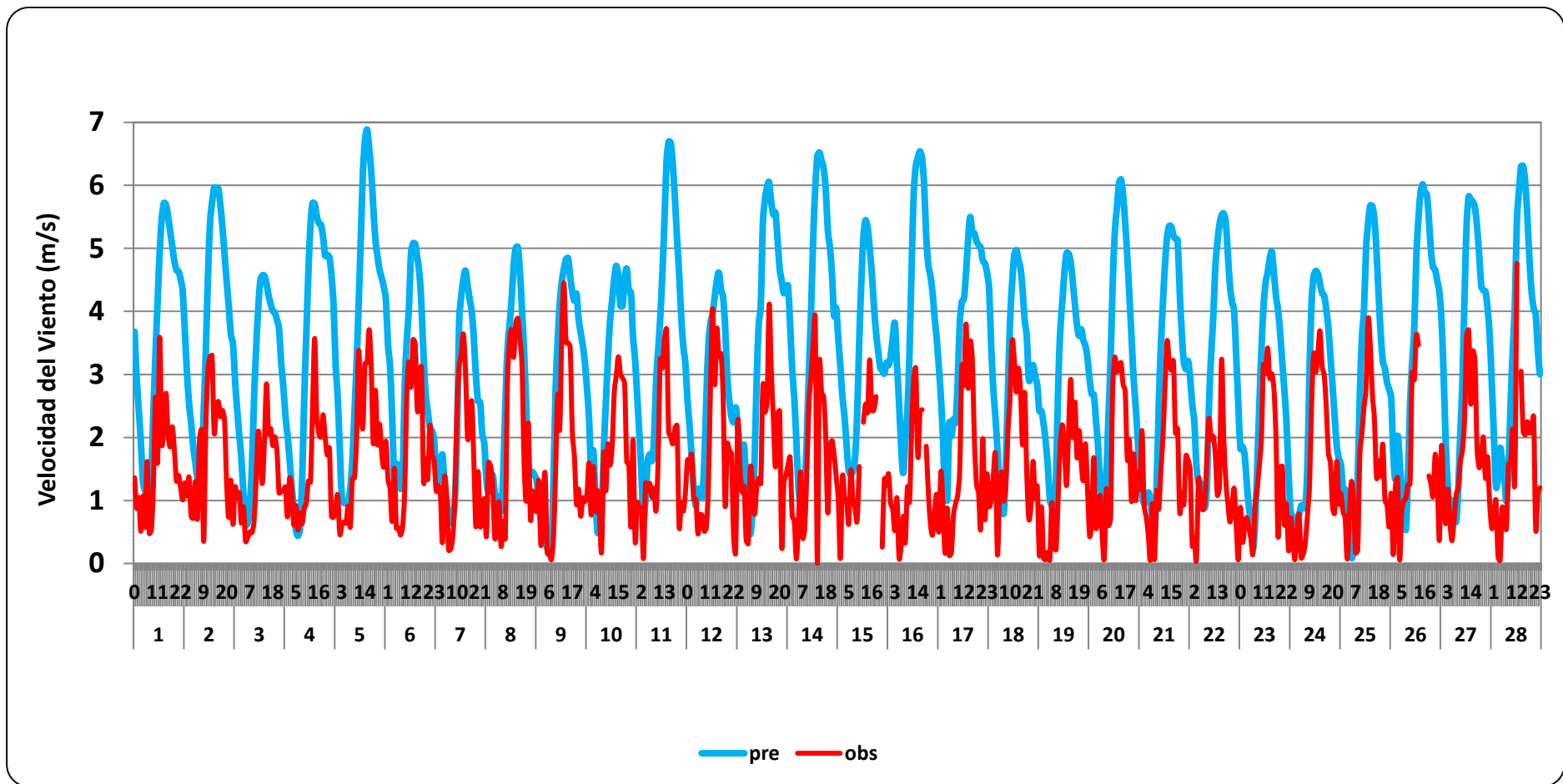


Figura 25 Variación horaria de la velocidad del viento observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad del Aire-Puente Piedra

5.3.3.6. Estación de Calidad de Aire – San Borja

En la figura 26, se observa que la variación horaria de la velocidad simulada sobreestima al comportamiento temporal horario de la velocidad observada, como se observa en el gráfico, ambas líneas se series de tiempo no realizan el mismo comportamiento.

En los datos observados la velocidad máxima fue de 3.2 m/s en el día 27 a las 17:00 pm y la velocidad del viento máxima simulada fue de 8.4 m/s fue el día 14 a las 15:00 de la tarde. Mientras que la velocidad con menor valor observado fue de 0.1 m/s el cual se generó los días 22 y 24 a las 02:00 y 05:00 de la mañana, respectivamente; mientras que la el valor mínimo de los datos simulados fue de 0.25 m/s el día 23 a las 7:00 am.

Como se observa en el gráfico los valores del modelo sobrevalua los resultados con respecto a los valores observad

