



**MODELO ESPACIAL PARA LA
DETECCIÓN Y EVALUACIÓN DE
CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS:
UN ENFOQUE EN LA CALIDAD
DEL AIRE DE LIMA**

**Alfonso Alberto Romero Baylón
Carlos del Valle Jurado
Jaime Cesar Mayorga Rojas
Luis Miguel Soto Juscamayta
William Gilberto Escudero Simon**

**MODELO ESPACIAL PARA LA DETECCIÓN Y EVALUACIÓN DE CONTAMINANTES
ATMOSFÉRICOS: UN ENFOQUE EN LA CALIDAD DEL AIRE DE LIMA**

Autores

Alfonso Alberto Romero Baylón

Carlos del Valle Jurado

Jaime Cesar Mayorga Rojas

Luis Miguel Soto Juscamayta

William Gilberto Escudero Simon

Copyright © 2024

Alfonso Alberto Romero Baylón

Carlos del Valle Jurado

Jaime Cesar Mayorga Rojas

Luis Miguel Soto Juscamayta

William Gilberto Escudero Simon

Todos los derechos reservados.

ISBN: 978-9942-7292-7-9

La presente obra fue revisada por pares académicos ciegos conforme al proceso editorial de la Editorial CILADI.



Prólogo

La calidad del aire es un tema de crucial importancia en las discusiones contemporáneas sobre sostenibilidad y salud pública. Este libro aborda una problemática de gran relevancia global con un enfoque científico riguroso, aplicando métodos avanzados de modelación espacial para evaluar la dispersión y concentración de contaminantes en la atmósfera. La elección de Lima como caso de estudio, dada su singular geografía y complejidad urbana, añade valor tanto local como universal a los hallazgos presentados.

En una época en la que el cambio climático y la contaminación desafían cada vez más a las ciudades del mundo, esta obra representa una contribución significativa para el diseño de políticas públicas y estrategias de mitigación ambiental. La combinación de análisis geoestadístico, algoritmos computacionales y variables meteorológicas otorga al libro una profundidad científica que será de interés para investigadores, urbanistas y tomadores de decisiones. Más allá de su valioso aporte teórico, el libro se posiciona como una herramienta práctica para mejorar la gestión de la calidad del aire en contextos urbanos. Al ofrecer soluciones innovadoras y adaptables a diferentes realidades geográficas, esta obra se convierte en un recurso imprescindible para enfrentar uno de los retos medioambientales más apremiantes de nuestra era.

PhD. Antonio Poveda G.

Editor

Resumen

El aumento significativo de la contaminación atmosférica a nivel global, provocado principalmente por la actividad humana, ha generado que los contaminantes se acumulen en la troposfera, alcanzando altitudes cada vez mayores sobre la superficie terrestre. Esta acumulación ha saturado distintas capas de la atmósfera, alterando su equilibrio natural y desencadenando fenómenos climáticos adversos como lluvias torrenciales, vientos huracanados y un preocupante incremento en las temperaturas a escala planetaria.

En esta obra, se presenta el Modelo de Localización Espacial (MDLE), una herramienta de vanguardia desarrollada para identificar y analizar, con alta precisión, las concentraciones de contaminantes atmosféricos en diferentes altitudes dentro de la troposfera. El MDLE permite evaluar dichas concentraciones a intervalos de 500 metros, extendiéndose desde la superficie terrestre hasta los 10,000 metros sobre el nivel del mar. Este modelo integra variables clave como la presión atmosférica, la altitud y la temperatura, permitiendo interpretar el comportamiento de los contaminantes y su relación con los factores meteorológicos.

Mediante algoritmos avanzados, como los de Stirling y Kriging, el modelo estima la distribución espacial de los contaminantes en la atmósfera y establece comparaciones con los Estándares de Calidad de Aire (ECA) y el Indicador Nacional de Calidad del Aire (INCA), específicamente aplicados al contexto de la ciudad de Lima. Estos cálculos y comparaciones permiten determinar el estado del aire en diferentes niveles atmosféricos, proporcionando información crítica para la toma de decisiones en la gestión de la calidad del aire.

Asimismo, este modelo analiza la influencia de factores meteorológicos —como la velocidad del viento, la variación de temperatura y la distribución del ozono en la troposfera— y su impacto directo en la dispersión y concentración de los contaminantes. El ozono, en particular, juega un rol crucial en la protección de la vida en la Tierra, y su comportamiento en altitudes específicas es estudiado de manera detallada en este trabajo.

El MDLE no solo constituye un avance significativo en la modelación de contaminantes atmosféricos a nivel local, sino que sus principios y algoritmos pueden ser adaptados para su aplicación en diferentes regiones geográficas, ofreciendo una herramienta robusta para evaluar la calidad del aire en diversas condiciones meteorológicas y geográficas. A lo largo de esta obra, se exploran tanto las implicaciones científicas del modelo como su potencial para aportar soluciones concretas a uno de los mayores desafíos medioambientales de nuestra era.

Palabras clave: Contaminación atmosférica, Modelo de Localización Espacial, Troposfera, Algoritmos, Calidad del aire.

Índice de Contenidos

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Introducción..... | 1 |
| 1.1 | Entorno actual..... | 1 |
| 1.2 | Objetivos generales del proyecto | 3 |
| 1.3 | Objetivos específicos del proyecto | 3 |
| 2. | Antecedentes | 4 |
| 2.1 | Descripción general del entorno atmosférico en Lima | 4 |
| 3. | Presentación del proyecto | 5 |
| 4. | Contexto teórico | 7 |
| 4.1 | Base filosófica | 7 |
| 4.2 | Antecedentes de la investigación | 7 |
| 4.3 | Bases Teóricas | 8 |
| 4.3.1 | Gases contaminantes de la atmosfera | 8 |
| 4.3.2 | Sustancias contaminantes atmosféricas..... | 8 |
| 4.3.3 | Fuentes de contaminación atmosférica | 9 |
| 4.3.4 | Dispersión de contaminantes | 11 |
| 4.3.5 | Plumas de dispersión | 12 |
| 4.3.6 | Indicadores de calidad de aire..... | 13 |
| 4.3.7 | Velocidad de viento..... | 13 |
| 4.3.8 | Inversión Térmica..... | 14 |
| 4.3.9 | Temperatura atmosférica | 14 |
| 4.3.10 | Humedad relativa | 14 |
| 4.4 | Marco conceptual..... | 14 |
| 4.5 | Marco normativo..... | 15 |
| 5. | Procedimiento en la construcción del modelo..... | 15 |
| 5.1 | Tipo y diseño de investigación..... | 15 |
| 5.2 | Diseño de la investigación | 15 |
| 5.3 | Unidad de análisis | 16 |
| 5.3.1 | Ubicación y ámbito geográfico | 16 |
| 5.3.2 | Población de estudio | 18 |
| 5.3.3 | Tamaño y selección de muestra..... | 18 |
| 5.4 | Técnicas de recolección de datos | 19 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.5 | Validación de datos | 19 |
| 6. | Calidad de aire y contaminación atmosférica | 21 |
| 6.1 | Generalidades..... | 21 |
| 6.1.1 | La atmosfera y sus características | 21 |
| 6.1.2 | El aire y sus componentes | 24 |
| 6.1.3 | Componentes nocivos en el aire | 26 |
| 6.1.4 | Calidad del aire | 28 |
| 6.2 | Indicador de calidad de aire | 29 |
| 6.2.1 | Indicador ICA | 29 |
| 6.2.2 | Niveles de concentración y calidad de aire..... | 31 |
| 6.2.3 | Niveles de concentración y tipo de aire | 34 |
| 6.2.4 | Rangos de concentración de calidad de aire | 36 |
| 6.3 | Modelos de basados en expresiones matemáticas | 40 |
| 6.3.1 | Modelos con base Gaussiana | 40 |
| 6.3.2 | Modelos con base Eulereana | 41 |
| 6.3.3 | Modelos con base Lagrangeana | 42 |
| 6.3.4 | Modelo MDLE | 42 |
| 7. | Modelo de localización espacial - MDLE | 43 |
| 7.1 | Aspectos topográficos y climáticos..... | 43 |
| 7.1.1 | Topografía..... | 43 |
| 7.1.2 | Clima..... | 46 |
| 7.2 | Condiciones de frontera o dimensión 3D..... | 50 |
| 7.2.1 | Geométrica | 50 |
| 7.2.2 | Zonas espaciales atmosféricas | 53 |
| 7.3 | Algoritmos del modelo | 58 |
| 7.3.1 | Algoritmo de Stirling | 58 |
| 7.4 | Datos de entrada (Input)..... | 62 |
| 7.5 | Proceso de calculo | 69 |
| 7.5.1 | Interpolación en 2D | 69 |
| 7.5.2 | Interpolación en 3D | 70 |
| 7.6 | Datos de salida (Output)..... | 73 |
| 7.6.1 | Isovalores de partículas | 73 |
| 7.6.2 | Isovalores de gases | 77 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 8. | Resultados | 81 |
| 8.1 | Análisis e Interpretación de resultados | 81 |
| 8.1.1 | Estadística de resultados | 81 |
| 8.2 | Geoestadística de resultados | 84 |
| 8.3 | Interpretación de resultados para PM_{10} | 85 |
| 8.4 | Presentación de resultados | 94 |
| 8.4.1 | Por elementos contaminantes. | 94 |
| 8.4.2 | Por zona espacial atmosférica en m s.n.m. | 101 |
| 8.5 | Validación del modelo MDLE..... | 102 |
| 8.5.1 | Validación multivariable..... | 102 |
| 8.5.2 | Validación Geoestadística del MDLE..... | 104 |
| 9. | Conclusiones..... | 107 |
| 10. | Bibliografía | 108 |
| 11. | Anexos | 107 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Vista en planta de la ciudad de Lima, indicando la concentración de contaminantes en la capa límite de la atmósfera. | 6 |
| Figura 2. Fuentes de contaminación Naturales y antropogénicas. | 9 |
| Figura 3. Fuentes de contaminación puntual y lineal. | 10 |
| Figura 4. Las plumas de contaminación atmosférica. | 11 |
| Figura 5. Gases tóxicos de plumas de emisión. | 12 |
| Figura 6. Gases tóxicos de plumas de emisión. | 13 |
| Figura 7. Área de estudio sección rectangular del modelo MDLE. | 17 |
| Figura 8. Método y técnica de recolección de datos. | 19 |
| Figura 9. Masa porcentual atmosférica en los 10Km de altitud. | 21 |
| Figura 10. Zonas espaciales atmosféricas con longitud media. | 23 |
| Figura 11. Longitudes de la troposfera donde se ubica el aire. | 25 |
| Figura 12. Proceso de alteración de componentes del aire. | 27 |
| Figura 13. Índice de calidad de aire - ICA. | 29 |
| Figura 14. Estados de calidad de calidad de aire ICA. | 31 |
| Figura 15. Valores de alerta nacional para calidad de aire. | 32 |
| Figura 16. Estándar de calidad de aire ECA. | 32 |
| Figura 17. Clasificación del estado de calidad del aire. | 33 |
| Figura 18. Rango de valores para $PM_{2.5}$ | 34 |
| Figura 19. Rango de valores para PM_{10} | 34 |
| Figura 20. Cálculo de rangos de valor por elemento contaminante. | 35 |
| Figura 21. Cálculo de rangos de valor para PM_{10} y su relación con INCA. | 36 |
| Figura 22. Cálculo de rangos de valor para $PM_{2.5}$ y su relación con INCA. | 36 |
| Figura 23. Cálculo de rangos de valor para SO_2 | 38 |
| Figura 24. Cálculo de rangos de valor para NO_2 | 39 |
| Figura 25. Esquema conceptual del modelo Gaussiano. | 41 |
| Figura 25. Curvas de nivel de la superficie topográfica del modelo. | 44 |
| Figura 27. Curvas de nivel 3D de la superficie topográfica del modelo. | 45 |
| Figura 28. Curvas de nivel 2D de la superficie topográfica del modelo. | 46 |
| Figura 29. Temperatura mínima y máxima en Lima. | 47 |
| Figura 30. Velocidad promedio del viento en Lima. | 48 |
| Figura 31. Dirección promedio de viento en Lima. | 48 |

| | |
|---|----|
| Figura 32. Variación de la presión según altitud. | 49 |
| Figura 33. Variación de la temperatura según altitud..... | 50 |
| Figura 34. Dimensiones del área de la base del paralelepípedo del modelo en plano X,Y. | 51 |
| Figura 35. Condiciones de frontera 3D del modelo en espacio (X,Y,Z)..... | 52 |
| Figura 36. Vista en 3D de modelo MDLE..... | 53 |
| Figura 37. Distribución por altitud de la atmosfera..... | 54 |
| Figura 37. Altitud de la atmosfera con acumulación de ozono..... | 55 |
| Figura 39. Vista del área superficial del modelo MDLE..... | 56 |
| Figura 40. Base rectangular del modelo MDLE. | 57 |
| Figura 41. Estaciones de toma de datos de SENAMHI..... | 63 |
| Figura 42. Datos de ingreso en formato xls. | 64 |
| Figura 43. Datos de ingreso SENAMHI en formato xls para Huachipa. | 65 |
| Figura 44. Datos de ingreso SENAMHI en formato xls para VMT..... | 65 |
| Figura 45. Datos de ingreso del inicio del archivo Station_ASSAY..... | 66 |
| Figura 46. Datos de ingreso del final del archivo "Station_ASSAY. | 67 |
| Figura 47. Cuatro archivos principales de ingreso al MDLE..... | 68 |
| Figura 48. Archivos principales del MDLE en formato SCV. | 68 |
| Figura 49. Interpolación 2D del MDLE en el área asignada. | 69 |
| Figura 50. Interpolación 3D en todo el ámbito del MDLE..... | 70 |
| Figura 51. Selección en 3D de todo el ámbito del MDLE..... | 71 |
| Figura 52. Zoom en 3D del área de selección. | 72 |
| Figura 53. Desplazamiento del área de selección al extremo superior del modelo. | 73 |
| Figura 54. Vista en 3D de isovalores de PM10..... | 74 |
| Figura 55. Vista en 2D de isovalores de PM10..... | 75 |
| Figura 56. Vista en 3D de isovalores de PM10 en otra cota. | 76 |
| Figura 57. Curvas de isovalores de PM10..... | 77 |
| Figura 58. Curvas de isovalores de CO..... | 78 |
| Figura 59. Curvas de isovalores de CO ampliada con zoom. | 79 |
| Figura 60. Curvas de isovalores de CO a detalle..... | 80 |
| Figura 61. Histograma de distribución normal para PM _{2.5} | 81 |
| Figura 62. Histograma de log-normal para PM _{2.5} | 82 |
| Figura 63. Frecuencia acumulada para PM _{2.5} | 82 |
| Figura 64. Interrelación multivariada para PM _{2.5} y SO ₂ | 83 |

| | |
|--|-----|
| Figura 65. Interrelación multivariada para $PM_{2.5}$ y PM_{10} | 83 |
| Figura 66. Interrelación multivariada para O_3 y SO_2 | 84 |
| Figura 67. Semi variogramapara $PM_{2.5}$ | 84 |
| Figura 68. Semi variograma para O_3 | 85 |
| Figura 69. Semi variograma espacial para $PM_{2.5}$ y SO_2 | 85 |
| Figura 70. Isovalores de PM_{10} en lima metropolitana | 90 |
| Figura 71. Variación de valores de PM_{10} | 91 |
| Figura 72. Isovalores de PM_{10} en $\mu g /m^3$ | 92 |
| Figura 73. Isovalor de valor calculado por algoritmos | 94 |
| Figura 74. Isovalor de valor obtenido con modelo para PM_{10} | 96 |
| Figura 74. Isovalor obtenido para SO_x | 97 |
| Figura 76. Isovalor obtenido para NO_x | 98 |
| Figura 77. Isovalor obtenido para O_3 | 99 |
| Figura 78. Isovalor obtenido para CO | 100 |
| Figura 79. Isovalor obtenido para CO | 101 |
| Figura 80. Isovalores obtenido para PM_{10} a 9000 msnm..... | 102 |
| Figura 81. Tendencia unilineal de datos para el Cox. | 104 |
| Figura 82. Saltos de variograma de la Geoestadística del MDLE. | 105 |
| Figura 83. Semivariograma 3D componentes de atmosféricos PM y SO | 106 |

Índice de Tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Limitaciones de los modelos tradicionales y ventajas del MDLE..... | 2 |
| Tabla 2. Coordenadas y altitudes del área de estudio en Lima..... | 5 |
| Tabla 3. Coordenadas UTM de los puntos superficiales del modelo..... | 17 |
| Tabla 4. Nomenclatura de las estaciones..... | 18 |
| Tabla 5. Principales componentes de aire..... | 24 |
| Tabla 6. Principales gases de efecto invernadero..... | 26 |
| Tabla 7. Valor medio de partículas en suspensión..... | 37 |
| Tabla 8. Comparación de valores medios para partículas..... | 37 |
| Tabla 9. Comparación de valores para SO ₂ | 38 |
| Tabla 10. Comparación de valores para NO ₂ | 39 |
| Tabla 11. Comparación de valores para O ₃ | 40 |
| Tabla 12. Coordenadas UTM de las estaciones de monitoreo en metros..... | 62 |
| Tabla 13. Colores y rango de valores establecidos por ICA - Minam..... | 86 |
| Tabla 14. Estado, rango y color de calidad de aire..... | 86 |
| Tabla 15. Índice INCA para partículas en suspensión..... | 87 |
| Tabla 16. Índice INCA para SO _x y NO _x | 87 |
| Tabla 17. Categorías del estado del aire según color y rango INCA..... | 88 |
| Tabla 18. Rango del valor de concentración en µg /m ³ , por cada elemento contaminante..... | 88 |
| Tabla 19. Rango de valores de PM ₁₀ y otros elementos..... | 93 |
| Tabla 20. Rango de valores INCA..... | 93 |
| Tabla 21. Identificación del estado del aire con valor obtenido del modelo para PM 2.5..... | 95 |
| Tabla 22. Identificación de estado del aire con valor obtenido de modelo para PM10..... | 96 |
| Tabla 23. Identificación de estado del aire con valor obtenido para SO _x | 97 |
| Tabla 24. Identificación de estado del aire con valor obtenido para NO _x | 98 |
| Tabla 25. Identificación de estado del aire con valor obtenido para O ₃ | 99 |
| Tabla 26. Identificación de estado del aire con valor obtenido para CO..... | 100 |
| Tabla 27. Distribución multilínea de datos adquiridos a SENAMHI..... | 103 |
| Tabla 28. Distribución multilínea de datos de Stirling..... | 103 |

1. Introducción

1.1 Entorno actual

La contaminación atmosférica es uno de los problemas medioambientales más graves a los que se enfrenta el mundo moderno. A pesar de los esfuerzos por monitorear y mitigar sus efectos, los modelos actuales para la evaluación de los contaminantes en la atmósfera aún presentan limitaciones significativas. Los métodos tradicionales de medición se centran en la observación de las concentraciones de contaminantes a nivel local, generalmente a una altitud de 10 metros sobre el nivel del mar. Sin embargo, esta metodología no logra capturar la complejidad de la dispersión de los contaminantes a diferentes altitudes y zonas espaciales de la atmósfera, lo que limita la precisión de los resultados.

Actualmente, los contaminantes son evaluados utilizando herramientas científicas conocidas como modelos determinísticos, entre los cuales el modelo gaussiano es uno de los más destacados. Este modelo depende de la pluma o penacho de emisión, es decir, la trayectoria del contaminante tras su emisión desde una fuente específica, como una chimenea o escape industrial. Además, otros enfoques incluyen modelos numéricos y de partículas, que se dividen en estáticos, dinámicos, mixtos y estadísticos. Cada uno de estos modelos tiene características unidimensionales o lineales que no logran considerar adecuadamente la variable espacial, es decir, cómo los contaminantes se distribuyen en las diferentes capas de la atmósfera. Tal omisión deja un vacío importante en la comprensión de la dispersión de los contaminantes más allá de un entorno local limitado.

Los modelos de alcance medio, aquellos que se sitúan entre los modelos regionales y locales, logran promediar las concentraciones de los contaminantes presentes en la atmósfera, pero aún carecen de la capacidad para ubicar dichos contaminantes en el espacio geoespacial de manera precisa. Los modelos de dispersión tridimensional (3D) intentan abordar esta limitación, pero su alcance sigue siendo insuficiente. Estos modelos dependen en gran medida de la fuente de emisión y de la altitud de la pluma o chimenea de donde provienen los contaminantes, limitando su utilidad para describir la realidad atmosférica a mayores altitudes, donde los efectos pueden ser mucho más complejos y extendidos.

En la ciudad de Lima, como en muchas otras grandes urbes, el monitoreo de la calidad del aire se realiza bajo estas limitaciones. La falta de un modelo que contemple la localización geoespacial de los contaminantes restringe el análisis de la calidad del aire a un rango de precisión relativamente amplio, y la evaluación se limita a factores y variables locales. Tradicionalmente, se ha medido la concentración de contaminantes en la superficie terrestre, sin tener en cuenta las capas superiores de la atmósfera o la capa límite, lo que impide una evaluación más exhaustiva y precisa de los riesgos asociados a la contaminación atmosférica en diferentes altitudes.

En la Tabla 1, se presenta una comparación detallada de las limitaciones de los modelos tradicionales y las ventajas que introduce el Modelo de Localización Espacial (MDLE), destacando cómo este modelo soluciona las principales deficiencias, permitiendo una mayor precisión y alcance en la evaluación de contaminantes.

Tabla 1. Limitaciones de los modelos tradicionales y ventajas del MDLE.

| Modelo | Alcance | Limitaciones | Ventajas del MDLE |
|----------------------------|---------------------|---|--|
| Modelo Gaussiano | Local (10 m) | No incluye la variable espacial, depende de la pluma de emisión | Permite localizar contaminantes en todas las capas de la atmósfera |
| Modelos de partículas | Local | Unidimensional, no considera dispersión espacial | Integración de algoritmos 3D que calculan concentración y dispersión en 3D |
| Modelos de dispersión 3D | Limitado a lo local | Depende de la fuente de emisión y altitud de la chimenea | Amplía el alcance regional y geoespacial, adaptado a diferentes altitudes |
| Modelos numéricos y mixtos | Regional | No permiten una precisión adecuada en altitudes más altas | Evalúa la contaminación en función de la topografía y condiciones climáticas |

1.2 Objetivos generales del proyecto

- Determinar con alta precisión la concentración y distribución espacial de los contaminantes atmosféricos a diferentes altitudes en la ciudad de Lima, utilizando un modelo avanzado que incorpore variables meteorológicas, geográficas y algoritmos de localización georreferenciada.

1.3 Objetivos específicos del proyecto

- Analizar la influencia de los factores meteorológicos considerados en el modelo, tales como la presión atmosférica, la temperatura y los vientos, en la calidad del aire a diferentes altitudes en la ciudad de Lima, estableciendo relaciones cuantitativas y cualitativas que permitan una mayor comprensión de su impacto en la dispersión de contaminantes.
- Evaluar el impacto de las características geográficas de la ciudad de Lima, como la altitud y la topografía, en la calidad del aire y en la distribución de los contaminantes troposféricos, con el fin de ajustar y optimizar el modelo para reflejar de manera más precisa las condiciones locales específicas.
- Verificar la efectividad de los algoritmos implementados en el modelo para la localización precisa y georreferenciada de los contaminantes atmosféricos en la troposfera, asegurando que el modelo sea capaz de identificar con exactitud las concentraciones a lo largo de diferentes capas atmosféricas en la ciudad de Lima.

2. Antecedentes

2.1 Descripción general del entorno atmosférico en Lima

El entorno atmosférico de la ciudad de Lima presenta características únicas debido a su ubicación geográfica y condiciones meteorológicas particulares. La calidad del aire en esta región se ve influenciada por diversos factores como la topografía costera, la proximidad al océano Pacífico, y las características de la cordillera de los Andes, lo que crea microclimas y patrones de dispersión de contaminantes diferenciados. Estos elementos juegan un rol crucial en la concentración y distribución de contaminantes atmosféricos en diferentes capas de la troposfera.

El modelo de localización espacial de contaminantes atmosféricos (MDLE) presentado en esta investigación tiene como finalidad estimar con precisión las concentraciones de contaminantes a distintas altitudes sobre la ciudad de Lima. Este modelo ha sido diseñado con un enfoque académico y técnico, proporcionando una herramienta para el análisis de la calidad del aire en áreas urbanas densamente pobladas. Aunque simplificado para su aplicación práctica, el modelo conserva los elementos esenciales que permiten comprender la influencia de factores meteorológicos y geográficos en la distribución de los contaminantes.

A nivel profesional, este modelo de localización espacial es clave en el proceso de evaluación de la calidad del aire y su impacto sobre la salud pública y el medio ambiente. Al igual que en el desarrollo de modelos geológicos, donde se identifican y definen unidades homogéneas para la estimación de recursos minerales, en este caso se definen unidades espaciales en la troposfera que permiten analizar de manera precisa la concentración de contaminantes en relación con su altitud y localización geográfica. Este enfoque geoespacial, combinado con algoritmos avanzados, contribuye a la estimación precisa de la calidad del aire en Lima y permite adaptar el modelo a distintas escalas y contextos geográficos.

Al igual que en la evaluación de recursos geológicos, en la evaluación de la calidad del aire se consideran variaciones en las características espaciales, como las fluctuaciones de presión atmosférica, temperatura y otros factores meteorológicos que afectan directamente la dispersión y concentración de los contaminantes en la troposfera. Esta metodología, enfocada en la evaluación de la calidad del aire, no solo proporciona un análisis detallado de la situación en Lima, sino que también sirve como base para futuras investigaciones y la implementación de políticas públicas orientadas a la mitigación de la contaminación atmosférica.

3. Presentación del proyecto

La información utilizada en esta investigación proviene de una extensa base de datos en formato digital, la cual ha sido extraída y procesada para evaluar la calidad del aire en la ciudad de Lima a distintas altitudes. Los datos están organizados en archivos específicos que contienen información clave sobre las concentraciones de contaminantes y las variables meteorológicas asociadas. Estos archivos incluyen coordenadas georreferenciadas de las estaciones de monitoreo (archivo Estaciones.txt), datos meteorológicos como presión, temperatura y velocidad del viento (archivo Meteo.txt), así como las concentraciones de contaminantes atmosféricos en partículas por millón (ppm) a diferentes altitudes (archivo Contaminantes.txt).

Las coordenadas geográficas que delimitan el área de estudio en la ciudad de Lima se muestran en la Tabla 2, la cual incluye las altitudes mínimas y máximas alcanzadas durante el monitoreo, cubriendo un rango desde la superficie terrestre hasta los 10,000 metros de altitud. Esta información es esencial para comprender cómo varían las concentraciones de contaminantes en las diferentes capas de la atmósfera.

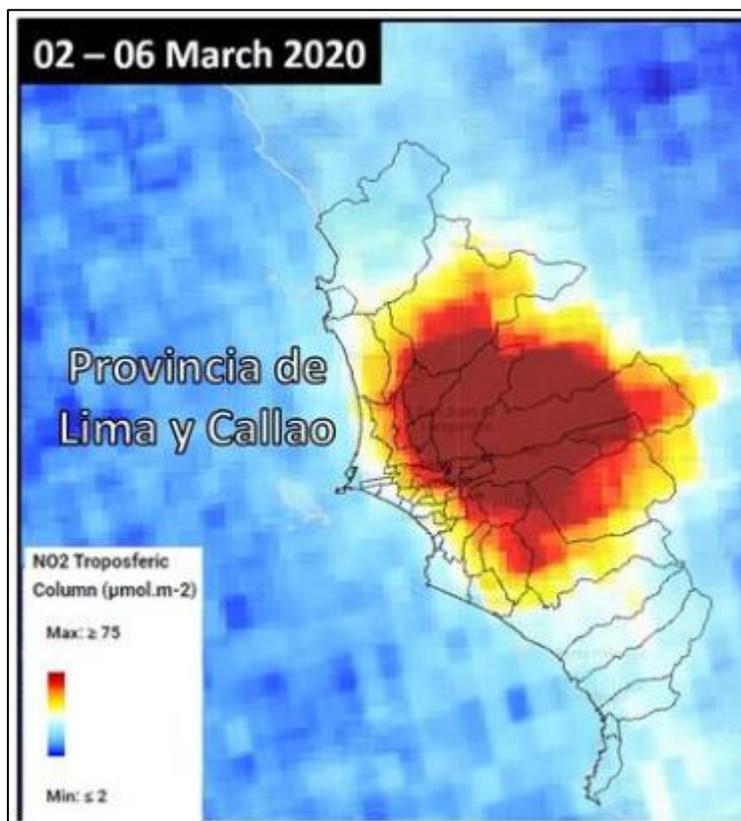
Tabla 2. Coordenadas y altitudes del área de estudio en Lima.

| Este [m] | Norte [m] | Altitud [m] |
|-----------------|------------------|--------------------|
| Mínimo | 276,340 | 8,750 |
| Máximo | 277,540 | 8,900 |
| Longitud | 1,200 | 150 |

La base de datos está compuesta por 84 estaciones de monitoreo distribuidas en diferentes zonas de Lima, y cuenta con más de 12,000 registros de mediciones de calidad del aire a diferentes horas del día. La zonificación incluye áreas urbanas e industriales, lo que permite realizar una comparación detallada entre las concentraciones de contaminantes en estos entornos. Los algoritmos utilizados en el modelo de localización espacial de contaminantes troposféricos (MDLE) permitieron georreferenciar y modelar las concentraciones a lo largo de las diferentes altitudes de la atmósfera, proporcionando una visión integral de la distribución de los contaminantes.

A continuación, se presentan diferentes representaciones gráficas (Figuras 1 a 5) que ilustran las concentraciones de contaminantes a distintas altitudes, la influencia de las condiciones meteorológicas, y la distribución geográfica de las estaciones de monitoreo:

Figura 1. Vista en planta de la ciudad de Lima, indicando la concentración de contaminantes en la capa límite de la atmósfera.



Como se puede observar en la figura anterior, la distribución de las estaciones de monitoreo no sigue una malla regular debido a la infraestructura y topografía de la ciudad, en las Figuras 5 y 6, se aprecia que las concentraciones de contaminantes tienden a agruparse en áreas específicas a distintas altitudes. Estas áreas presentan una malla irregular, con distancias aproximadas de 100 metros entre estaciones en zonas urbanas y mayores distancias en áreas periféricas.

4. Contexto teórico

4.1 Base filosófica

Según el Filósofo Anaximenes, M (-538 a.c.), quien considera que la esencia de la existencia es el aire. Los seres vivos existen, por la presencia del aire que se respira. De éste componente, nacen las cosas, y a él vuelven cuando se corrompen en su naturaleza. Asimismo; las características de la materia, cualquiera que sea, su estado (estados de la materia), son productos de la expansión de los componentes del aire.

4.2 Antecedentes de la investigación

Salvador Martínez, Pedro (2015). “Caracterización de la contaminación atmosférica producida por partículas en suspensión en Madrid. España”. La presente investigación se realizó en el ayuntamiento de Madrid, Comunidad Autónoma de Madrid, entre 2010-2015, en este estudio se ha abordado como objetivo el estudio, bajo una perspectiva multidisciplinar, de la contaminación por partículas atmosféricas en suspensión en la cuenca de Madrid, analizando series anuales, pero en forma permanente por día, concentraciones de PM10 y PM2.5, obtenidos en distintas estaciones de medida de este área geográfica durante un periodo de cinco años (2010 – 2015). Este proceso se hizo, a partir del desarrollo experimental llevada a cabo en varios lugares de Madrid con diferentes instrumentos de medición, se han obtenido nuevas series de datos, incluyendo en este caso la medida por primera vez, niveles de PM2.5. El análisis estadístico de estos datos ha permitido asimismo profundizar en su origen y establecer las categorías o fuentes de emisión, así como estimar los aportes de las fuentes a los niveles de inmisión de este contaminante, obtenidos diariamente en Madrid e identificar regiones fuente remota de aportes de PM10 a dichos niveles.

Molina Jiménez, Pedro (2013). “Simulación numérica de un problema de contaminación atmosférica”. Madrid. España. Las derivadas parciales de difusión con reacción química es el principio de los modelos a efectos de la dispersión de contaminantes, los diversos métodos numéricos aplicados en su resolución son objeto de amplios análisis en el contexto de su desarrollo. Asimismo, muestra un método conservador para la resolución de la parte advectiva, por medio de derivadas parciales, modelando así, la dispersión de contaminantes y su transporte químico, basado

en elementos finitos y su correspondiente interpolación, asimismo, este método; esta fundamentado, en la conservación exacta de la masa que es transportada, específicamente, la ley de conservación de las masas.

Cáceres Lillo, Dante (2015). "Evaluación de los efectos agudos en la función pulmonar por exposición a material fino PM2.5 en niños que viven próximos a una playa contaminada masivamente con relaves mineros, Chanaral, Chile". Este estudio, realizó un análisis longitudinal, en una muestra representativa de 140 escolares entre 6 y 15 años que viven cerca de una playa contaminada por relaves mineros, la muestra, fue sometida a exámenes de función de la respiración en periodos de dos semanas. La determinación de metales, fueron realizados por fluorescencia de rayos x. La relación, entre la exposición diaria a PM2.5 y, los cambios en la función del pulmón fueron estimadas por modelos de regresión, observándose una disminución notoria, en la capacidad vital frente a la exposición a partículas PM2.5.

4.3 Bases Teóricas

4.3.1 Gases contaminantes de la atmosfera

Por primera vez, se establece como tales desde los años 60, los cuales son, los clorofluorocarbonos (CFC, ó "freones"), de efectos negativos: destruyen la capa de ozono en la zona siguiente de la troposfera, e incrementan el efecto invernadero. Los aerosoles ahora en adelante son sustituidos por otros gases, como el CO2 (Martínez, 2004).

4.3.2 Sustancias contaminantes atmosféricas

Es considerado así por (Seinfeld, 1986), a cualquier sustancia que forma parte del aire en concentraciones más allá de su nivel normal y que produce efectos medibles en personas, animales, vegetación o materiales. Entre las clases de contaminantes tenemos: CO, SO2, (O3, Partículas: Aerosoles líquidos o aerosoles sólidos. Primarios: emitidos directamente a la atmósfera. Secundarios: formados en la atmósfera en transformaciones físico-químicas y Según sus contenidos químicos: compuestos con carbono y con azufre (Seinfeld, 1986).

4.3.3 Fuentes de contaminación atmosférica

De acuerdo con Schmitz (2006), las fuentes de contaminación atmosférica se dividen en dos categorías principales: naturales y antropogénicas. Esta clasificación es fundamental para entender las diversas contribuciones a la contaminación del aire y sus impactos en el medio ambiente y la salud humana. A continuación, se presentan en detalle estas dos categorías de fuentes:

Figura 2. Fuentes de contaminación Naturales y antropogénicas.



Fuente: Schmitz R, y otros (2006)

Figura 3. Fuentes de contaminación puntual y lineal.