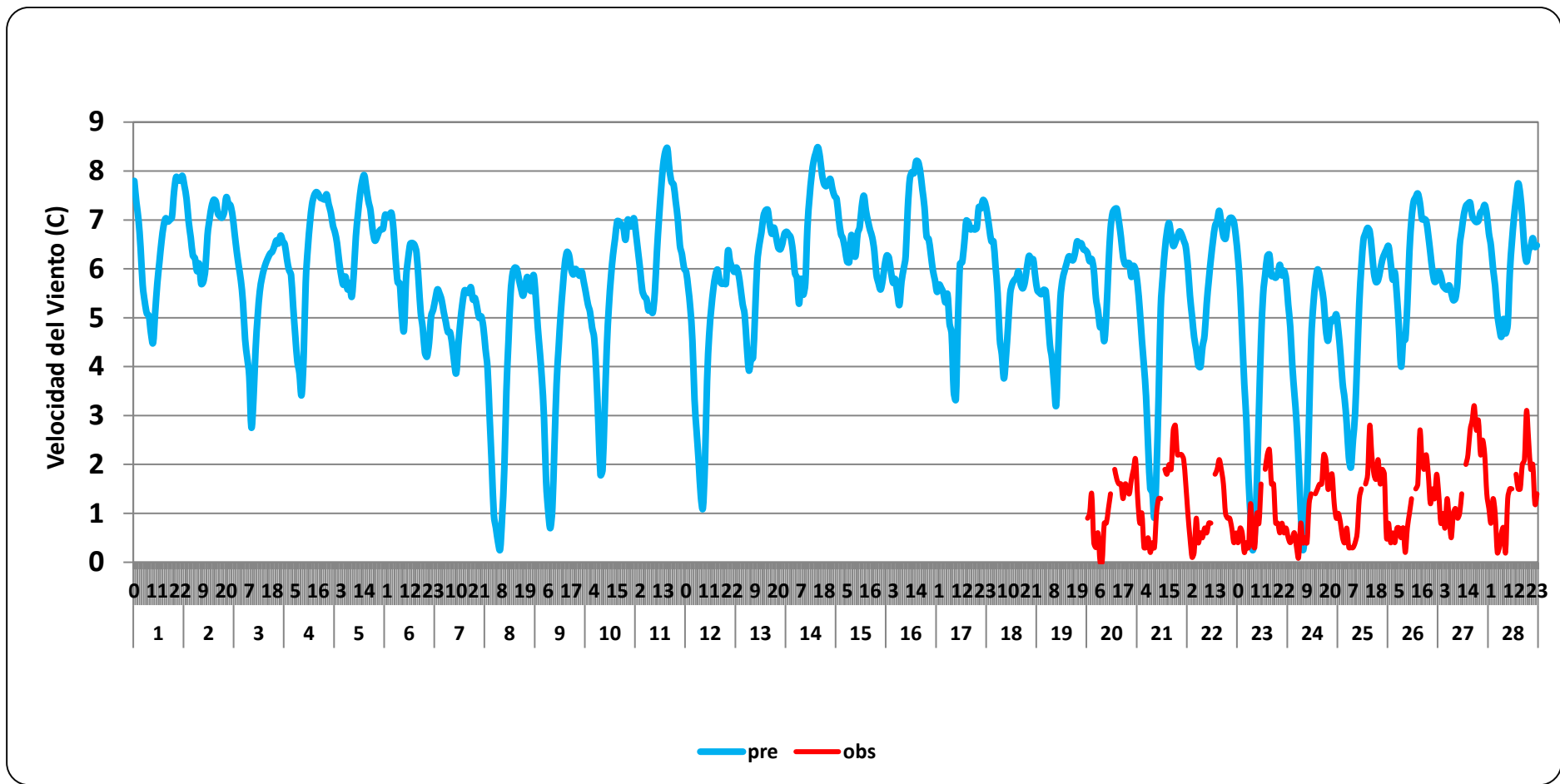


Figura 26 Variación horaria de la velocidad del viento observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de Aire - San Borja

5.3.3.7. Estación de Calidad del Aire – San Juan de Lurigancho

En la figura 27, se observa que la variación horaria de la velocidad simulada sobreestima al comportamiento temporal horaria de la velocidad observada, a lo largo del periodo de evaluación.

En los datos observados la velocidad máxima fue de 4.89 m/s en el día 14 a las 03:00 pm y la velocidad máxima simulada fue de 7.9 m/s fue el día 11 a las 3:00 de la tarde. Mientras que la velocidad del viento con menor valor simulados fue de 0.08 m/s el cual se generó el día 23 a la 07:00 de la mañana, mientras que la el valor mínimo de los valores observados fue de 0.08 m/s los días 5 y 19 manifestándose a las 06:00 am y 7:00 am respectivamente.

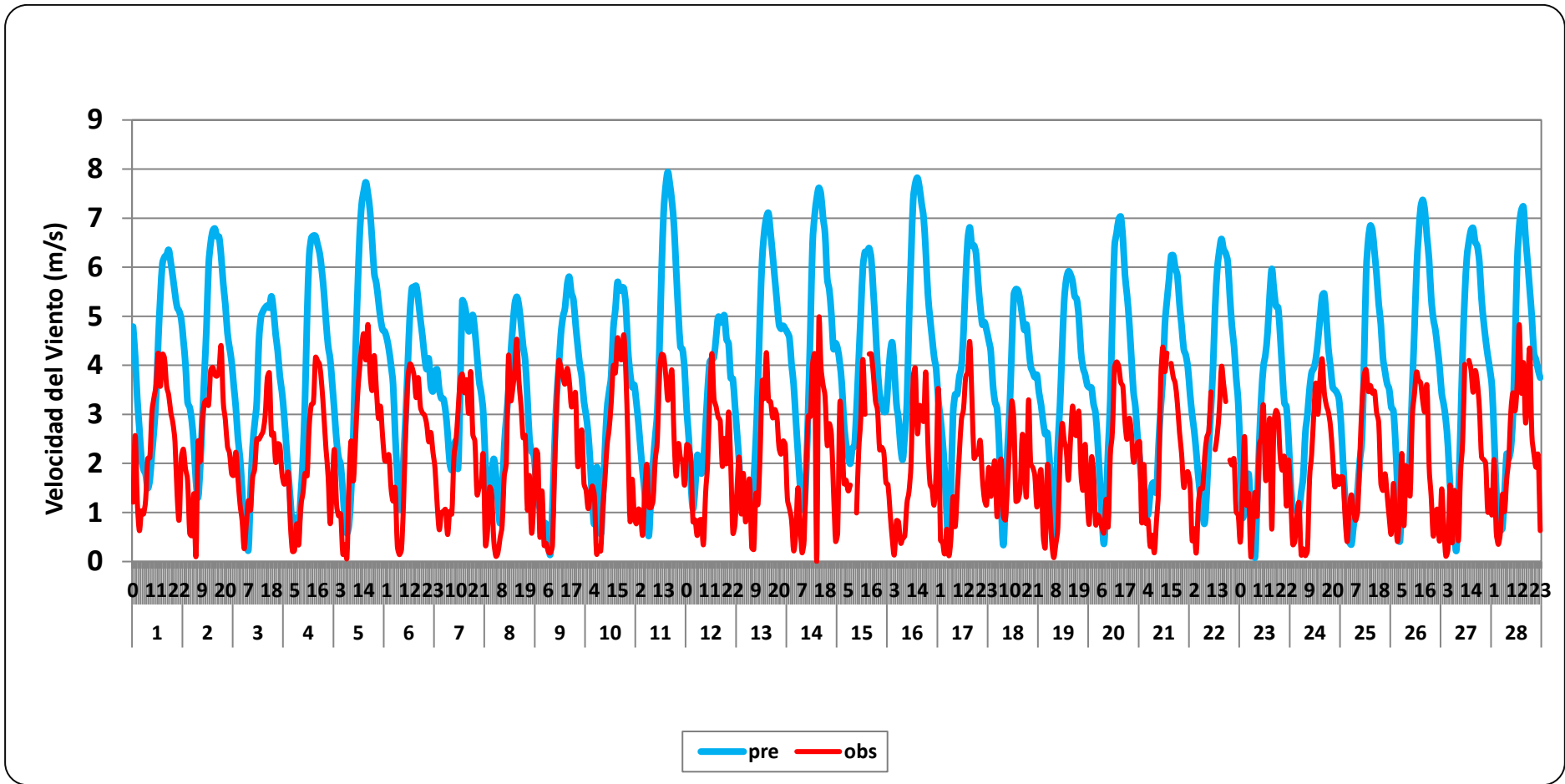


Figura 27 Variación horaria de la velocidad del viento observada (color rojo) y simulada (color celeste) para la Estación de Calidad de Aire - San Juan de Lurigancho

VI. DISCUSIÓN

- Para el objetivo general: *Determinar la correlación entre el material particulado y las variables meteorológicas utilizando el modelo WRF-CHEM en Lima Metropolitana en él es de febrero del 2018*; se obtuvo lo siguiente: Para la estación de Campo de Marte la correlación de PM10 (simulado) y PM2.5 (simulado y observado) la relación que poseen con la temperatura tanto simulada como observada es negativa; sin embargo, para el PM10 (observado) la correlación es positiva. En el estudio realizado por Guillen (2018) determina que la correlación entre la temperatura diurna y PM10 y PM2.5 es negativa; mientras que en el horario nocturno esta variable meteorológica posee una relación positiva con PM10 y PM2.5. La correlación entre el material particulado PM10 y la temperatura es negativa e inversa; es decir, que mientras la temperatura aumente la concentración de material particulado disminuye (Sánchez & Bautista, 2019). La velocidad del viento para PM10 (simulado) y PM2.5 (simulado y observado) posee una correlación negativa. En el estudio realizado por Guillen (2018) determina que la correlación entre la velocidad diurna y PM10 y PM2.5 es negativa; mientras que en el horario nocturno esta variable meteorológica posee una relación positiva con PM10 y PM2.5. La humedad relativa simulada y observada posee una correlación negativa con PM10 observado, en el estudio realizado por Navarro (2019) la correlación que se obtiene que la correlación negativa tiene un valor de -3. Mientras que para PM10 (simulado) y PM2.5 (observado y simulado) la correlación es positiva y por último la correlación de PM10 (simulado y observado) con PM2.5 (simulado y observado) es positiva.

Para la estación de Puente Piedra la correlación de PM10 y PM2.5 (simulado) con temperatura simulada y observada es negativa. Para PM10 y PM2.5 (simulado y observado) poseen una correlación positiva; en el estudio realizado por Guillen (2018) determina que en el periodo diurno se aprecia una correlación negativa entre la temperatura del aire con PM10 y PM2.5; en el periodo nocturno se presenta una correlación positiva entre la temperatura del aire y PM10; mientras que para PM2.5 la correlación es negativa. Para la variable meteorológica de velocidad del viento la correlación que se presenta es negativa para PM10 (simulada y observado) y PM2.5

(simulado y observado). Guillen, 2019; determina que en el periodo diurno se aprecia una correlación negativa entre la velocidad del viento y PM10 y PM2.5; mientras que para el periodo nocturno posee una correlación positiva con PM10, pero la correlación sigue siendo negativa para PM2.5. La correlación entre PM10 y PM2.5 es positiva para todos los casos. Otro estudio realizado en el 2019, determina que la relación entre la humedad relativa y PM10 posee una correlación positiva muy baja (Sánchez & Bautista, 2019).

En la estación de Carabayllo, PM10 (simulado) y PM2.5 (simulado) poseen una correlación negativa con temperatura (simulada y observada). En el estudio realizado por Guillen (2018) determina que la correlación entre la temperatura diurna y PM10 es positiva y para PM2.5 la correlación es negativa. Mientras que en el horario nocturno esta variable meteorológica posee una relación positiva con PM10 y PM2.5 posee una correlación negativa. PM10 y PM2.5 (observado) posee una correlación positiva. La velocidad del viento posee una correlación negativa con PM10 y PM2.5 (simulado). Guillen (2019), determina que PM10 y PM2.5 posee una correlación negativa. La humedad relativa posee una correlación positiva con PM10 simulado; mientras que con PM10 (observado) y PM2.5 (simulado y observado) posee una correlación negativa. En el estudio por Sánchez & Bautista (2019) determina que la correlación entre el material particulado PM10 y la velocidad del viento posee una correlación negativa.

En la estación de San Borja; el PM10 (simulado y observado) y PM2.5 (simulado y observado), poseen una correlación negativa con la temperatura observada, Guillen (2018) describe que posee una correlación negativa entre la temperatura del aire y PM10 y PM2.5 (observado y simulado). En el estudio por Sánchez & Bautista (2019) determina que la correlación entre el material particulado PM2.5 y la temperatura posee una correlación negativa, muy baja.

PM10 (simulado y observado) y PM2.5 (simulado y observado) poseen una correlación negativa con velocidad del viento simulado y observado; Guillen (2018) afirma que la correlación es negativa entre la velocidad del viento el PM10 y PM2.5. La humedad relativa posee una correlación positiva con PM10 y PM2.5 (observado y simulado).