Fuente: Schmitz R, y otros (2006)

Figura 4. Las plumas de contaminación atmosférica.

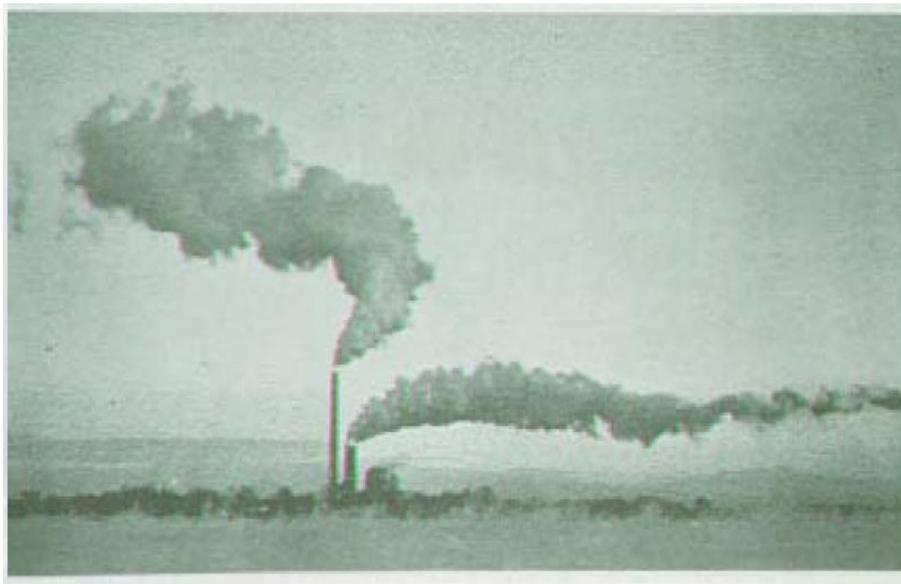


Fuente: Schmitz R, y otros (2006)

4.3.4 Dispersión de contaminantes

Gerraud R., (2006), este trabajo se basa en el conocimiento científico o positivo pues pasó por distintas etapas desde su inicio, deja también abierta la posibilidad de comprobar o rechazar mis hipótesis, en el desarrollo de esta tesis he considerado las corrientes filosóficas, positivista, Auguste Comte, refutabilidad de Karl R. Popper y pragmatismo de William James. Indica que los factores meteorológicos de la contaminación atmosférica que influyen en un modelo de distribución de contaminantes son: Transporte y Dispersión, entendiéndose este último como la movilidad de las sustancias contaminantes desde su foco de emisión como plumas de emisión de gases en las fábricas y su desplazamiento por el viento alrededor de esta pluma de emisión.

Figura 5. Gases tóxicos de plumas de emisión.

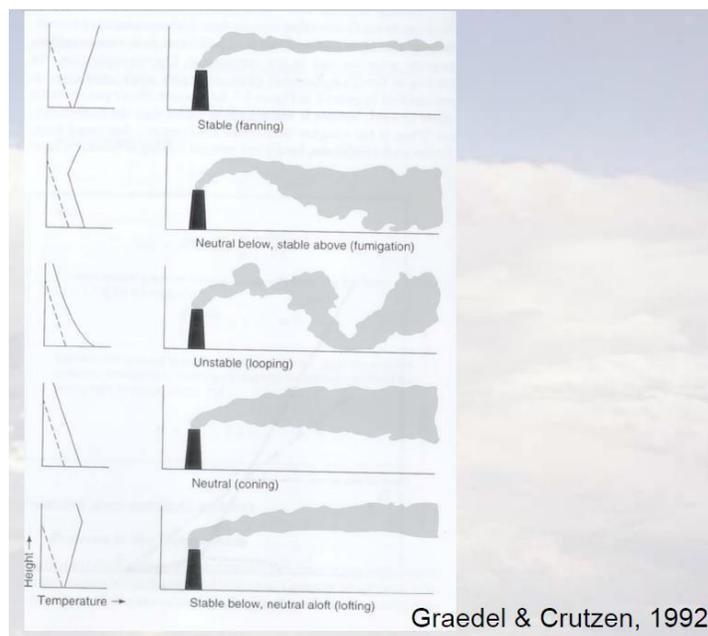


Fuente: Gerraud Rene, (2006).

4.3.5 Plumas de dispersión

En el cuadro siguiente, (Graedel et al, 1992), muestran las distintas formas de desplazamiento de los contaminantes a través de las chimeneas o plumas de emisión de las fábricas con procesos industriales de los productos, así como de las fundiciones y refinerías, cada uno de los esquemas tiene un modelo matemático de dispersión a aplicar para el estudio del transporte de los contaminantes.

Figura 6. Gases tóxicos de plumas de emisión.



Graedel & Crutzen (1992)

4.3.6 Indicadores de calidad de aire

Clasificado en bueno, moderado, malo, muy malo y alerta máxima, basada en los valores establecidos por los Estándares Nacionales de Calidad del Aire – ECA, así como los Niveles de Alerta Nacional de Contaminantes del Aire. Expresados en Indicador de Calidad de Aire - ICA, que es una herramienta relacionado a la explicación de la calidad del aire (SENAMHI, 2013).

4.3.7 Velocidad de viento

Medido a niveles bajos de la atmósfera, y registra, los vientos fuertes del oeste a este con intensidades mayores a 10 m/s y de débiles a moderados (2 a 4 m/s), mayormente del este sobre el continente sudamericano y del sur y sureste sobre bajas latitudes. A nivel del mar, los vientos con dirección del sur-sureste a sureste y velocidades varían entre 2 y 7 m/s. Asimismo, la velocidad máxima media es ligeramente menor (0,3 m/s), que su valor climático, en la categoría de vientos moderados según (SENAMHI, 2011).

4.3.8 Inversión Térmica

Afloramiento marino activo e intensa inversión térmica con altitud promedio de su base a 358 m, espesor medio 228 m y gradiente promedio de 1,4°C/100 m. SENAMHI, (2011).

4.3.9 Temperatura atmosférica

Temperatura atmosférica. Según SENAMHI, (2011), aquella que se presenta en promedio en la ciudad de Lima varía según las estaciones del año cuya gradiente es lineal en el espacio atmosférico.

4.3.10 Humedad relativa

Saturación del medio atmosférico por moléculas de agua en suspensión conocido como humedad relativa en la atmosfera, la humedad relativa mínima media es 1% menor que su valor climático., pero en la ciudad de Lima este valor está por encima de los 80%. SENAMHI, (2011).

4.4 Marco conceptual

- 4.4.1 **Dióxido de azufre - SO₂.** - Es un gas incoloro que se percibe por un fuerte olor a niveles superiores a 0,5 ppm. El óxido sulfuroso, precede al ácido sulfúrico (H₂SO₄), el cual contribuye a la deposición ácida afectando al clima. Algunos focos de emisión son la quema del carbón mineral, la combustión de hidrocarburos y los volcanes, se eliminan por reacción química, o por disolución en agua (Jacobson, 2002).
- 4.4.2 **Modelamiento espacial.** - Es la base científica de los fenómenos físicos expresados en expresiones matemáticas y se pueden elegir a partir de: Método de diferencias finitas, Métodos de elementos finitos, Métodos de volumen finito, Métodos de descomposición de dominio (Kiely, 2006).
- 4.4.3 **Partícula menor de 10 micrómetros (PM).** - El PM_{2.5}, corresponde a las partículas cuyo diámetro aerodinámico es menor a 2.5 µm y PM₁₀, a las menores de 10 µm³, pero mayor a 2.5 µm., provienen de los procesos de combustión y de fenómenos naturales. Las partículas son eliminadas de la

atmósfera mediante dos mecanismos: la deposición en la superficie de la Tierra y la incorporación a gotas de las nubes durante la formación de la lluvia (Seinfeld, 2006).

- 4.4.4 **Modelos por ordenador.** - Es el conocimiento científico y tecnológico que se integra en modelos matemáticos que se transforman en programas de cómputo (Kiely, 2006).
- 4.4.5 **Modelo matemático.** - Sistema de ecuaciones diferenciales. (Kiely, 2006).
- 4.4.6 **Métodos híbridos.** - Herramientas de modelización. - Aquellos relacionados con la predicción de fenómenos físicos a través de: Interpolación con ecuaciones diferenciales. (Kiely, 2006).
- 4.4.7 **Óxidos de nitrógeno NOx.** - Originado en los procesos de combustión junto con el NO y se forma también en la atmósfera por la oxidación de NO, para representar a NO y NO₂ en conjunto se suele designar como NO_x. La importancia del dióxido de nitrógeno radica en su capacidad de absorber toda la gama visible y ultravioleta del espectro solar en la atmósfera inferior, el NO₂ (Seinfeld, 2006).
- 4.4.8 **Ozono O₃.**- Formado en la atmósfera por reacciones fotoquímicas con presencia de luz solar y contaminantes como los óxidos de Nitrógeno NO_x y diversos compuestos orgánicos volátiles (COV). Se destruye en reacciones con el NO₂ y se deposita en el suelo (OMS, 2005).

4.5 Marco normativo

(MINAN D.S. N°003, 2017), donde se aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), para Aire con sus respectivas disposiciones complementarias. Esta norma deroga al Decreto Supremo N° 074-2001-PCM, al Decreto Supremo N° 069-2003-PCM, al Decreto Supremo N° 003-2008-MINAM y al Decreto Supremo N° 006-2013-MINAM.

(MINSA D.S. N° 009, 2003)., su modificatoria y Directiva del Reglamento de los Niveles de Estados de Alerta Nacionales de Contaminantes del Aire.

(DIGESA R.D. N° 1404, 2005), Protocolo de Monitoreo de Calidad del Aire y Gestión de los Datos (Digesa, 2005).

5. Procedimiento en la construcción del modelo

5.1 Tipo y diseño de investigación

- 5.1.1 **Tipo:** Aplicada, porque utiliza los algoritmos los de Stirling y kriging para procesar numéricamente de datos geoespaciales sustentado en el elipsoide de localización geoespacial para ubicar la posición en el espacio 3D del elemento estudiado en variables regionalizadas.
- 5.1.2 **Nivel:** Es de tipo evaluativo experimental, porque realiza iteraciones lógicas y algorítmicas con los datos originales de las fuentes de recolección de data procesándoles en el tiempo permitiendo ubicar el contaminante en el espacio, así como su concentración de esta.

5.2 Diseño de la investigación

En este estudio, establecemos tres variables independientes y una variable dependiente donde manipulando las variables independientes relacionadas a las concentraciones de los elementos contaminantes en el modelo espacial de localización, podemos relacionar con los indicadores de calidad según la cantidad de los contaminantes atmosféricos y encontrar el estado del aire. Este análisis se realiza en forma global considerando la totalidad de los focos de contaminación existentes en el área de estudio representados en este caso por las estaciones de monitoreo del SENAMHI de donde obtenemos los datos por horas y días las cuales están relacionados a los aspectos meteorológicos como la temperatura, velocidad del aire, humedad, altitud y cantidad de contaminante.

Mediante las variables independientes y al manipular las expresiones matemáticas en el espacio, identificamos el comportamiento de los contaminantes tanto en ubicación geoespacial como la cantidad en ($\mu\text{g} /\text{m}^3$) de la misma y su consecuencia o efecto un determinado punto espacial en la zona espacial atmosférica de estudio.

Los procesos de experimentación se desarrollan mediante las iteraciones de los algoritmos, los diferentes valores de las concentraciones en ($\mu\text{g} /\text{m}^3$), de los elementos contaminantes encontrados mediante el algoritmo de Kriging basado en la ecuación del elipsoide geoespacial en el modelo y puede ser replicable en las grandes urbanizaciones.

La parte explicativa y cuantitativa del estudio están presentes al desarrollar el modelo MDLE, porque los resultados de georreferencia detallan la situación espacial y los valores de las

concentraciones en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), son cuantificadas por las expresiones matemáticas presentes en cada algoritmo.

- a) **Carácter explicativo.** - Relaciona las variables independientes del modelo con la variable dependiente teniendo en cuenta la ubicación geoespacial de los elementos contaminantes atmosféricos que viene a ser las variables independientes y la calidad del aire en la ciudad de Lima, que es la variable dependiente, el mismo que se precisa al manipular las tres variables independientes. (Fernández., 1998).
- b) **Carácter cuantitativo.** - La data adquirida para esta investigación, tiene como fuente las 10 estaciones de monitoreo del aire de propiedad de SENAMHI, ubicados espacialmente en todo el ámbito geográfico de la ciudad de Lima Metropolitana, que estudia el modelo, crean bases de datos numéricos con control de calidad de datos realizados previamente por SENAMHI, ya que se adquiere bajo un costo. Estos datos de cantidad de contaminantes atmosféricos, temperatura, altitud, humedad y velocidad de viento, son ingresados y evaluado por el algoritmo de Stirling y kriging, identifican geo espacialmente dentro del alcance geométrico del modelo 3D, y como resultados de cálculos en iteraciones calculan las concentraciones en todo el ámbito espacial atmosférico establecido por el modelo MDLE.

5.3 Unidad de análisis

5.3.1 Ubicación y ámbito geográfico

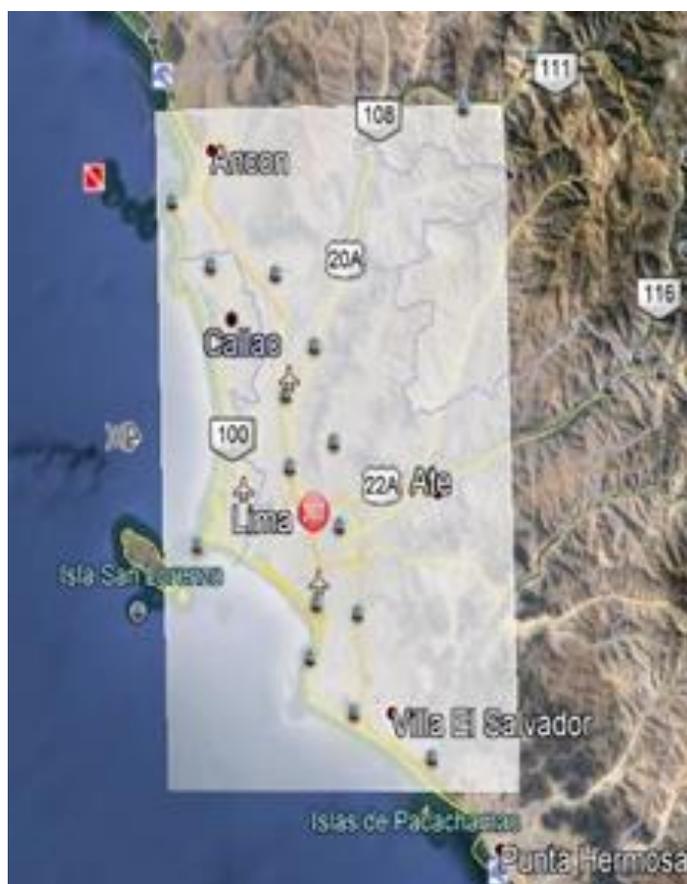
La unidad de análisis de esta investigación es el ámbito geográfico espacial ubicado en la ciudad de Lima la misma que tiene una dimensión regional de un paralelepípedo plano de base 67km por 44km y una altitud de 10Km, y los diferentes contaminantes atmosféricos presentes en esta región espacial. Las coordenadas del sistema “Universal Transversal Mercator” - UTM se muestran en la tabla No. 01. En el modelo se utiliza específicamente las coordenadas UTM WGS 84.

Tabla 3. Coordenadas UTM de los puntos superficiales del modelo.

| Estación | X | Y | Z |
|-----------------|----------|-----------|----------|
| E01A00 | 258772.1 | 8705786.4 | 0 |
| E02B00 | 301776.5 | 8705786.4 | 1111 |
| E03C00 | 304743.5 | 8641591.4 | 327 |
| E04D00 | 260991.1 | 8641087.4 | 0 |

La figura 7 representa la ubicación y el área de estudio en el espacio geográfico de Lima Metropolitana.

Figura 7. Área de estudio sección rectangular del modelo MDLE.



5.3.2 Población de estudio

La población de estudio está conformada por las diez estaciones de monitoreo de calidad del aire implementadas por SENAMHI, los mismos que miden automáticamente en forma permanente la concentración de contaminantes atmosféricos los cuales tienen origen o son producido por el hombre como aquellas que se originan en forma natural. Los contaminantes más relevantes son partículas finas, partículas sólidas en suspensión, gases tipos óxidos y gases sulfurados además de los metales pesados en suspensión.

5.3.3 Tamaño y selección de muestra

El tamaño de la muestra está constituido por la totalidad de las estaciones de medición constituyendo la totalidad del universo del número de estaciones implementadas por SENAMHI, que son puntos de medición continua de cantidad de contaminantes atmosféricos en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), en Lima metropolitana, cubren por su ubicación la extensión de la ciudad de Lima.

La selección de la muestra poblacional es entonces todo el universo, representado por las 10 estaciones de medición y seguimiento de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Lima, a partir de los datos diariamente medidos y adquiridos para este estudio, se realizan los cálculos de localización espacial de los contaminantes atmosféricos en todo el ámbito de la ciudad de Lima.

Tabla 4. Nomenclatura de las estaciones.

| No. de orden | Número de la estación en forma creciente de norte a sur | Nombre de la estación de monitoreo de calidad del aire |
|---------------------|--|---|
| 1 | Estación No. 01 | Estación Puente Piedra |
| 2 | Estación No. 02 | Estación Carabaylo |
| 3 | Estación No. 03 | Estación San Martín de Porres |
| 4 | Estación No. 04 | Estación San Juan de Lurigancho |
| 5 | Estación No. 05 | Estación Ate |
| 6 | Estación No. 06 | Estación Huachipa |
| 7 | Estación No. 07 | Estación Santa Anita |

| | | |
|----|-----------------|----------------------------------|
| 8 | Estación No. 08 | Estación Campo de Marte |
| 9 | Estación No. 09 | Estación San Borja |
| 10 | Estación No. 10 | Estación Villa María del Triunfo |

5.4 Técnicas de recolección de datos

Los datos adquiridos para esta investigación cuentan con un control de calidad realizados previamente por personal y equipo técnico de SENAMHI, dichos datos al ser medidos en las diez estaciones de monitoreo debidamente calibradas y sus procedimientos de cuantificación y manejo cumplen con los estándares internacionales de calidad y precisión en la medición aseguran la fiabilidad de estos. La figura 8 muestra la metodología y la técnica en la toma de datos.

Figura 8. Método y técnica de recolección de datos.

| Parámetro | Fecha primer registro | Fecha último registro | Método | Técnica | Marca | Gráficos |
|---|-----------------------|-----------------------|------------|--|-------------------|---|
| Material Particulado menor a 10 micras (PM10) | 03/12/2014 | 26/06/2020 | Automatico | Atenuacion de Rayos Beta Monitor 5014i | THERMO SCIENTIFIC |  |
| Material Particulado menor a 2.5 micras (PM2.5) | 03/12/2014 | 26/06/2020 | Automatico | Atenuacion de Rayos Beta Monitor 5014i | THERMO SCIENTIFIC |  |
| Dioxido de Azufre SO2 | 03/12/2014 | 26/06/2020 | Automatico | Fluorescencia UV Analizador T100 | TELEDYNE |  |
| Oxidos de Nitrogeno NO2 | 03/12/2014 | 26/06/2020 | Automatico | Quimioluminiscencia Analizador T200 | TELEDYNE |  |
| Monoxido de Carbono CO | 03/12/2014 | 26/06/2020 | Automatico | Infrarrojo No Dispersivo Analizador T300 | TELEDYNE |  |
| Ozono Troposferico O3 | 03/12/2014 | | Automatico | Fotometria UV Analizador T400 | TELEDYNE |  |

5.5 Validación de datos

La información adquirida de las diez estaciones de SENAMHI, institución estatal encargada de realizar el control de la contaminación del aire a través del monitoreo constante y continuo ofrece los servicios de proveer datos oficiales y validados de estas diez estaciones de monitoreo y

medición continua de los elementos contaminantes troposféricos en la ciudad de Lima. La calidad de datos medidos los realiza desde la calibración de sus instrumentos y los métodos de medición con estándares internacionales de calidad, cuyos detalles de la técnica de medición y el instrumento están detallados para partículas en suspensión y gases se muestra en la figura 8 anteriormente indicado.

6. Calidad de aire y contaminación atmosférica

6.1 Generalidades

6.1.1 La atmosfera y sus características

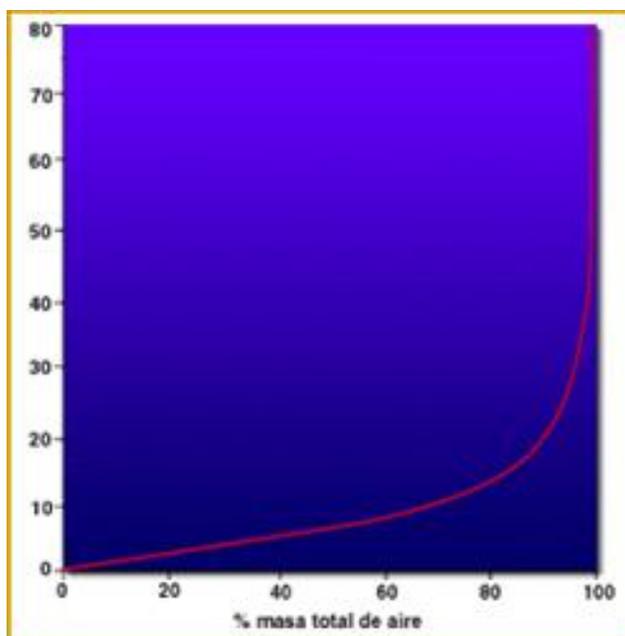
a) Atmosfera

Según la Real Academia española – RAE, se define como atmosfera a la capa gaseosa que envuelve la tierra y a otros cuerpos celestes.

Por otro lado, Cuadrat y Pita (1997), afirman que la atmosfera es una capa gaseosa de 10 mil kilómetros de espesor aproximadamente que rodea la litosfera y la hidrosfera. Está compuesta de gases y partículas sólidas en suspensión, así como partículas líquidas los cuales son atraídos por la gravedad de la tierra

El mayor porcentaje de la masa atmosférica se encuentra por debajo de los 10 kilómetros de altitud. En la figura 9, se observa que, a partir de la cota de los 10 kilómetros a más, el monto porcentual de la masa está en un 20%, mientras que el 80% se encuentra en promedio por debajo de los 10 kilómetros.

Figura 9. Masa porcentual atmosférica en los 10Km de altitud.



Cuadrat y Pita, (1997)

Como se puede observar en la figura 9, la atmosfera se subdivide en dos regiones en base a los niveles porcentuales de masa atmosférica, la primera la zona espacial más densa que va de 0 a 10Km. y la segunda zona de 10Km hasta los 80Km donde la masa atmosférica es mínima.

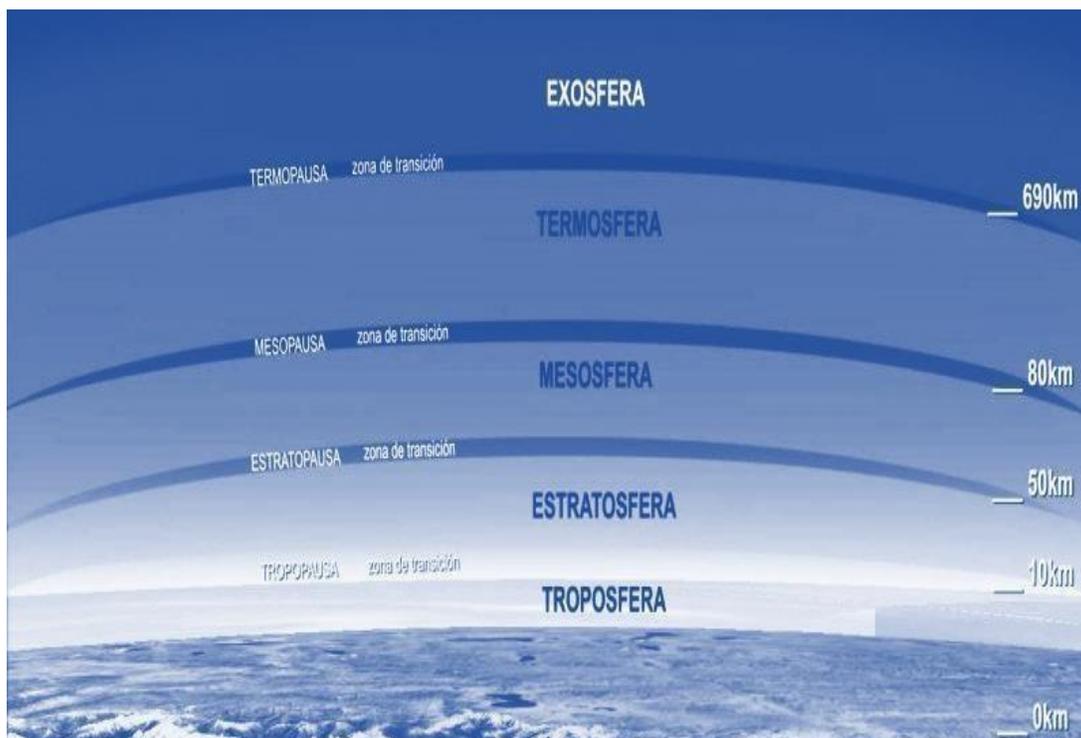
b) Capas o zonas espaciales de la atmosfera

Según Estela R., María (2019), la atmosfera se subdivide en varias zonas espaciales conocidos también como capas atmosféricas:

- **Tropósfera.** Aquella que está en contacto con la superficie de la tierra, es la parte donde se hace los estudios del aire y su componente y aquí se acumula la mayor parte de los gases en el aire. Su longitud total alcanza los 10 km de altitud, es la zona que tiene mayor temperatura en comparación con las otras zonas de la atmosfera terrestre, aun cuando en sus límites exteriores la temperatura es -50° Celsius.
- **Estratósfera.** La dimensión de la zona espacial, es desde 10km a 50 km de altitud, y posee sub zonas con presencia de elementos de saturacion. Una de ellas es la ozonósfera, donde la radiación solar afecta al oxígeno, formando moléculas de ozono O₃ que conforman la “capa de ozono”.
- **Mesósfera.** Su dimensión varía entre 50 a 80 km., es la zona espacial intermedia de la atmósfera, es la zona de más baja temperatura en la atmósfera, llegando hasta -80° Celsius.
- **Ionósfera o termósfera.** Su dimensión esta entre los 80km hasta los 800 km de altitud, aquí el aire es de bajan densidad, permite oscilaciones de temperatura contrastantes influenciado por la intensidad solar, registra temperaturas de 1500° Celsius durante el día y -80 grados Celsius en la noche.
- **Exósfera.** Es la zona externa de la atmósfera terrestre, se encuentra más allá de los 800 km a los 10.000 km de altitud, allí tienen lugar la fuga de los elementos más livianos de la atmósfera, como el helio o el hidrógeno.

En la figura 10, se muestra las diferentes zonas espaciales donde podemos apreciar la altitud con relación a la superficie de la tierra.

Figura 10. Zonas espaciales atmosféricas con longitud media.



c) Aspectos físicos de la Atmósfera

En toda la zona espacial de la atmósfera terrestre se observa la presencia de los diversos tipos de gases, salta a la vista que el mayor porcentaje de masa se acumula en los primeros 10 km de altitud, asimismo, casi todos los investigadores coinciden que el 95% del aire se encuentra en esta zona espacial que está en contacto con la superficie de la tierra. Los principales gases presentes en los primeros 80 Kilómetros de la atmósfera son; nitrógeno 78,08%, oxígeno 20,94%, H₂O del 1% al 4%, y a nivel superficial el argón 0,93%. Otros que por su cantidad de saturación son despreciables $m \approx 0$.

La zona espacial comprendida desde los 80 km hacia arriba tiene capas diferenciadas de nitrógeno molecular entre los 80 kilómetros a los 400 km, oxígeno atómico de 400 kilómetros a los 1100 kilómetros, helio desde los 1100 kilómetros a los 3500 kilómetros y finalmente hidrógeno que va desde los 3500 kilómetros hasta los 10 mil kilómetros. Por otro lado, la presión y

temperaturas atmosféricas decrecen con la altitud, debido a la caída de temperatura en las capas exteriores que son poco densas, tal como se observa en la figura 10. Finalmente, en la estratósfera (entre 10 a 80 kilómetros de altitud), se encuentra la capa de ozono, motivo por el cual es conocido también como ozonósfera, en esta zona espacial de la atmosfera se encuentra una saturación densa de O₃ que obstruye la radiación solar a la superficie de Lima. Asimismo, los gases presentes en esta zona y aquella que se encuentra entre los 10 primeros kilómetros forma una barrera de rápida dispersión del calor hacia el espacio, conocido como “efecto invernadero”.

El presente estudio se desarrolló en la zona espacial conocido como troposfera que tiene un rango de altitud que va desde 0 a 10 kilómetros y es la zona donde la masa atmosférica se encuentra en un 80% de toda la atmosfera.

6.1.2 El aire y sus componentes

Según la Real Academia española – RAE, se define como un que se constituye como parte de la atmosfera de la tierra, con componentes principales de oxígeno y nitrógeno, además de otros componentes en menor cantidad como el anhídrido carbónico y moléculas de H₂O, transparente, incoloro, inodoro e insípido; sin volumen definido.

Según el (Minan, 2019) el aire es una mezcla de diferentes tipos de gases, que forma la atmósfera de la Tierra y considera que el aire puro, que se encuentra alrededor de la Tierra tiene la siguiente composición volumetrica:

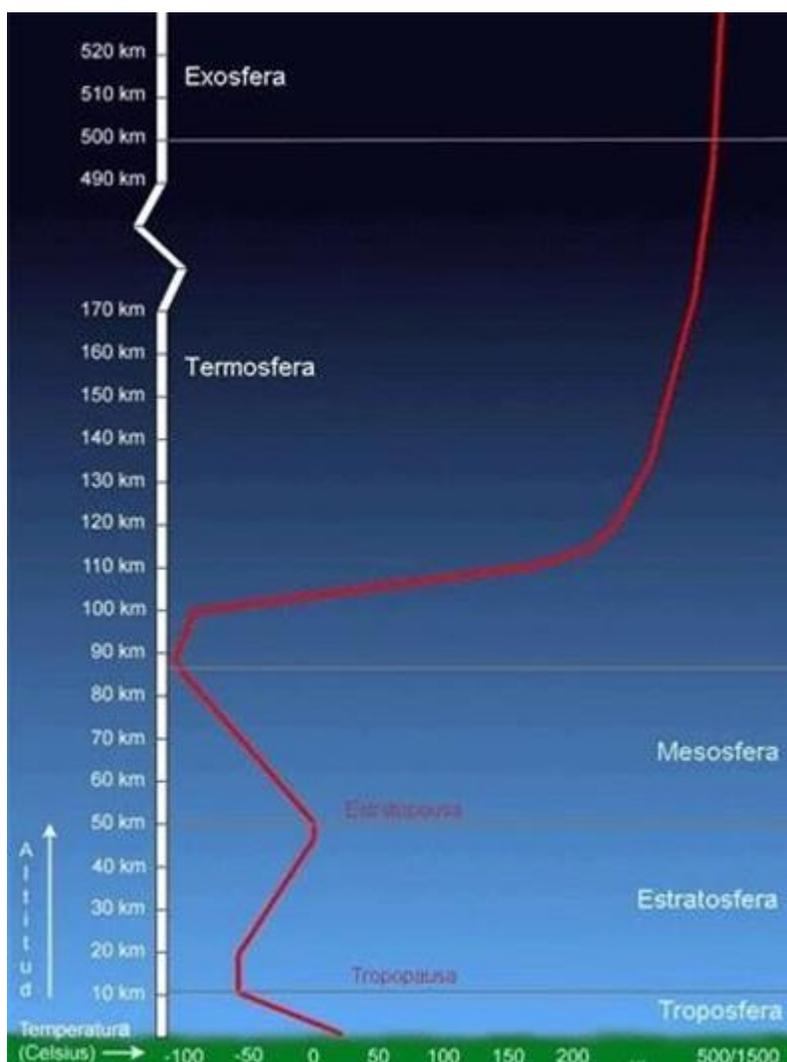
Tabla 5. Principales componentes de aire.

| COMPONENTES | (%) |
|--------------------------|-----|
| Nitrógeno-N ₂ | 78 |
| Oxígeno-O ₂ | 21 |
| De menor cuantía | 1 |

Aparte de los gases mostrados en la tabla 5, existen otros gases que componen el aire entre ellos podemos indicar a los elementos de los gases nobles al Argón, Neón, Helio, Criptón, Xenón, Hidrógeno, Metano, y compuestos como el Óxido nitroso y vapor de agua cuya composición varía entre 0.5 y 4 %, además de estos también se encuentra el ozono en la zona

espacial denominado troposfera (ozono troposférico), y partículas sólidas en suspensión. Estas partículas sólidas existen como parte del aire en dicha zona espacial de la troposfera, compuestos esencialmente por polvo arrastrado de la superficie de la tierra y cenizas volcánicas. Son por lo general menores a 10 micrómetros de diámetro. La figura 11, se muestra se muestra la zona donde se encuentran estos componentes del aire, así como la variación de la temperatura según va cambiando las zonas espaciales.

Figura 11. Longitudes de la troposfera donde se ubica el aire.



Adaptado del Ingeominas, Colombia (2010).

Se aprecia en la figura 12, la región del ozono el cual se encuentra en la zona espacial conocido como estratósfera es el escudo protector de la tierra frente a la radiación ultravioleta proveniente del sol, mientras que en la zona espacial denominado tropósfera, el ozono forma parte del aire, y se presenta como smog. En la troposfera, que es el, primer nivel de la atmósfera es donde ocurre, en su mayoría los fenómenos meteorológicos, como lluvia, granizada, tormenta eléctrica, vientos y, todos los fenómenos climáticos.

6.1.3 Componentes nocivos en el aire

El aire se contamina cuando el equilibrio de las sustancias que componentes, son alteradas, tornándose en una mezcla de partículas sólidas y gases en el aire.

a. Factores que alteran el equilibrio de los componentes básicos del aire

Entre ellos, destacan, la temperatura, la dirección vectorial de velocidad del viento y la altitud, son las principales causas para el incremento de la concentración de los elementos contaminantes del aire.

b. Gases de efecto invernadero en el aire

Estos gases que se muestran en la tabla 6, son el CO₂, producto de la combustión, el NO₂, el CH₄, que se origina durante la explotación de hidrocarburos. La presencia de estos gases eleva la temperatura de la Tierra, y se calcula en promedio de 3.5 °C de incremento en el último siglo, y producirá que será la causa de las alteraciones de los ecosistemas.