En la estación de Ate; el PM10 y PM2.5 (simulado y observado) posee una correlación negativa con temperatura (simulada y observada). Guillen (2019) determina que PM10 y PM2.5 posee una correlación negativa para el periodo diurno; y para el periodo nocturno la correlación de PM10 es positiva, mientras que para PM2.5 sigue siendo negativa. La correlación que existe entre la velocidad del viento (simulada y observada) con PM10 y PM2.5 (observado y simulado) es negativa, este resultado concuerda con lo declarado en Guillen (2018), En el estudio por Sánchez & Bautista (2019) determina que la correlación entre el material particulado PM2.5 y la velocidad del viento posee una correlación negativa. La humedad relativa simulada y observada, tienen una correlación positiva con PM10 y PM2.5 (simulado y observado).

- Para el objetivo específico: *Evaluar el desempeño de las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) simulados con el modelo de la calidad del aire WRF-CHEM en Lima Metropolitana en febrero de 2018;* utilizado en las 7 estaciones de calidad de aire de: Ate, Campo de Marte, Carabayllo, Huachipa, Puente Piedra, San Borja y San Juan de Lurigancho; haciendo uso de las pruebas estadísticas de BIAS, MNB, RATIO, ERROR GROSS, MNGE, RMSE y IAO.

Los resultados obtenidos de las estaciones de calidad de aire (Campo de Marte y San Borja) para la prueba estadística de BIAS para el parámetro de la humedad relativa, son de -5% y de -3% respectivamente. Para las demás estaciones (Ate, Carabayllo, Huachipa, Puente Piedra y San Juan de Lurigancho) la variación de BIAS se encuentra en el rango de 1.25% - 9%, lo cual se encuentra en conformidad con el estudio de Karagulian et al (2019) en donde el valor de BIAS para la humedad relativa es de 9%.

Para el parámetro meteorológico de temperatura para la prueba estadística de BIAS, se encuentra entre el rango de -4.0 % hasta -0.512% para las estaciones de calidad de aire de: Carabayllo, Puente Piedra, San Borja y San Juan de Lurigancho. Para las estaciones de Ate, Campo de Marte y Huachipa se encuentran en el rango de 0.098-1.3%, valores que concuerdan con el estudio de Karagulian et al (2019) en donde el valor de BIAS para la temperatura es de 5%.

Para la velocidad del viento de todas las estaciones en estudio fueron positivos los cuales se encuentran en variando en el rango de 1.03%-4.19%, valores que se encuentran de acuerdo al estudio de Karagulian et al (2019) en donde el valor de BIAS para la velocidad del viento es de 10%.

Para el promedio sesgo normalizado (MNB) todas las estaciones de calidad de aire y para las tres variables meteorológicas (humedad relativa, temperatura y velocidad del viento) mostraron resultados dentro del rango de aceptabilidad $\pm 5-15\%$ según EPA (2005) y Gómez (2019) describe que los valores menores a $\pm 20\%$ se consideran buenos, y los valores que se obtuvieron en el análisis se encuentran dentro de este rango.

Para la prueba estadística de Error Normalizado Gross (MNGE) todos los valores obtenidos de las 7 estaciones de calidad del aire estudiados se encuentran dentro del rango establecido por EPA (2005) 0-35%, lo cual determina que el resultado del modelo es aceptable.

En caso de la prueba estadística de Razón de Promedio (RATIO) se observa que para las variables meteorológicas de humedad relativa y temperatura en las estaciones de San Borja, Carabayllo y San Juan de Lurigancho muestran que los valores observados son mayores que los simulados; mientras que para las demás estaciones meteorológicas los valores simulados son ligeramente mayores que los observados, ya que sus valores son mayores que la unidad; cumpliendo con lo declarado en EPA (2005), cabe precisar que para la velocidad del viento los resultados varían entre 2.8-6.10 m/s siendo estos los valores más altos obtenidos en esta prueba estadística.

- Para el objetivo específico: Comparar las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) medidas y simuladas con el modelo WRF-Chem en Lima Metropolitana en febrero de 2018; se realizó mediante graficas en donde el comportamiento de los valores simulados para las variables meteorológicas de humedad relativa y temperatura en las siete estaciones de calidad de aire se asemejan a los valores observados; sin embargo, en la estación de San Borja para la temperatura del aire los valores observados se encuentran por encima de los valores simulados; estos resultados se comportan de la misma manera que en el estudio de Karagulian et al (2019) en donde las variables meteorológicas: temperatura y humedad relativa observadas y simuladas realizan el mismo

comportamiento, de la misma manera en el estudio de Xueying Wang et al (2021) demuestran que la humedad relativa y la temperatura del aire simulado se comporta de manera muy similar a la humedad relativa y temperatura del aire observado.

Para la velocidad del viento en 6 estaciones de calidad del aire se observa que los valores simulados son mayores que los observados, sin embargo; en la estación de Campo de Marte se observa que los valores simulados obtenidos realizan un comportamiento similar con los valores observados, este último resultado se encuentra de acuerdo con Karagulian et al (2019) en donde el comportamiento de los valores simulados y los observados se asemejan, aunque los valores observados y simulados tienen picos altos en distintos tiempos; en el estudio realizado por Xueying Wang et al (2021) demuestran que la velocidad del viento simulados es mayor que los valores de la velocidad observados.

VII. CONCLUSIONES

- Para el objetivo general: *Determinar la correlación entre el material particulado y las variables meteorológicas utilizando el modelo WRF-CHEM en Lima Metropolitana en él es de febrero del 2018*; se obtuvo lo siguiente: se concluye que se RECHAZA la HO-1: no existe correlación entre el material particulado y las variables meteorológicas medidas y simuladas usando el modelo WRF-CHEM; en otras palabras se determina que si existe una correlación entre las variables meteorológicas y material particulado; cabe precisar que la contrastación de la hipótesis se realizó por medio del Coeficiente de Pearson con un nivel de confianza de 99%.

Se determinó; que en las 7 estaciones (Ate, Campo de Marte, Carabayllo, Puente Piedra, Huachipa, San Borja y San Juan de Lurigancho); la temperatura simulada y observada posee una correlación negativa con los valores de PM10 y PM2.5 simulados y observado.

Para la variable meteorológica de la velocidad del viento simulados y observado poseen una correlación negativa con PM10 y PM2.5 simulado y observado; para todas las estaciones.