Tabla 6. Principales gases de efecto invernadero.

| | |
|-----------------|------|
| Óxido Carbonico | .CO2 |
| GAS_Metano | .CH4 |
| Óxido Nitroso | .NO2 |

La figura 11, muestra la tendencia natural que tiene la temperatura del aire al disminuir en relación con la altitud a nivel de la troposfera, el mismo que parte de una media de 14°C, a -50°C,

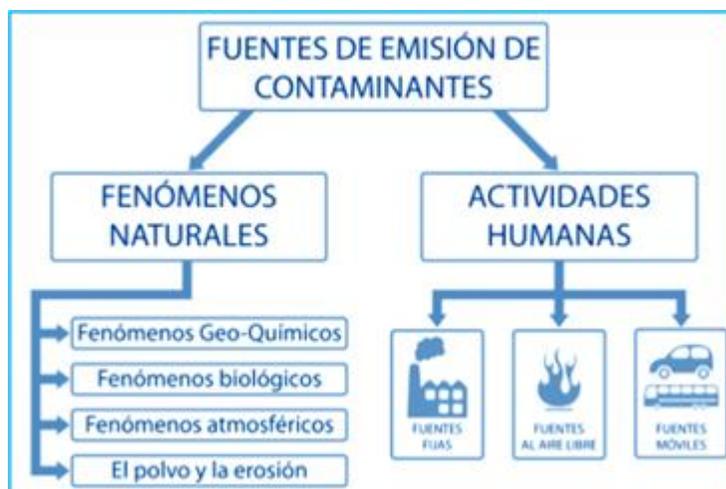
con intervalos de 0.64 a 1°C, cada 100 metros de elevación; hoy esta razón numérica, se encuentra en un decremento de 1.5 a 2.1 grados Celsius por una longitud de 100 metros.

c. Eliminación del O₃

Proviene de la reacción de una media de 90 productos químicos que, al llegar a la estratosfera, eliminan al ozono. Entre estos gases los principales son: Clorofluorocarbonos-CFC, Hidrofluorocarbonados-HFC, Halones, Bromuro de metilo, Tetracloruro de carbono, Hidrobromofluorocarbonos, Metilbromuro y Bromoclorometano.

La figura 12, esquematiza la alteración del equilibrio de la concentración de los elementos que componen el aire y algunos de ellos pasan a ser elementos contaminantes al incrementarse su concentración además de la introducción a la atmosfera sustancias gaseosas o solidas que no son componentes originales del aire y son producidas principalmente por la actividad del hombre.

Figura 12. Proceso de alteración de componentes del aire.



Minan, 2019.

d. Fuentes que incrementan la concentración de elementos contaminantes en el aire.

Los Vehículos motorizados, por el uso de hidrocarburos, emitiendo diversos gases como (CO, NO₂, SO₂), así como el plomo y partículas PM_x a la atmósfera. El plomo (Pb) como elemento de contaminación del aire por estar presente en los hidrocarburos. Asimismo, están como principales focos de origen de elementos nocivos del aire las fábricas, fundiciones, combustión de basura, y causas naturales como la erosión de los suelos.

6.1.4 Calidad del aire

Son seis los elementos contaminantes del aire, tal como se aprecia en el ítem 4.1.3, de todos los componentes nocivos del aire, destacan 6 contaminantes principales.

1. **Partículas en suspensión PM10.-** Se encuentra en forma de polvo fino que capaz de impregnarse en las paredes superficiales y tienen un diámetro menor a 10 micrómetros, motivo por el cual se le conoce como PM10.
2. **Partículas en suspensión PM2.5.-** Son partículas más pequeñas de 2.5 micras de tamaño su presencia es debido a motivos naturales y antrópicas.
3. **Dióxido de Azufre SO₂.-** También conocidos como SO_x, de propiedad incolora, residuo de la combustión de hidrocarburos. El SO₂ daña el sistema respiratorio, sus efectos se potencializan al combinarse con partículas o la humedad del aire.
4. **Dióxido de nitrógeno NO₂.-** Conocido como NO_x, de manera antropogénica. El NO₂ penetra las regiones más profundas de los pulmones. Las fuentes en la naturaleza son la descomposición de nitratos orgánicos y las erupciones de los volcanes.
5. **Ozono O₃.-** El ozono, es invisible, está en la troposfera donde se forma por la reacción química de óxido nítrico NO₂ y los compuestos orgánicos volátiles-COV, más la energía de la luz solar. El Ozono se encuentra en la estratosfera y es la causante de la reflectancia de la radiación UV.
6. **El CO.-** Es incoloro e inodoro y en altas concentraciones puede ser letal, se origina por la combustión incompleta de hidrocarburos, otras fuentes de CO aportantes de

este elemento es el humo de cualquier material producido en el proceso de quemado.

6.2 Indicador de calidad de aire

6.2.1 Indicador ICA

El índice de calidad del aire – ICA, en su forma original, representado por la figura 13, muestra la evolución inicial de los indicadores en el Perú.

Figura 13. Índice de calidad de aire - ICA.

| Índice de Calidad del Aire | | | Puntos de Corte del ICA | | | | | | |
|----------------------------|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|------------------------------------|---|---|--|---|
| ICA | COLOR | CATEGORIA | PM10 µg/m ³ 24 horas | PM2.5 µg/m ³ 24 horas | CO µg/m ³ 8 horas | SO ₂ µg/m ³ 1 horas | NO ₂ µg/m ³ 1 horas | O ₃ µg/m ³ 8 horas | O ₃ ⁽¹⁾ µg/m ³ 1 horas |
| 0 - 50 | Verde | Buena | 0 - 54 | 0 - 12 | 0 - 5094 | 0 - 93 | 0 - 100 | 0 - 106 | -- |
| 51 - 100 | Amarillo | Aceptable | 55 - 154 | 13 - 37 | 5095 - 10819 | 94 - 197 | 101 - 189 | 107 - 138 | -- |
| 101 - 150 | Naranja | Dañina a la salud de grupos sensibles | 155 - 254 | 38 - 55 | 10820 - 14254 | 198 - 486 | 190 - 677 | 139 - 167 | 245 - 323 |
| 151 - 200 | Rojo | Dañina a la salud | 255 - 354 | 56 - 150 | 14255 - 17688 | 487 - 797 | 678 - 1221 | 168 - 207 | 324 - 401 |
| 201 - 300 | Purpura | Muy dañina a la salud | 355 - 424 | 151 - 250 | 17689 - 34862 | 798 - 1583 | 1222 - 2349 | 208 - 393 | 402 - 794 |
| 301 - 500 | Marrón | Peligrosa | 425 - 604 | 251 - 500 | 34863 - 57703 | 1584 - 2629 | 2350 - 3853 | 394 ⁽²⁾ | 795 - 1185 |

Minam 2008, adaptado de EPA y D.S. 003-2008

En base a la figura anterior, si las concentraciones de los contaminantes en el aire resultan mayores a las establecidas por el Índice de calidad de aire ICA, los niveles se clasifican en Bueno, Moderado, Malo, Muy malo y alerta máxima que se ve en el color morado.

Figura 14. Estados de calidad de calidad de aire ICA.

| Estado de calidad del aire | ICA | Efectos en la salud | Acciones preventivas |
|----------------------------|------------|---|--|
| Bueno | 0 a 50 | No hay riesgos en la salud | |
| Moderado | >50 a 100 | Las personas de los grupos sensibles pueden presentar síntomas como tos y cansancio | |
| Malo | >100 a 200 | La población puede padecer síntomas como tos seca, ojos cansados, ardor en la nariz y garganta | Reducir el esfuerzo físico y el trabajo pesado al aire libre |
| Muy malo | >200 a 300 | Toda la población puede presentar agravamiento de los síntomas como tos seca, ojos cansados, ardor en la nariz y garganta | Evitar cualquier esfuerzo físico al aire libre |
| Alerta máxima | >300 a 500 | Toda la población puede padecer riesgos graves y manifestaciones de enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Aumento de las muertes prematuras en personas de los grupos más sensibles. | Evitar cualquier actividad al aire libre |

Minam 2008, adaptado de EPA y D.S. 003-2008

6.2.2 Niveles de concentración y calidad de aire

Propuesto en el año 2015 por el Ministerio del Ambiente, organismo encargado en temas de calidad del aire y afines.

El INCA es calculado por el Minam para representar y asignar un rango cualitativo del aire. Los valores del INCA se calculan tomando como referencia los Estándares de Calidad del Aire – ECA mostrado en la figura 15 del cual se toma el valor del rango final y de la figura 16.

Figura 15. Valores de alerta nacional para calidad de aire.

| Tipos de alerta | Material particulado (PM ₁₀) | | Dióxido de azufre (SO ₂) | | Monóxido de carbono (CO) | |
|-----------------|--|------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|
| | µg/m ³ | Periodo | µg/m ³ | Periodo | µg/m ³ | Periodo |
| Cuidado | > 250 | Promedio aritmético 24 horas | > 500 | Promedio móvil 3 horas | > 1500 | Promedio móvil 8 horas |
| Peligro | > 350 | Promedio aritmético 24 horas | > 1500 | Promedio móvil 2 horas | > 2000 | Promedio móvil 8 horas |
| Emergencia | >420 | Promedio móvil 8 horas | > 2500 | Promedio móvil 90 minutos | > 35000 | Promedio móvil 8 horas |

Minam 2005

Figura 16. Estándar de calidad de aire ECA.

| Contaminante | Periodo | Forma del estándar | | | | Vigencia | Método del análisis |
|-------------------|---------|--------------------|--------------------|------|--|------------|--|
| | | µg/m ³ | ppb 25° C 1 atm | ppm | Formato | | |
| SO ₂ | anual | 80 | 30.6 | 0.03 | Media aritmética, NE más de 1 vez al año | Vigente | Fluorescencia UV |
| | 24 h | 20 | 7.7 | 0.01 | | Enero 2014 | |
| PM ₁₀ | 24 h | 150 | - | - | NE más de 3 veces al año | Vigente | Separación inercial/filtración (gravimetría) |
| | Anual | 50 | - | - | Media aritmética anual | Vigente | |
| PM _{2.5} | 24 h | 50 | - | - | | Enero 2010 | Separación inercial/filtración (gravimetría) |
| | Anual | - | - | - | | Vigente | |
| CO | 1 h | 30000 | 26100.0 | 26.1 | NE más de una vez al año | Vigente | Infrarrojo no dispersivo |
| | 8 h | 10000 | 8700.0 | 8.7 | Promedio móvil | Vigente | |
| NO ₂ | 1 h | 200 | 106.4 | - | NE más de 24 veces al año | Vigente | Quimioluminiscencia |
| | Anual | 100 | 53.2 | - | Media aritmética anual | Vigente | |
| O ₃ | 8 h | 120 | 61.2 | - | NE más de 24 veces al año | Vigente | Fotometría UV |

Minam 2008

A partir de las figuras 15 y 16, tanto el ECA y el INCA se dividen en 4 categorías. El verde significa aire bueno, el amarillo representa aire moderado, el anaranjado aire mala y finalmente el rojo indica que el aire se encuentra en alerta.

La figura 17, esquematiza lo indicado anteriormente.

Figura 17. Clasificación del estado de calidad del aire.

| | Estado de la calidad del aire | Riesgo | Recomendaciones |
|--|-------------------------------|--|---|
| | BUENA | La calidad del aire se considera satisfactoria y no representa ningún riesgo. | La calidad del aire es aceptable y cumple con el ECA para el aire. Puede realizar actividades al aire libre. |
| | MODERADA | Las personas de los grupos sensibles (niños, tercera edad, embarazadas, personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares crónicas) podrían experimentar algunos síntomas respiratorios adversos. | La calidad del aire es aceptable y cumple con el ECA de aire. Puede realizar actividades al aire libre con ciertas restricciones para los grupos vulnerables. |
| | MALA | Las personas de los grupos sensibles podrían experimentar daños a la salud. La población en general podría sentirse afectada. | Mantenerse atento a los informes de calidad del aire. Evitar realizar ejercicio y actividades al aire libre. |
| | UMBRAL DE CUIDADO | Toda la población puede verse afectada en la salud. | Implementar estados de alerta. |

6.2.3 Niveles de concentración y tipo de aire

El de aire es establecido en un rango de variación numérica basado en los valores de las concentraciones en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), para cada uno de los elementos contaminantes, para el caso de las partículas PM_{2.5} y PM₁₀, las figuras 18 y 19 muestran la relación existente entre los valores de concentración de estas partículas con el estado del aire como “buena”, “moderado”, “mala”, y “umbral de cuidado” con los rangos de calidad asignada.

Figura 18. Rango de valores para PM_{2.5}.

| Índice de calidad del aire | | PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|----------------------------|-----------|---|
| | 0 - 50 | 0 - 12.5 |
| | 51 - 100 | 12.6 - 25 |
| | 101 - 500 | 25.1 - 125 |
| | >500 | >125 |

Fuente: Resolución Ministerial 112-2015-MINAM

Minam (2015)

Figura 19. Rango de valores para PM₁₀.

| Índice de calidad del aire | | PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|----------------------------|-----------|--|
| | 0 - 50 | 0 - 75 |
| | 51 - 100 | 76-150 |
| | 101 - 167 | 151-250 |
| | >167 | >250 |

Fuente: Resolución Ministerial 112-2015-MINAM

Minam (2015)

Los rangos de valor para partículas PM₁₀ y PM_{2.5}, en relación con los elementos contaminantes indicados se presentan en la figura 20.

Figura 20. Calculo de rangos de valor por elemento contaminante.

| Material particulado (PM10) promedio 24 horas | | |
|---|---|--|
| Intervalo del INCA | Intervalo de concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Ecuación |
| 0-50 | 0-75 | $I(\text{PM10}) = [\text{PM10}] * 100/150$ |
| 51-100 | 76-150 | |
| 101-167 | 151-250 | |
| > 167 | > 250 | |

| Material particulado (PM2,5) promedio 24 horas | | |
|--|---|---|
| Intervalo del INCA | Intervalo de concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Ecuación |
| 0-50 | 0 -12,5 | $I(\text{PM2,5}) = [\text{PM2,5}] * 100/25$ |
| 51-100 | 12,6-25 | |
| 101-500 | 25,1-125 | |
| > 500 | >1 25 | |

| Dióxido de azufre (SO ₂) promedio 24 horas | | |
|--|---|---|
| Intervalo del INCA | Intervalo de concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Ecuación |
| 0-50 | 0-10 | $I(\text{SO}_2) = [\text{SO}_2] * 100/20$ |
| 51-100 | 11-20 | |
| 101-625 | 21-500 | |
| > 625 | > 500 | |

| Dióxido de nitrógeno (NO ₂) promedio 1 hora | | |
|---|---|--|
| Intervalo del INCA | Intervalo de concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Ecuación |
| 0-50 | 0-100 | $I(\text{NO}_2) = [\text{NO}_2] * 100/200$ |
| 51-100 | 101-200 | |
| 101-150 | 201-300 | |
| > 150 | > 300 | |

Minam (2015)

6.2.4 Rangos de concentración de calidad de aire

Los rangos que se establecen a partir de la tabla anterior son;

Para PM_{10}

Figura 21. Cálculo de rangos de valor para PM_{10} y su relación con INCA.

| INCA | Concentración $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
|----------|--|
| BUENA | 0-75 |
| MODERADA | 76-150 |
| MALA | 151-250 |
| VUEC* | > 250 |

Minam (2014)

Para $PM_{2.5}$

Figura 22. Cálculo de rangos de valor para $PM_{2.5}$ y su relación con INCA.

| INCA | Concentración $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
|----------|--|
| BUENA | 0-12,5 |
| MODERADA | 12.6-25 |
| MALA | 25.1-125 |
| VUEC* | >125 |

Minam (2014)

Por otro lado, la media anual o diaria lo establece el Minam según la tabla siguiente:

Tabla 7. Valor medio de partículas en suspensión.

| Partícula en suspensión | Promedio en el tiempo |
|--------------------------------|--|
| PM2.5 | 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media anual 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media de 24 horas |
| PM10 | 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media anual 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media de 24 horas |

Para PM10., El ECA (2008), elaborada por el Minan en el año 2008, establece que, para las partículas PM10, los valores promedios según duración deben ser 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas de medición y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ la media anual, la Organización Mundial de la Salud OMS, (2005), establece 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio en 24 horas y 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio anual.

Para PM2.5, El mismo estándar de calidad del aire ECA, (2008), elaborada por el Minan en el mismo año, establece que, para las partículas PM 2.5, los valores promedios según duración deben ser 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas de medición y 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ la media anual, mientras que la Organización Mundial de la Salud OMS, (2005), establece 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio en 24 horas y 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio anual, tal como se muestra en la tabla siguiente, donde solo para las partículas PM 2.5 hay una diferencia de 10 unidades.

Tabla 8. Comparación de valores medios para partículas.

| Partícula en suspensión | Promedio en el tiempo |
|--------------------------------|---|
| PM2.5-MINAN | 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio x año. 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio x 24 horas. |
| PM10-MINAM | 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio x año. 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio x 24 horas. |
| PM2.5-OMS | 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio x año. 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio x 24 horas. |

| | |
|----------|---|
| PM10-OMS | 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio x año. 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio x 24 horas. |
|----------|---|

Para Dióxido de azufre SO_2

Figura 23. Cálculo de rangos de valor para SO_2 .

| INCA | Concentración $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
|----------|--|
| BUENA | 0-10 |
| MODERADA | 11-20 |
| MALA | 21-500 |
| VUEC' | > 500 |

Por tener una vida media relativamente corta en el espacio atmosférico, el SO_2 , entre 2 a 4 días, se encuentra casi limitada de ellas en la superficie terrestre, y la otra mitad se transforma en iones de sulfato SO_4 (-), y al contacto con el aire se reduce a trióxido de azufre, que, al disolver en agua, este ion, es el catalizador de las lluvias ácidas, así como también en sales. La comparación entre el ECA del Minam y la OMS se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 9. Comparación de valores para SO_2 .

| Gas contaminante | Promedio en el tiempo |
|---------------------------|---|
| SO_2 – ECA Minam | 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media anual 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media de 24 horas |
| SO_2 - OMS | 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media para 10 minutos 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media de 24 horas |

Para Dióxido de nitrógeno NO_2

Figura 24. Cálculo de rangos de valor para NO₂.

| INCA | Concentración $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
|----------|--|
| BUENA | 0-100 |
| MODERADA | 101-200 |
| MALA | 201-300 |
| VUEC* | >300 |

El nitrógeno es el elemento que se encuentra en mayor abundancia al 78 %, y presenta grupos de NO_x, el NO; es relativamente inofensivo, pero el NO₂, causar efectos dañinos en la salud. La comparación entre el ECA del Minam y la OMS se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 10. Comparación de valores para NO₂.

| Gas contaminante | Promedio en el tiempo |
|----------------------------|---|
| NO ₂ -ECA Minam | 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media x año 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media x 1 hora |
| NO ₂ -OMS | 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media x año 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media x 1 hora |

Como se observa en la tabla anterior, ambas entidades especializadas en temas de calidad de aire coinciden en cuanto a las concentraciones medias para este elemento contaminante en el aire al establecer la media para un tiempo de medición de una hora, sin embargo, para el promedio anual hay una diferencia de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la medición de ECA Minam más que la medición que presenta la OMS.

Para el Ozono O₃.

Para este elemento el ECA del Minam establece el valor medio en 8 horas de 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la OMS establece 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para 8 horas, ninguno de ellas establece una media anual. Aquí se observa una diferencia de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentración adicional en el ECA Minam respecto al valor de la OMS.

Tabla 11. Comparación de valores para O₃.

| Gas contaminante | Promedio en el tiempo |
|----------------------------|---|
| O ₃ – ECA Minam | 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media para 8 horas |
| O ₃ - OMS | 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media para 8 horas |

6.3 Modelos de basados en expresiones matemáticas

La medición de los niveles de calidad del aire es compleja, debido a la presencia de grandes cantidades de factores que influyen en su cálculo, por esa razón, se hacen a través de diferentes modelos de medición de calidad de aire. Los modelos son complejos y tienen el propósito de describir el estado de la atmósfera a su nivel molecular, por representaciones sintetizadas en expresiones matemáticas. Los modelos relacionados a la investigación del comportamiento de los contaminantes en el aire están aquellos denominados Gaussianos, Eulerianos, Lagrangeanos o la combinación en la aplicación en forma mixta.

6.3.1 Modelos con base Gaussiana

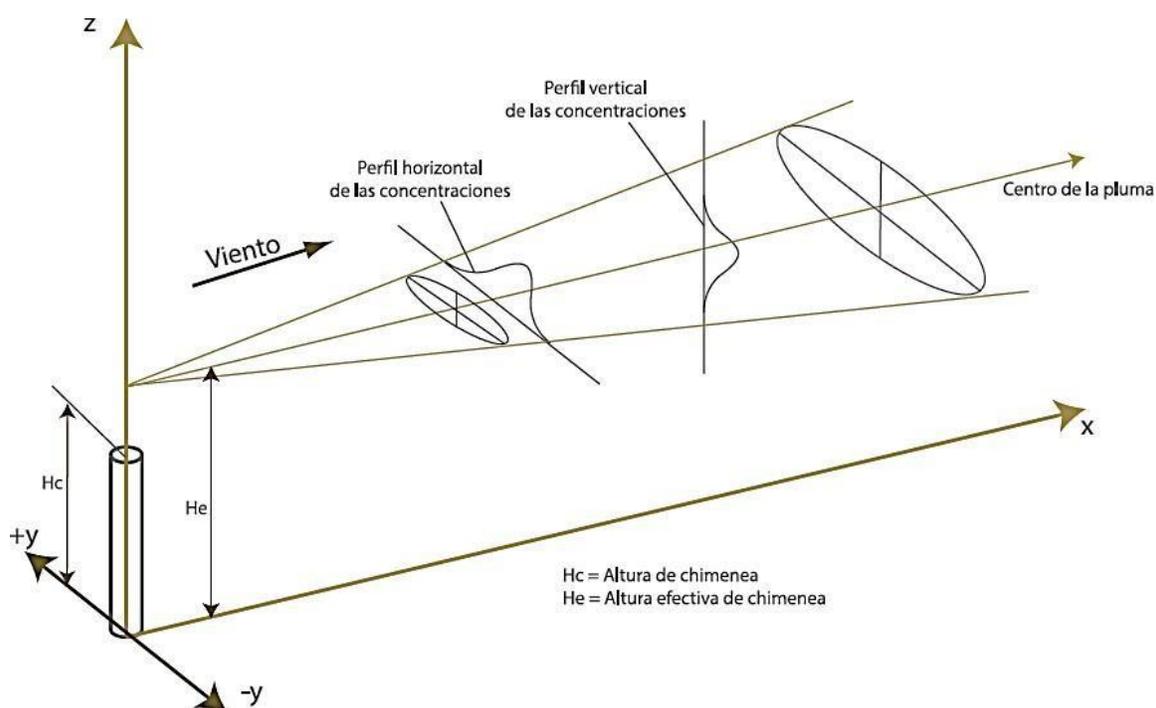
Este modelo tiene una dependencia importante a la fuente de emisión continua con una condición típica del foco emisor, el mismo que la posición geográfica observe un viento con dirección paralela al eje x., con una pluma de origen en la misma fuente y, esta pluma, también se desplaza en la dirección del viento. Asimismo, dentro de la pluma la distribución de los contaminantes cumple la distribución Gaussiana. La velocidad del viento tiene, una medición directa, sin existir medición para la estabilidad atmosférica, lo que implica una estimación a través de relaciones empíricas, basado en lecturas de temperatura, variables de viento y cobertura climatológica.

Algunas condiciones de frontera para este modelo se establecen como:

1. Considerar contante a las emisiones, en el periodo de la evaluación, esta condición, es conocido también como estado estacionario:
2. Los parámetros meteorológicos en el periodo de evaluación tienen el carácter de constante.
3. Finalmente, la dirección y velocidad del viento con carácter homogéneo y horizontal, es decir, el viento es representativo para todo el dominio.

La figura siguiente nos muestra el esquema geométrico básico de un modelo Gaussiano, donde se puede visualizar los parámetros que utiliza en el proceso de cálculo, así como la proyección cónica de la dispersión de componentes en el aire.

Figura 25. Esquema conceptual del modelo Gaussiano.



Adaptación de Servicio Ambiental Chile (2019)

En la figura 25. Observamos la característica constante de sus parámetros; por tanto, este modelo, calcula la dispersión con los siguientes parámetros, una altitud efectiva H_e , que es siempre mayor que la altitud real de H_c .

6.3.2 Modelos con base Eulereana

Estos modelos, tratan de incluir la gran mayoría de los procesos atmosféricos y su complejidad. Dentro de esos procesos en el espacio atmosférico sobre todo los procesos físicos y procesos químicos juntamente con la dispersión. La mayor parte de los procesos se describen con ecuaciones matemáticas, su característica, es netamente matemático al tratar los procesos

físicos y químicos. Estas relaciones matemáticas, son ecuaciones diferenciales en (x,y,z) . El modelo, también utiliza algoritmos numéricos y, de esta manera, describe la evolución espacial de la atmósfera en (x,y,z) .

6.3.3 Modelos con base Lagrangeana

Basado en el movimiento del aire o de una partícula en la atmósfera, desde una posición X_i hasta X_f . con el cual, fácilmente calcula, la dirección de la partícula, en un intervalo de tiempo finito. Así, establece la trayectoria que describe dicho punto a través de esa integración finita. El cálculo de la trayectoria entrega la información sobre el destino de la contaminación, para el cálculo de las cantidades de los elementos contaminantes, realiza el mismo proceso para muchas trayectorias, y, con la ayuda de algoritmos y ordenadores estima esta variable.

El requerimiento principal para el uso de los modelos Lagrangeanos es la disponibilidad de datos meteorológicos tetra-dimensionales, donde se incluyen las dimensiones X,Y,Z y en el espacio y el tiempo t .

6.3.4 Modelo MDLE

Este modelo es la que proponemos en este trabajo de investigación, sus características a diferencia de los modelos descritos el MDLE realiza los procesos de cálculo utilizando el algoritmo geoespacial de Kriging para realizar los cálculos de las concentraciones, donde hace uso la técnica del elipsoide 3D que le permite encontrar los valores georreferenciados de concentraciones correspondientes a los seis elementos contaminantes del aire, los cuales son las $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_x , NO_x , O_3 , y CO . Asimismo mediante el algoritmos de Stirling realiza la interpolación de los valores en forma unidimensional adquiridas de cada uno de las diez estaciones de medición del SENAMHI hasta una altitud de los diez mil metros.

El modelo MDLE, incluye como ingreso de datos (INPUT), los resultados de dispersión del modelo Gaussiano en los puntos de origen de medición de cada estación de medición, para el cual, considera las coordenadas UTM de ubicación de dichas estaciones de medición y utilizando el factor de corrección alfa (α), relacionado a la altitud de medición (originalmente 10m) el mismo que toma el valor de quinientos metros.

Los pasos del proceso por el modelo MDLE son

1. Adquisición de datos con control de calidad del SENAMHI
2. Cálculo de dispersión horizontal de concentraciones de los elementos contaminantes con el modelo gaussiano a quinientos metros de altitud de la superficie.
3. Interpolación de valores de las concentraciones de los contaminantes hasta una altitud de diez mil metros de altitud, con el algoritmo de Stirling.
4. Interpolación geoespacial de valores de las concentraciones a través del algoritmo de Kriging, en el espacio 3D del alcance del modelo.

7. Modelo de localización espacial - MDLE

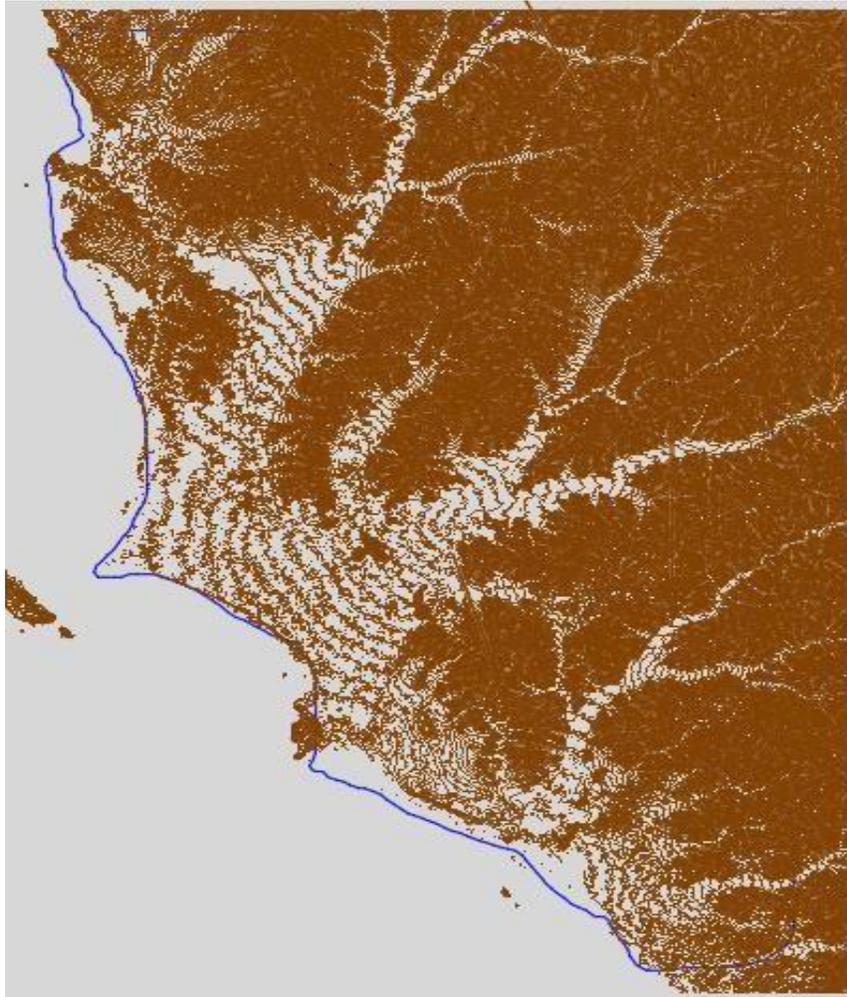
7.1 Aspectos topográficos y climáticos

7.1.1 Topografía

La topografía del área de estudio es la superficie que se encuentra en el ámbito del modelo, es decir, el plano topográfico superficial de Lima Metropolitana, donde una de las características relevantes es que sus ejes norte y este se encuentran en coordenadas UTM, medidas en el sistema métrico, estos ejes, se relacionan con las coordenadas X,Y del modelo, más la altitud que es conocido como la altitud sobre el nivel del mar o cota, que en el modelo tiene su denominación de Eje Z o coordenada Z, cuya unidades de medida es el metro. La figura

siguiente muestra las curvas de nivel de la superficie topográfica que se encuentra dentro del ámbito del modelo.

Figura 26. Curvas de nivel de la superficie topográfica del modelo.



Las siguientes figuras muestran la topografía en el modelo 3D y 2D respectivamente.

Figura 27. Curvas de nivel 3D de la superficie topográfica del modelo.

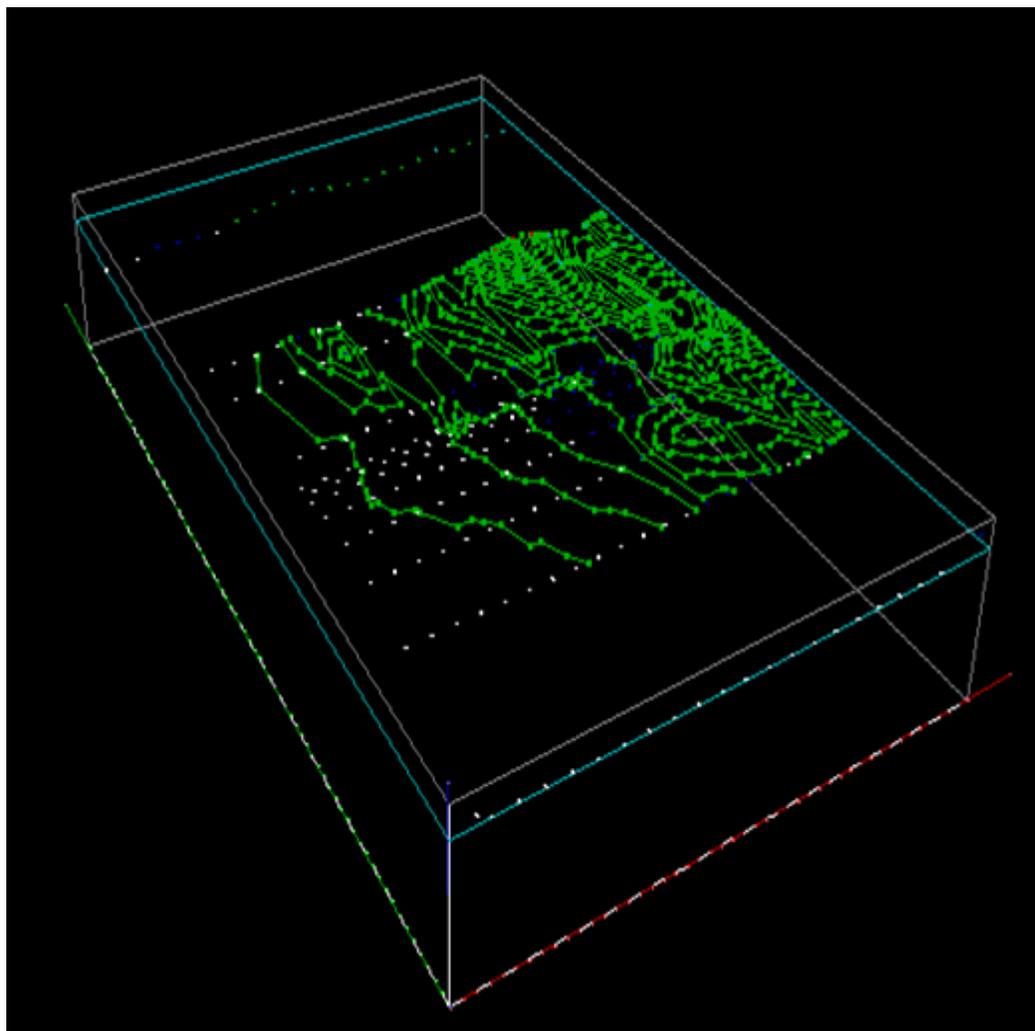
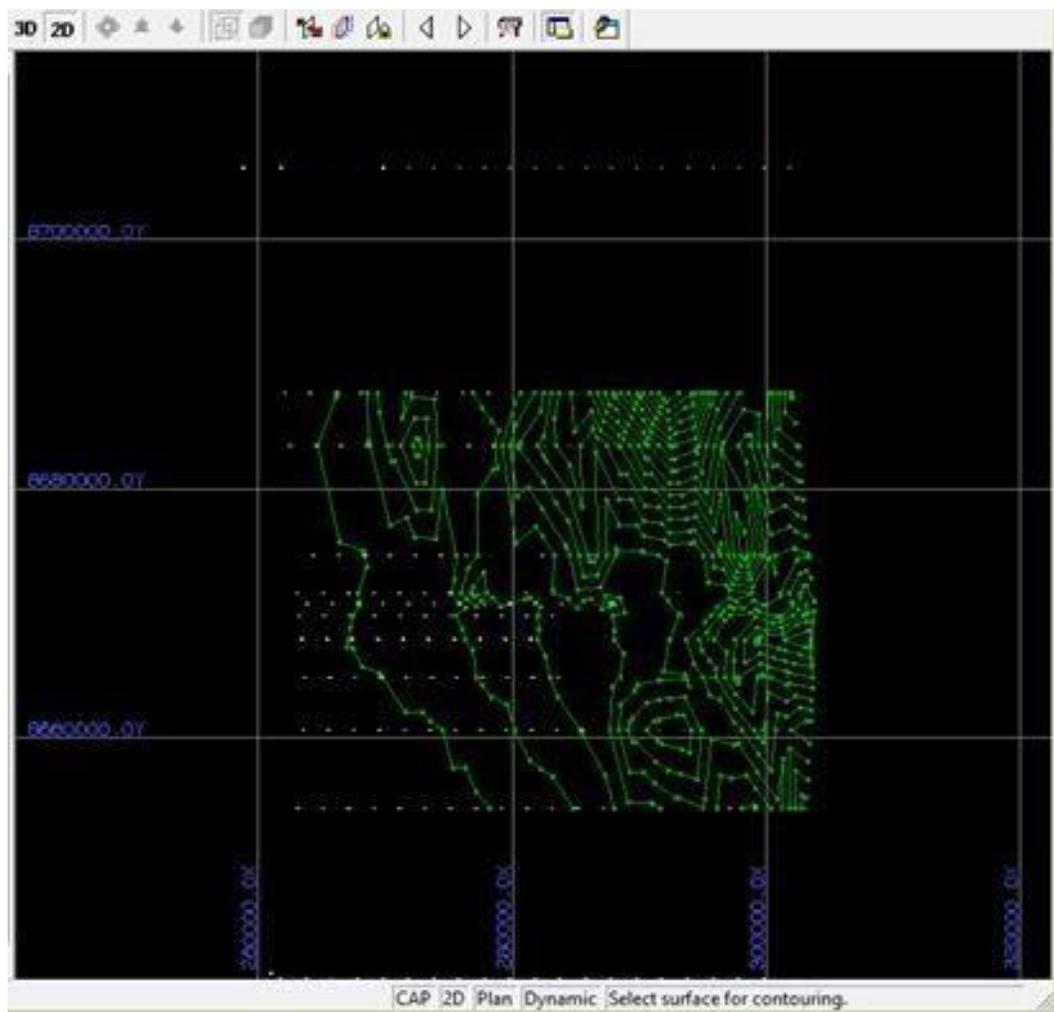


Figura 28. Curvas de nivel 2D de la superficie topográfica del modelo.