Para la variable meteorológica de la humedad relativa simulada y observado poseen una correlación positiva con PM10 y PM2.5.

- Para el objetivo específico: *Evaluar el desempeño de las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) simulados con el modelo de la calidad del aire WRF-CHEM en Lima Metropolitana en febrero de 2018*, se determinó que para el sesgo normalizado todas las estaciones de calidad del aire estudiadas demuestran que existe homogeneidad entre las variables meteorológicas: temperatura del aire, velocidad del viento y humedad relativa simuladas y observadas. En la prueba estadística RATIO todas las estaciones presentan una diferencia mínima entre los valores simulados y los observados de las variables meteorológicas: temperatura del aire y humedad relativa; mientras que para la variable meteorológica de la velocidad del viento la diferencia es notoria; los valores simulados son mayores que los observados. Los valores obtenidos en el índice de concordancia demuestran que existe una relación adecuada entre los

valores obtenidos de temperatura del aire y humedad relativa simuladas y observadas; sin embargo, los resultados obtenidos para la velocidad del viento simulados y observados demuestran que no existe una buena relación al realizar el análisis.

- Para el objetivo específico: Comparar las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) medidas y simuladas con el modelo WRF-Chem en Lima Metropolitana en febrero de 2018; se concluye que conforme a los resultados obtenidos mediante el análisis de graficas se series de tiempo se determinó que los valores simulados y observados para las variables meteorológicas: temperatura del aire y humedad relativa realizan el mismo comportamiento; mientras que, para la variable meteorológica de la velocidad del viento, los valores simulados son mayores que los valores observados; estando en concordancia con los resultados obtenidos en las pruebas estadísticas.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Air Visual. (2019). *AirVisual Groundbreaking Report and Interactive web ranking in Review of 2018 Global Air Quality Status*. <https://www.airvisual.com/air-pollution-information/blog/airvisual-launches-groundbreaking-report-and-interactive-web-ranking-in-review-of-2018-s-global-air-quality-status>.
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos- EPA en español. (05 de Junio de 2018). *Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medio ambiente*. <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>.
- Banco Mundial. (2016). *La Contaminación atmosférica le cuesta USD 225 mil millones a la economía mundial*. Washington.
- Barrenetxea C. O., Pérez S. A., González D. N., Rodríguez V. F.J. y Alfayate B. J.M. (2003). *Contaminación Ambiental: una visión desde la química*. Thomson Editoras Spain. España.
- Bessagnet B., Pirovano G., Mircea M., Cuvelier C., Aulinger. A., Calori G., Ciarelli G., Manders A., Stern R., Tsyro S., García V. M., Thunis P., Pay M. T., Colette A., Couvidat F., Meleux F., Rouïl L., Ung A., Aksoyoglu S., Baldasano J. M., Bieser J., Briganti G., Cappelletti A., D’Isidoro M., Finardi S., Kranenburg R., Silibello C., Carnevale C., Aas W., Dupont J.C., Fagerli H., Gonzalez G., Menut L., Prévôt A. S. H., Roberts P. y White L. (2016). *Presentation of the EURODELTA III intercomparison exercise –evaluation of the chemistry transport models’performance on criteria pollutants and joint analysis with meteorology*. *Atmospheric Chemistry Physics*. 16, 12667–12701
- Chan J.S., Binkowski F. S., Seaman N. L., McHenry J. N., Samson P. J., Stockwell W. R., Walcek C. J., Madronich S., Middleton P. B., Pleim J. E. y Lansford H. H. (1989). *The regional acid deposition model and engineering model, State of Science/Techonology Report 4*. Washington
- Choy R.L. (2014). *“Principales causas de la contaminación del aire y propuestas para su mitigación por efecto del parque automotor de transporte público de lima cuadrada”*. (Tesis Pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería. Lima.

- Cáceres, L. D.D. (2015). *Evaluación de los efectos agudos en la función pulmonar por exposición a material particulado fino (MP2.5) en niños que viven próximos a una playa masivamente contaminante con relaves mineros, Chañaral, Chile*. (Tesis de doctorado). Universidad Autónoma de Barcelona. Barcelona. España.
- Christopher Emery, Zhen Liu, Armistad G. Russell M. Talat Odman, Greg Yarwood & Naresh Kumar (2017). *Recomendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance, journal of the air & waste management association*. DOI: 10.1080/10962247.2016.1265027. Technical Papers.
- Dirección General de Salud Ambiental. (2020). *Red de Vigilancia Sanitaria del Aire de Lima y Callao. (2007-2019)*. Consultado el 31 de mayo del 2021. Recuperado de http://www.digesa.minsa.gob.pe/DCOVI/DIGESA_AIR_MR_CalidadAireAnual_LI_MA.html#PM1.
- Environmental Protection Agency. (1992). *Guideline for regulatory application of the urban airshed model for areawide carbon monoxide*. United States
- Environmental Protection Agency. (2005). *Guidance on the Use of Models and Other Analyses in Attainment Demonstrations for the 8-hour Ozone NAAQS*. United States.
- Espinoza G. J. A. (2018). *Evaluación Espacial y Temporal del Material Particulado PM10 y PM2.5 en Lima Metropolitana para el periodo 2015-2017*. (Tesis pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima
- Gallego P. A. (2012). *Contaminación atmosférica*. España. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Recuperado de: <https://www.casadellibro.com/libro-contaminacion-atmosferica/9788436264289/2050047>.
- Gonzales C. M., Ynoue R. Y., Vara-Vela A., Rojas N. Y. y Aristizábal B.H. (2018). *High-resolution air quality modeling in a médium-sized city in the tropical Andes: Assessment of local and global emissions in understanding ozone and PM10 dynamics*. Atmospheric Pollution Research.
- Gómez V. F.J. (2019). *Evaluación de pronósticos meteorológicos para la modelacion hidrológica del manto nival, en estación Valle Nevado*. (Tesis Pregrado). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias físicas y matemáticas. Departamento de Ingeniera Civil. Chile

- Grenn J. y Sánchez S. (2013). *La Calidad del Aire en América Latina: Una Visión panorámica*. The Clean Air Institute. Edición 2012. Washington.
- Hernández C.J.E. (2019). *Análisis de la precipitación inducida por forzamiento orográfico, ante el paso de frentes fríos en la porción Norte de Chiapas y Sierra de Tabasco*. (Tesis Maestría). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.
- Huong N. G. T., Shimadera H., Uranishin K., Matsuo T., Kondo A. y Thepanondh S. (2019). *Numerical assessment of PM2.5 and O3 air quality in continental Southeast Asia: Baseline simulation and aerosol direct effects investigación*. DOI 117054. Atmospheric Environment.
- INEC. Equipos para la Medición de la Calidad del Aire. 2020. Disponible en web abajo:
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/623/equipos.pdf>. Acceso el día 14 de julio de 2020.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2020). *La población de lima supera los nueve millones y Medio de habitantes*. Nota de Prensa. Consultado el 31 de mayo del 2021. <https://www.inei.gob.pe/prensa/noticias/la-poblacion-de-lima-supera-los-nueve-millones-y-medio-de-habitantes-12031/>
- Kumar R. (2012). *Weather Research and Forecasting Model with Chemistry (WRF-Chem) over South Asia*. (Tesis Doctoral). Universidad de Hamburgo. DOI: 10.17617/2.1539454. Hamburgo.
- Karagulian F., Temini M., Ghebreyesus D., Weston M., Kondapalli K. N., Valappil V. K., Aldababesh A., Lyapustin A., Chaouch N., Hammadi A. F. & Abdoolli A. A. (2019). *Analysis of a severe dust storm and its impact on air quality conditions using WRF-Chem modeling, satellite imagery, and ground observations*. DOI <https://doi.org/10.1007/s11869-019-00674-z>. Air Quality, Atmosphere & Health.
- Luque S. J. P. (2018). *Evaluación de la viabilidad del aprovechamiento del potencial eólico para la generación de energía eléctrica en el distrito de Chiguata-Arequipa*. (Tesis Pregrado). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa, Perú.
- Ministerio del Ambiente. (2014). *Informe Nacional de la Calidad del aire 2013-2014*. Lima-Perú.

- Miranda M.J., Mendoza. L. L., Contreras A. L., Valdez H. W., Vidal A. M. y Driver C. Ministerio de Salud. Centro Nacional de Epidemiología prevención y control de enfermedades. (2018). *Análisis de las causas de Mortalidad en el Perú, 1986 - 2015*. Lima
- Mohan M., Gupta M. (2018). *Sensitivity of PBL parameterizations on pm10 and ozone simulation using chemical transport model WRF-Chem over a sub-tropical urban airshed in India*. Atmospheric Environment.
- Navarro B. H. (2018). *Adquisición, estudios y análisis de contaminantes para el monitoreo de la calidad del aire en Lima usando el Modelo de predicción meteorológica con acoplamiento químico WRF-Chem*. (Tesis Pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.
- Navarro B. H. (2019). *Simulación del transporte y dispersion de partículas PM10 producidas por quema de biomasa sobre los Andes Centrales de Perú con ayuda del modelo químico-meteorológico WRF-CHhem*. (Tesis Maestria). Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (2015). *Instrumentos Básicos para la fiscalización ambiental*. Perú.
- Organización Mundial de la Salud. (2012). Resumen de Orientación. *Ambientes Saludables y Prevención de enfermedades. Hacia una estimación de la carga de morbilidad atribuible al medio ambiente*. Francia.
- Pacsi V. Sergio A., Murriel G. F.A. (2018). *Evaluación espaciotemporal del material particulado PM2.5 y su relación con las variables meteorológicas en la Universidad Nacional Agraria La Molina*. DOI. <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v79i2.992>
- Pengfei Wang., X.Q. y H. Z. (2020). *Modeling PM2.5 and O3 with aerosol feedbacks using WRF/CHEM over the Sichuan basin, southwsetern China*. Chemosphere. China
- Robles, M.E.G.(2020). *La contaminación del aire por material particulado y su relación con las enfermedades de tipo respiratorio en la población de Cerro de Pasco, 2010 y 2016*. (Tesis de Magister). Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú
- Rivas L. W. A. (2018). *Clima, Hidrología y meteorología para ciencias ambientales e ingeniería*. Colombia.

- Saavedra V. J.D. (2014). *Análisis de nuevos escenarios de emisión de contaminantes del parque automotor generados en un ambiente de tráfico vehicular*. (Tesis Pregrado) Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Perú.
- Sánchez C.O. R., Muñoz G. A., Ordoñez A. C. y Llacza A. (2018). *Modeling Study of the Particulate Matter in Lima with the WRF-Chem Model: Case Study of April 2016*. Revista Internacional de Ingenieria Aplicada.
- Sánchez C. O. R., Droprinchinski M. L., Ynoue Y. R. y Andrade M. F. (2007). *The impact on tropospheric ozone formation on the implementation of a program for mobile emissions control: a case study in Sao Paulo, Brazil*. DOI 10.1007. *Environ Fluid Mech*.
- Sánchez P. C. L. y Bautista M. M. Y. (2019). *Evaluación de la calidad del aire (PM10 y PM2.5) en relación a los parámetros meteorológicos (temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) en el sector Cercado -Tarapoto, 2018*. (Tesis Pregrado). Universidad Peruana de la Unión. Tarapoto, Perú.
- Sha T., Ma X., Jia H., Tian R., Chang Y. y Cao F. (2018). *Aerosol Chemical Component: Simulations with WRF-Chem and comparison observations in Nanjing*. *Atmospheric Environment*.
- Thermo, 2009. Model 5014i Beta. Instruction Manual. Continuous Ambient Particulate Monitor Part Number 106428-00. 16Jan2018. <http://tools.thermofisher.com/content/sfs/manuals/EPM-Model5014i-Manual.pdf>. Acceso el día 14 de julio de 2020.
- USEPA, 2017. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems Volume II: Part 1 Ambient Air Quality Monitoring Program Quality System Development.
- University Corporation Air Research. National Center for Atmospheric Research. (2018). *Atmospheric Chemistry Observations & Modeling WRF-Chem*. <https://www2.acom.ucar.edu/wrf-chem>. Consultado el 16 de febrero del 2020.