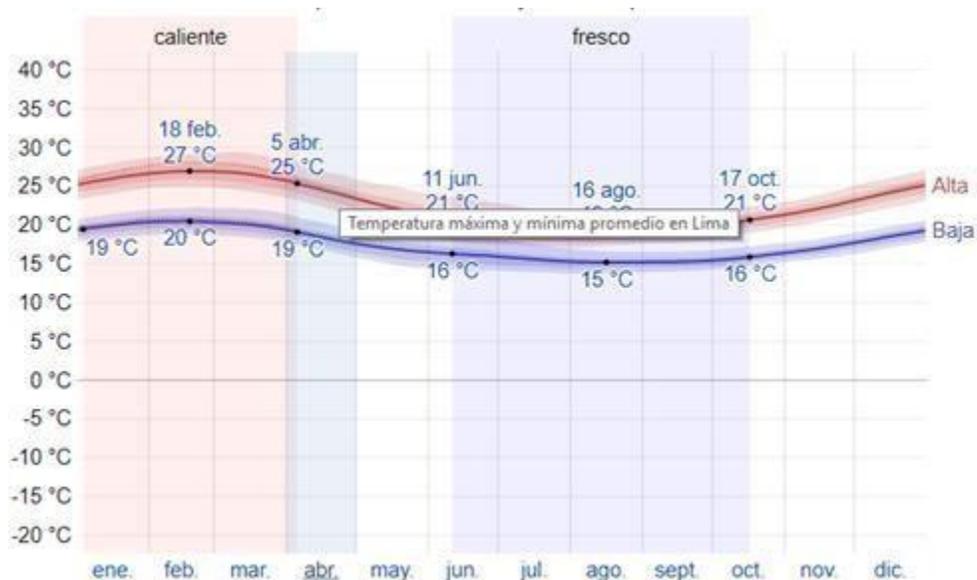


7.1.2 Clima

Los parámetros climatológicos o meteorológicos que el modelo considera como variables principales son la presión en atmosferas, temperatura en grados absolutos o kelvin, la velocidad promedio del viento en metros por segundo y finalmente la dirección promedio del viento en la región costa correspondiente al ámbito topográfico del modelo.

Temperatura, la temperatura ambiental que el modelo ingresa como datos son aquellas que se adquieren de SENAMHI correspondiente al mes de agosto del 2018, se esquematiza en la figura 29.

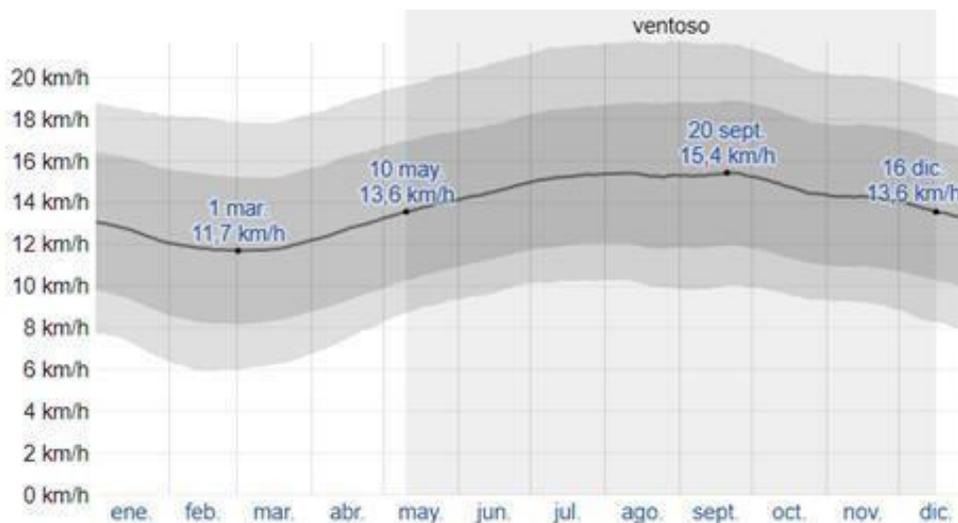
Figura 29. Temperatura mínima y máxima en Lima.



SENAMHI, (2018)

Velocidad y dirección de viento, esta es otro de los parámetros que el modelo MDLE considera entre sus variables, al igual que para la Temperatura, se considera el promedio anual en el mes de agosto del 2018 y sus unidades están en m/s para la velocidad y la dirección se expresa en grados, minutos y segundos sexagesimales respecto al eje sur – norte, cuyo promedio anual de orientación se observa en la figura adjunta. La medición se ha realizado a 10 metros sobre la superficie terrestre, la época con mayor carga de ventarrones del año es entre mayo a diciembre todo el año, con velocidades promedio del viento de más de 3.7 metros por segundo, el mes donde la velocidad del viento llega a su máxima valor es en setiembre con un valor promedio de velocidad del viento de 4,3 metros por segundo. Tal como muestra la siguiente figura.

Figura 30. Velocidad promedio del viento en Lima.



SENAMHI, (2018)

La dirección del viento, promedio en la ciudad de Lima es de sur a norte, con inclinaciones respecto al eje sur norte de 60 a 90 grados sexagesimales hacia el oeste, tal como se muestra en la siguiente figura.

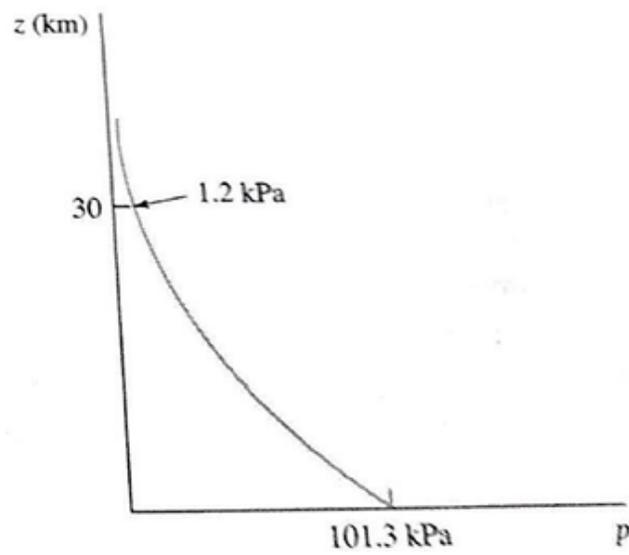
Figura 31. Dirección promedio de viento en Lima.



SENAMHI, (2018)

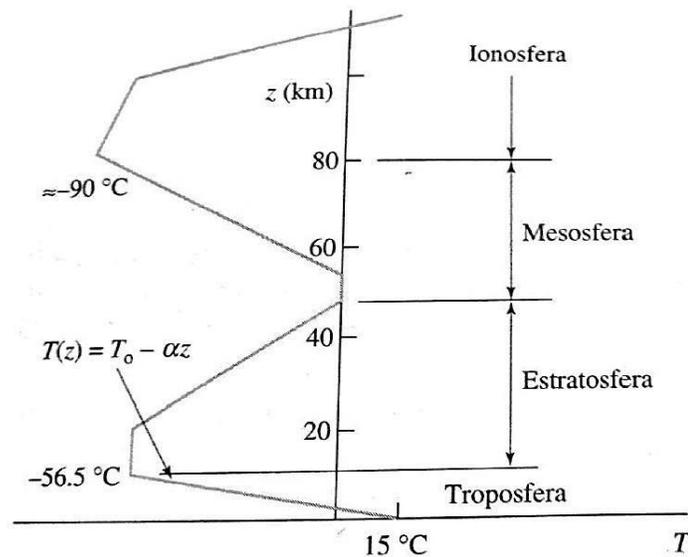
Presión atmosférica, los valores de la presión atmosférica varían según la cota o altitud respecto al nivel del mar, en este sentido en el modelo MDLE consideramos esa variación que está representando en la siguiente figura.

Figura 32. Variación de la presión según altitud.



Potter y Wiggert, 2015

Figura 33. Variación de la temperatura según altitud.



Potter y Wiggert, 2015

En la atmósfera, al depender la densidad de la altitud y al depender la presión de la densidad, esta propiedad de la masa o materia hace que la presión dependa de la altitud, y esta expresado por $P = P(z)$, para el proceso de cálculo del modelo MDLE, establecemos la condición de “atmósfera estándar”, donde la temperatura varía linealmente con la altitud $T(z) = T_0 - Kz$, el valor de K , está relacionado a la gradiente geotérmica el mismo que en promedio es de 1.5 grados celsius en toda la troposfera que tiene un alcance de 10 mil metros de altitud, tal como se observa en la figura 35. Según Ramadan y Wiggert, (2015), la variación de la presión por cada 1 km es del 2% , este es el valor de disminución de presión por cada kilómetro que consideramos en el Modelo MDLE.

7.2 Condiciones de frontera o dimensión 3D

7.2.1 Geométrica

Las dimensiones geométricas del modelo MDLE, es la de un paralelepípedo horizontal con un área en la base superficial de la tierra de 44 mil metros por 67 mil metros como se ve, en la figura 34.

Figura 35. Condiciones de frontera 3D del modelo en espacio (X,Y,Z).

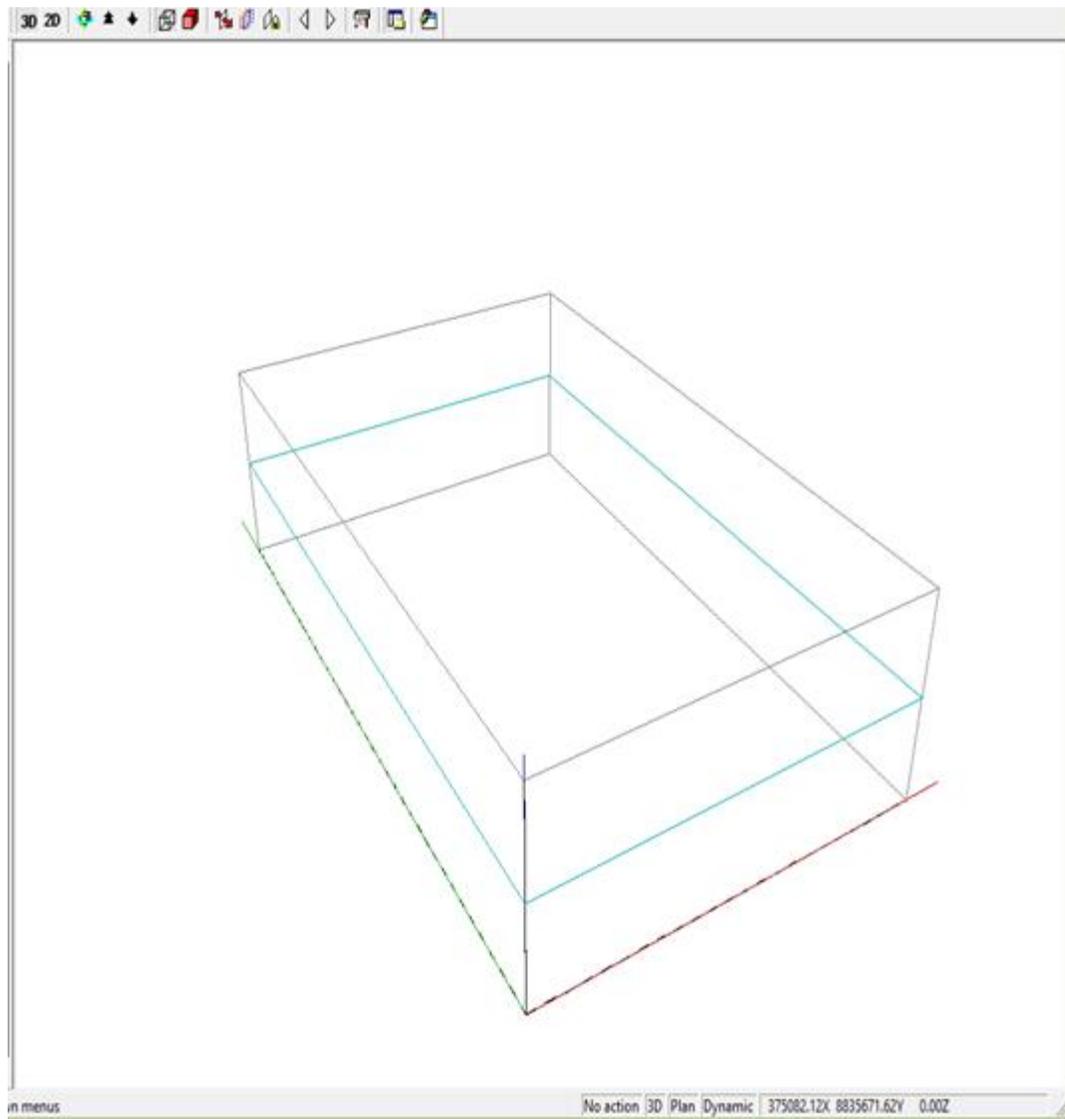
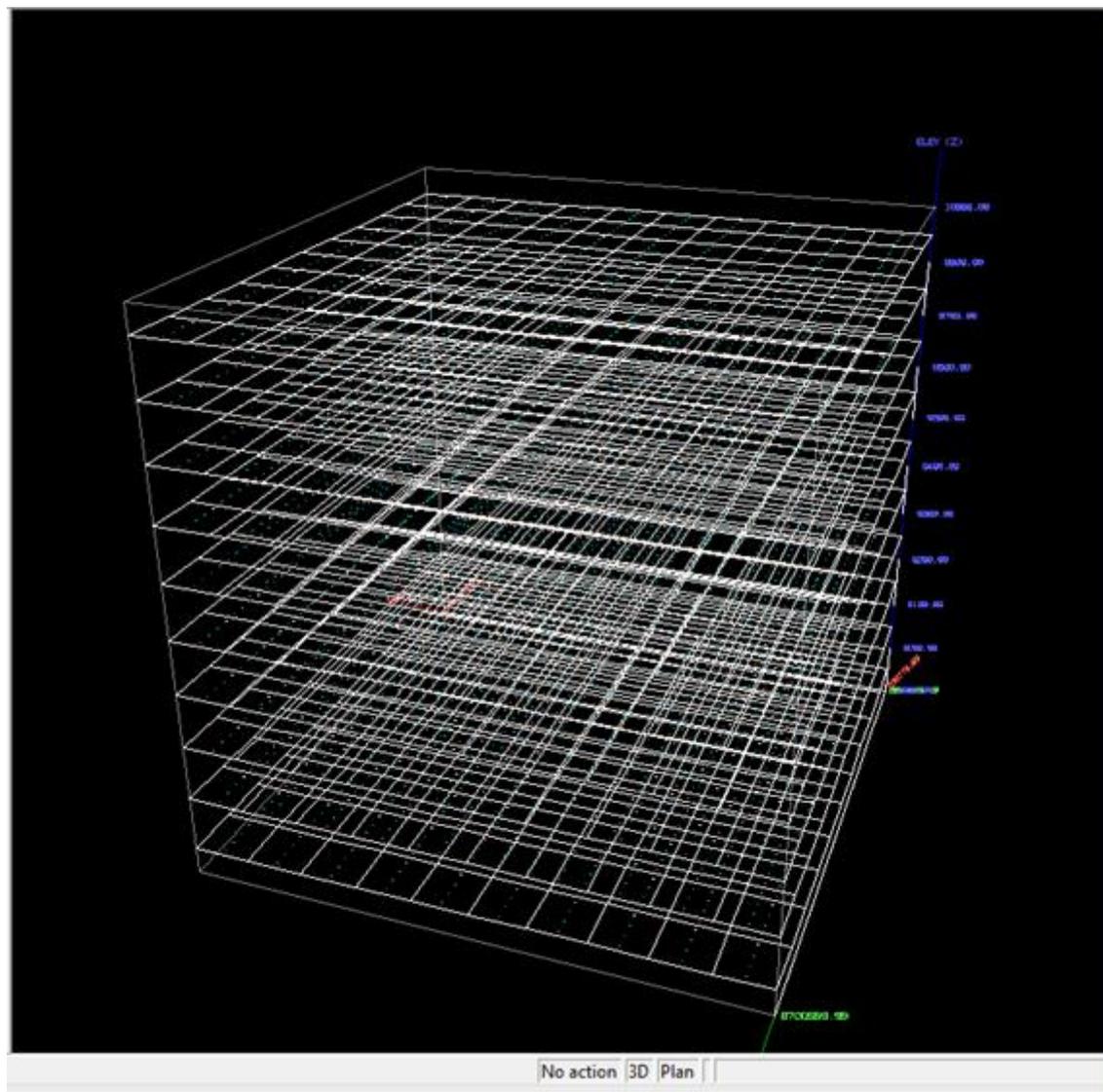