- Vara, L.M.E. (2017). *Contaminación atmosférica con material particulado en la Ciudad del Cusco y su comportamiento-2016*. (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional San Agustín de Arequipa. Arequipa, Perú
- Warren R. R. (2018). *Estimación de la concentración de material particulado PM10 y PM2.5 en el área metropolitana de Lima utilizando un modelo euleriano*. (Tesis Doctorado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima
- Xueying W., Lin L., Kangjia G., Jianjiong M., Jianlin H., Jingyi L., Zhenxin L., Hong L., Wanyi Q., Ying Y., Huabin D., Song G., Min H., Liming Z., & Yuanhang Z. (2021) *Modelling air during the EXPLORE-YRD camping -PART I. Model performance evaluation and impacts of meteorological inputs and grid resolutions*. Atmospheric Environment. DOI. 118131
- Zhao Y., Zhang Lin., Zhou M., Chen D., Lu X., Tao W., Lui J., Tian H., Ma Y. y Fu T-M. *Influences of planetary boundary layer mixing parameterization on summertime Surface ozone concentration and dry deposition over North China*. Atmospheric Environment.
- Zhe Lv., Wei W., Shuiyuan Ch., Xiaoyan H. y Wang X. (2020). *Meteorological characteristics within boundary layer and its influence on PM2.5 pollution in six cities of North China based on WRF-Chem*. Atmospheric Environment.
- Zambrano B. M. (s.f.). *Índice de Acuerdo*.
<https://www.rforge.net/doc/packages/hydroGOF/d.html>

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Indicadores	Metodología
<p align="center">General</p> <p>¿Cuál es la correlación entre las partículas (PM10 y PM25) con las variables meteorológicas (velocidad del viento, humedad relativa y temperatura del aire) usando el modelo WRF-Chem en Lima Metropolitana en febrero de 2018?</p>	<p align="center">General</p> <p>Determinar la correlación entre el material particulado y las variables meteorológicas utilizando el modelo WRF-CHEM en Lima metropolitana en el mes de febrero del 2018.</p>	<p align="center">General</p> <p>Existe correlación entre el material particulado y las variables meteorológicas utilizando el modelo WRF-Chem en Lima metropolitana en febrero del 2018.</p>	<p align="center">Independiente</p> <ul style="list-style-type: none"> - Velocidad del viento (m/s) - Humedad Relativa (%) - Temperatura (°C) 	<ul style="list-style-type: none"> - +1 ambas variables poseen una relación perfecta positiva (si una de las variables aumenta o disminuye la otra se asemeja) - -1 estas variables poseerán una relación perfecta negativa (si una de las variables aumenta o disminuye la otra variable sigue el adopta un comportamiento contrario) 	<p>2. Coeficiente de Pearson</p>
<p align="center">Específicos</p> <p>¿Cuál es el desempeño del modelo de WRF-CHEM en la simulación de las variables meteorológicas en lima metropolitana en febrero de 2018?</p>	<p align="center">Específicos</p> <p>Evaluar el desempeño de las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) simuladas con el modelo de la calidad del aire WRF-Chem en Lima Metropolitana en febrero de 2018</p>	<p align="center">Específicos</p> <p>El modelo WRF-Chem se desempeña correctamente en la simulación de las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento) en Lima Metropolitana en febrero de 2018.</p>	<p align="center">Dependiente</p> <p align="center">Material Particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</p>	<p>-BIAS: si es negativa (-) valor simulado es < valor observado.</p> <p>- NMB: $\pm 5-15\%$ es aceptable.</p> <p>- MNGE : 0-35% aceptable</p> <p>-RATIO: >1 entonces obs<pred.</p> <p>-IAO: varia entre 0 y 1.</p>	<p>3. Pruebas estadísticas (BIAS, ERROR, NMB,MNGE, RATIO, RMSE e IAO)</p> <p>4. Modelo WRF-Chem</p>
<p>¿El comportamiento de las variables meteorológicas simuladas utilizando el modelo WRF-Chem se asemejan a las variables meteorológicas medidas en lima metropolitana en febrero del 2018?</p>	<p>Comparar las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) medidas y simuladas con el modelo WRF-Chem en Lima Metropolitana en febrero de 2018.</p>	<p>Los resultados de la simulación usando el modelo WRF-Chem demuestran un comportamiento semejante a las variables meteorológicas medidas en lima metropolitana en febrero del 2018.</p>		<p>Ambos comportamientos son semejantes</p>	<p>3. Graficas de series de tiempo</p> <p>4. Modelo WRF-Chem</p>

Anexo 2. Glosario de términos

Material particulado: Partículas en suspensión sólidas y líquidas. Las partículas con diámetro menor a 10 micras se denominan PM10. Mientras a las partículas con diámetro menor a 2.5 micras se llama PM2.5 (OEFA, 2015).

WRF-CHEM: Este modelo simula la emisión, variables meteorológicas, deposición y transformación química de los gases que se encuentran en menos medida en la atmosfera y de las partículas muy pequeñas (sólidos o líquidos) que se quedan suspendidas en el aire; considerando la meteorología de la zona en donde se esté realizando el pronóstico (UCAR,2018).

Coefficiente de Pearson: determinar si existe una relación lineal entre dos variables, con una relación estadísticamente significativa (EPA, 2005).

Anexo 3. Estaciones Estudiadas

- Se realizó la solicitud de dos años, estos años fueron correspondientes al 2018 y 2019, correspondiente a las estaciones de calidad de aire en la base de datos solicitados se obtuvieron datos de las siguientes estaciones:

TESISTA ELIZABETH AYMA CHOQUE TESIS IMPORTANTE

Luis Felipe Gamarra Chávrry (UACGD) <lgamarra@senamhi.gob.pe>
 para osanchez.elyayma, mi, Manuel, Milagros

mié, 5 feb 2020, 14:32

TESISTA ELIZABETH AYMA CHOQUE:

Reciba el cordial saludo del SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERU - SENAMHI, a fin de remitirle los datos horarios de la red de estaciones de calidad del aire Lima Metropolitana, solicitadas según el expediente N° 357; a la espera de su confirmación en cuanto a la recepción del presente y hacerle recordar que una vez concluida y aprobada su tesis hacer llegar un ejemplar para nuestra biblioteca especializada, saludos.

Exp. 357

Senamhi
 SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERU

Luis Felipe **Gamarra** Chávrry
 DIRECTOR DE PLANEAMIENTO, COORDINACIÓN Y CONTROL
 GERENCIA GENERAL
 SENAMHI - PERÚ

D. Jr. Cahuiñe 785, Jesús María - Lima
 T: 01 6141414 Anexo -
 C: -
 E: lgamarra@senamhi.gob.pe
 W: www.senamhi.gob.pe

SENAMHI es una institución responsable con el medio ambiente. Le pedimos no imprimir este correo a menos que sea absolutamente necesario. Reduzca - Reuse - Recicle

2 archivos adjuntos

ELIZABETH AYMA - METEOROLOGICAS.xlsx
 4.4 MB

ELIZABETH AYMA

← **ELIZABETH AYMA -CONTAMINANTES.xlsx** Abrir con

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2									
3									
4	USUARIO: ELIZABETH AYMA CHOQUE								
5									
6	ATE	ATE							
7	SBJ	SAN BORJA							
8	CDM	CAMPO DE MARTE							
9	VMT	VILLA MARIA DEL TRIUNFO							
10	HCH	HUACHIPA							
11	SJL	SAN JUAN DE LURIGANCHO							
12	CRB	CARABAYLLO							
13	PPD	PUENTE DE PIEDRA							
14									
15									
16	PARÁMETRO: MATERIAL PARTICULADO MENOR A 10 MICRAS, PM₁₀ (µg/m³)								
17									
18	FECHA	ATE	SBJ	CDM	VMT	HCH	SJL	CRB	PPD
19	2/1/18 0:00	76,54	35,61	19,42	S/D	S/D	94,90	S/D	59,34
20	2/1/18 1:00	64,17	30,11	20,15	S/D	S/D	77,39	S/D	52,66
21	2/1/18 2:00	55,37	27,63	22,34	S/D	S/D	74,94	S/D	72,32
22	2/1/18 3:00	69,91	32,77	24,26	S/D	S/D	75,71	S/D	76,03
23	2/1/18 4:00	73,84	38,58	24,00	S/D	S/D	96,80	S/D	65,22
24	2/1/18 5:00	105,40	42,20	25,22	S/D	S/D	96,00	S/D	67,19
25	2/1/18 6:00	96,00	39,80	25,58	S/D	S/D	103,10	S/D	68,69
26	2/1/18 7:00	73,94	38,34	32,37	S/D	S/D	124,30	S/D	100,30
27	2/1/18 8:00	116,10	43,79	43,43	S/D	S/D	158,40	S/D	140,20
28	2/1/18 9:00	117,20	55,57	32,45	S/D	S/D	169,10	89,70	146,50
	PM10	PM2.5	SO2	NO2	O3	CO			

No se encuentra las estaciones de San Martin y Santa Anita.

← X ELIZABETH AYMA-METEOROLOGICAS.xlsx Abrir

	A	B	C	D	E	F	G
1	USUARIO: ELIZABETH AYMA CHOQUE						
2							
3							
4	ESTACION	CODIGO	DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO		
5	CAMPO DE MARTE	112194	LIMA	LIMA	JESUS MARIA		
6							
7			LONGITUD	LATITUD	ALTITUD		
8			77° 02' "W"	12° 04' "S"	123 m s.n.m		
9							
10							
11							
12							
13							
14	FECHA	HORA	TEMPERATURA DEL AIRE HORARIO (°C)	HUMEDAD RELATIVA HORARIA (%)	PRECIPITACIÓN TOTAL HORARIA (mm)	VELOCIDAD DEL VIENTO HORARIO (m/s)	DIRECCIÓN DEL VIENTO HORARIO (°)
15							
16	2/1/18 0:00	0:00:00	20,9	84,0	0,0	2,2	215
17	2/1/18 0:00	1:00:00	20,4	88,0	0,0	3,1	212
18	2/1/18 0:00	2:00:00	20,4	88,0	0,0	0,4	238
19	2/1/18 0:00	3:00:00	19,9	90,0	0,0	2,0	196
20	2/1/18 0:00	4:00:00	19,7	91,0	0,0	1,1	198
21	2/1/18 0:00	5:00:00	19,6	92,0	0,0	1,9	214
22	2/1/18 0:00	6:00:00	19,4	93,0	0,0	1,8	207
23	2/1/18 0:00	7:00:00	19,3	94,0	0,0	2,2	203
24	2/1/18 0:00	8:00:00	20,0	93,0	0,0	0,8	218
25	2/1/18 0:00	9:00:00	22,4	81,0	0,0	1,4	241
26	2/1/18 0:00	10:00:00	21,9	80,0	0,0	3,4	196
27	2/1/18 0:00	11:00:00	22,5	80,0	0,0	2,6	205
28	2/1/18 0:00	12:00:00	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
29							
30							
31							
32							
33							
34							
35							
36							
37							
38							
39							
40							
41							
42							
43							
44							
45							
46							
47							
48							
49							
50							
51							
52							
53							
54							
55							
56							
57							
58							
59							
60							
61							
62							
63							
64							
65							
66							
67							
68							
69							
70							
71							
72							
73							
74							
75							
76							
77							
78							
79							
80							
81							
82							
83							
84							
85							
86							
87							
88							
89							
90							
91							
92							
93							
94							
95							
96							
97							
98							
99							
100							

CAMPO DE MARTE VMT SAN BORJA ATE HUACHIPA SJL PTE PIEDRA CARABAYLLO HOJA HOJA1

En donde no se encuentra las de Santa Anita y San Martín, posteriormente de la recepción de estos datos se procedió a verificar la cantidad información con la que se contaba para poder realizar el análisis correspondiente por lo cual se verifico que la estación de villa maría del triunfo no cuenta con datos del PM10 y PM2.5, es por ello que no se encuentra en el estudio.

En cuanto al año de análisis, se realizó el correspondiente filtro con los datos que se obtuvieron de SENAMHI, concluyendo que el año que cuenta con mayor cantidad de datos necesarios para el análisis es el 2018.