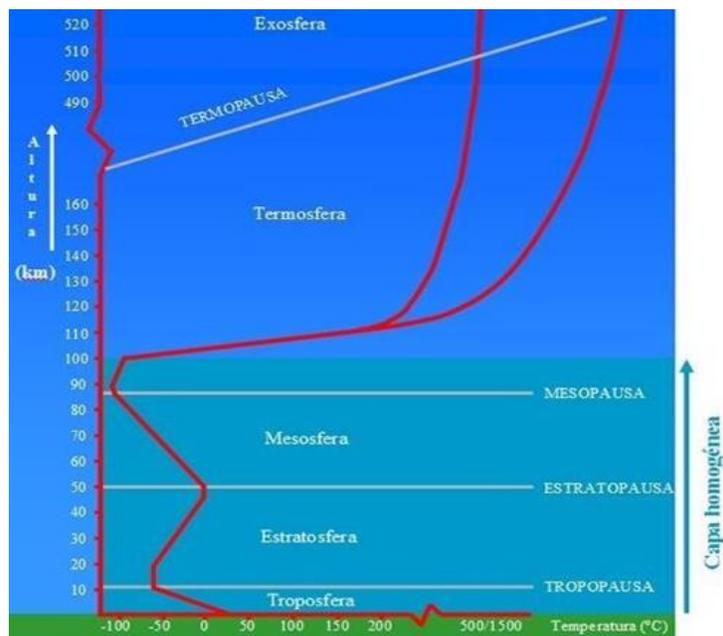
Figura 36. Vista en 3D de modelo MDLE.



7.2.2 Zonas espaciales atmosféricas

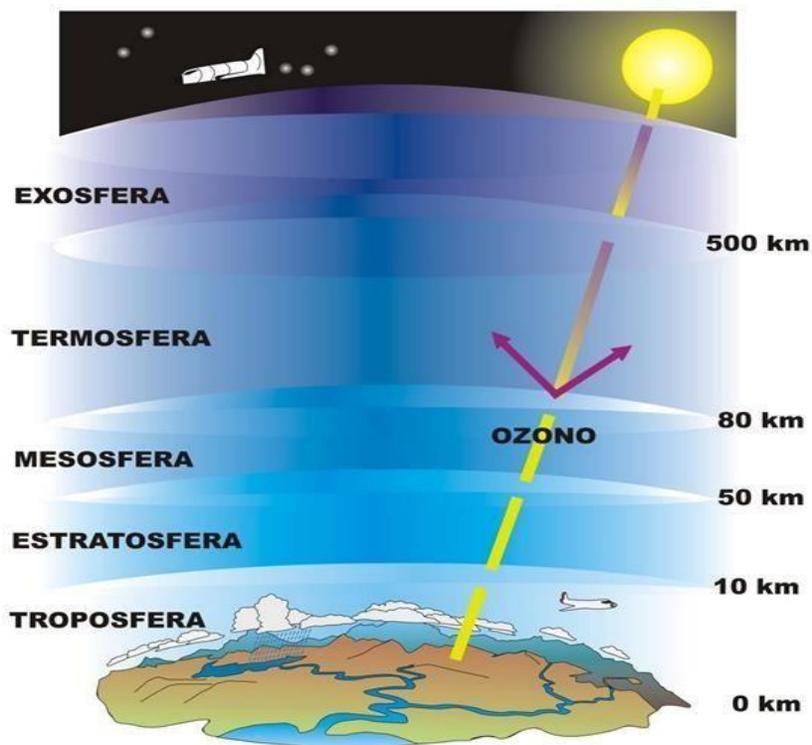
El alcance máximo del modelo en cuanto a la altitud está definido por el límite de la troposfera el mismo que se encuentra dentro de los diez mil metros desde el nivel, porque se considera hasta esta parte de la atmosfera como atmosfera estándar donde las variaciones de la temperatura y la presión tienen una gradiente constante, por tanto, dicha variación está representada por una función lineal. La figura 37, muestra este límite.

Figura 37. Distribución por altitud de la atmosfera.



Instituto de meteorología, Colombia (2016).

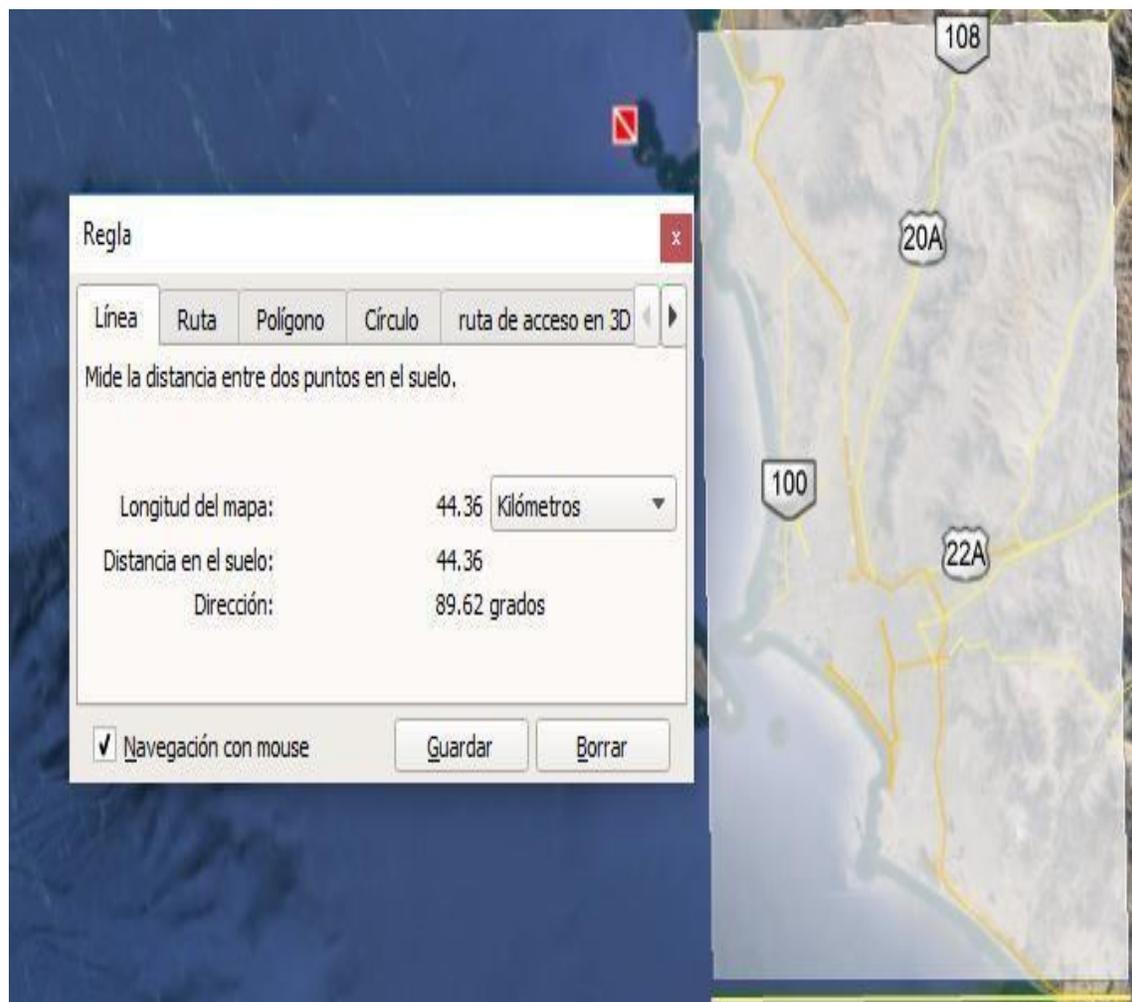
Figura 38. Altitud de la atmosfera con acumulación de ozono.



La altitud es una condición de frontera rígida, debido a que la temperatura y la presión varían en forma compleja, y dentro de los primeros diez mil metros están las zonas espaciales que el modelo considera, por la presencia de cota máxima de la superficie terrestre como Zona A, capa límite de la atmósfera como Zona B y la zona C como el espacio que se encuentra por encima de la capa límite.

La figura No. 39, muestra la frontera superficial en el mapa de relieve topográfico de Lima, área que es de alcance del modelo tal como mostramos en la caja de diálogo en el lado izquierdo del área. Mientras que la figura N. 40. Visualiza únicamente el área de la base horizontal del paralelepípedo del modelo MDLE.

Figura 39. Vista del área superficial del modelo MDLE.



Adaptación de la superficie en relieve de Google Earth.

Figura 40. Base rectangular del modelo MDLE.



Imagen de relieve adaptada de Google Earth.

7.3 Algoritmos del modelo

7.3.1 Algoritmo de Stirling

El algoritmo de Stirling se fundamenta en una función matemática continua donde $F(x)$ es desconocida, y un grupo de valores de x son conocidos, en el presente estudio los valores conocidos son las concentraciones de los diversos elementos presentes en la atmosfera en un conjunto de puntos a lo largo de la proyección de los puntos de medición del aire a lo largo de los diez mil metros si denotamos a estos valores como f a Δx a la diferencia entre dos valores consecutivos de x . Además consideremos un subconjunto de $m + 1$ puntos $(x_k; x_{k+1}; \dots; x_{k+m})$ y por analogía matemática $f_n \equiv f(x_n)$ para designar los valores conocidos de la función f en dicho subconjunto de valores.

Se define la diferencia finita progresiva de primer orden en el punto x_k a:

$$\Delta f_x = f_{k+1} - f_k$$

Considerando la ecuación anterior podemos generalizar en la siguiente ecuación.

$$\Delta^n f_x = \Delta^{n-1} f_{k+1} - \Delta^{n-1} f_k$$

En esta ecuación se puede observar que la diferencia finita de orden n en x_k contiene información del valor de la función en x_k y en los, n puntos situados a la derecha de x_k . Para un conjunto de $m + 1$ puntos, podemos calcular, como máximo, hasta la diferencia finita de orden m .

Para la interpolación polinómica de Stirling, el algoritmo utiliza el polinomio de Newton – Gregory (NG), progresivo, dicho polinomio de orden m , se define en el punto x_k según la expresión matemática siguiente:

$$\begin{aligned} P_m(x) = & a_0 \\ & + a_1(x - x_k) \\ & + a_2(x - x_k)(x - x_{k+1}) \\ & + a_3(x - x_k)(x - x_{k+1})(x - x_{k+2}) \\ & + \dots \\ & + a_m(x - x_k)(x - x_{k+1}) \dots (x - x_{k+m-1}) \end{aligned}$$

La ecuación anterior lo podemos generalizar como:

$$P_m(x) = \sum_{k=0}^m a_k \prod_{i=0}^{n-1} (x - x_k - i)$$

Los coeficientes de $P_m(x)$ se obtienen estableciendo la condición de interpolación, es decir,

$$P_m(x_n) = f_n \text{ con } n = k; k + 1; k + m.$$

Obteniendo los valores en las distintas iteraciones:

$$a_0 = f_k; a_1 = \Delta f_k / \Delta x; a_2 = \Delta^2 f_k / 2! (\Delta x)^2, \dots \dots a_n = \Delta^n f_k / n! (\Delta x)^n$$

Esto significa que, los coeficientes de $P_m(x)$ se pueden obtener directamente a partir de las diferencias finitas progresivas (de orden 1,2,...n) en el punto x_k .

A partir del polinomio de Newton Gregory, la Interpolación de Stirling permite obtener el valor de la función en un punto x_k haciendo uso de los valores de los puntos consecutivos al lado derecho de x_k , cuya ecuación se define por.

$$F_m(x) = f_k + \nabla f_k u + \nabla^2 f_k \frac{u(u+1)}{2!} + \nabla^3 f_k \frac{u(u+1)(u+2)}{3!} + \dots \\ + \nabla^m f_k \frac{u(u+1)\dots(u+m-1)}{m!} + O[(\Delta x)^{m+1}]$$

Ahora consideremos las expresiones D1NG en x_k de orden más bajo ($m = 1$), expresado por la ecuación:

$$F'_1(x_k) = \frac{1}{2\Delta x} [f_{k+1} - f_{k-1}] + O[(\Delta x)^2]$$

Si denominamos a la anterior expresión como D1ST (derivada primera en la aproximación de Stirling). La ventaja fundamental radica en que, incluyendo un solo término, la D1ST es una aproximación de primer orden, mientras que la D1NG es de orden cero. Algo análogo ocurre con la derivada segunda. El orden más bajo ($m = 2$) para la derivada segunda en x_k utilizando las fórmulas NG proporciona los valores:

$$\text{D2NG prog} \quad F''_2(x_k) = \frac{\Delta^2 f_k}{(\Delta x)^2} + O[\Delta x] = \frac{1}{(\Delta x)^2} [f_{k+2} - 2f_{k+1} + f_k] + O[\Delta x]$$

A partir de la ecuación D1ST para la derivada primera en x_k , obtenemos el valor de la derivada segunda en x_k como:

$$F_2''(x_k) = \frac{1}{2\Delta x} [F_2'(x_{k+1}) - F_2'(x_{k-1})]$$

Reemplazando aquí, tenemos

$$F_2'(x_{k+1}) \quad \text{y} \quad F_2'(x_{k-1}) \quad , \text{tenemos}$$

$$F_2'(x_{k+1}) = \frac{1}{\Delta x} \left[\frac{3}{2}f_{k+1} - 2f_k + \frac{1}{2}f_{k-1} \right] + O[(\Delta x)^2]$$

$$F_2'(x_{k-1}) = \frac{1}{\Delta x} \left[-\frac{1}{2}f_{k+1} + 2f_k - \frac{3}{2}f_{k-1} \right] + O[(\Delta x)^2]$$

De donde llegamos a:

$$F_2''(x_k) = \frac{1}{(\Delta x)^2} [f_{k+1} - 2f_k + f_{k-1}] + O[(\Delta x)^2]$$

Esta ecuación que denominaremos D2ST es la derivada segunda en el algoritmo de aproximación de Stirling. Esta aproximación es de primer orden. Finalmente, consideramos la aproximación D1NGP de orden mas bajo para la derivada primera:

$$\left. \frac{dy}{dt} \right|_{t_n} = \frac{\Delta y_n}{\Delta t} + O[(\Delta t)]$$

La ecuación diferencial discretizada en el instante t_n queda en la forma:

$$\frac{\Delta y_n}{\Delta t} = f_n + O[(\Delta t)]$$

y como $\Delta y_n = y_{n+1} - y_n$,

A partir de la ecuación D1ST para la derivada primera en x_k , obtenemos el valor de la derivada segunda en x_k como:

$$F_2''(x_k) = \frac{1}{2\Delta x} [F_2'(x_{k+1}) - F_2'(x_{k-1})]$$

Reemplazando aquí, tenemos

$$F_2'(x_{k+1}) \quad \text{y} \quad F_2'(x_{k-1}) \quad , \text{tenemos}$$

$$F_2'(x_{k+1}) = \frac{1}{\Delta x} \left[\frac{3}{2}f_{k+1} - 2f_k + \frac{1}{2}f_{k-1} \right] + O[(\Delta x)^2]$$

$$F_2'(x_{k-1}) = \frac{1}{\Delta x} \left[-\frac{1}{2}f_{k+1} + 2f_k - \frac{3}{2}f_{k-1} \right] + O[(\Delta x)^2]$$

De donde llegamos a:

$$F_2''(x_k) = \frac{1}{(\Delta x)^2} [f_{k+1} - 2f_k + f_{k-1}] + O[(\Delta x)^2]$$

Esta ecuación que denominaremos D2ST es la derivada segunda en el algoritmo de aproximación de Stirling. Esta aproximación es de primer orden. Finalmente, consideramos la aproximación D1NGP de orden mas bajo para la derivada primera:

$$\left. \frac{dy}{dt} \right|_{t_n} = \frac{\Delta y_n}{\Delta t} + O[(\Delta t)]$$

La ecuación diferencial discretizada en el instante t_n queda en la forma:

$$\frac{\Delta y_n}{\Delta t} = f_n + O[(\Delta t)]$$

y como

$$\Delta y_n = y_{n+1} - y_n,$$

Las mediciones de los datos adquiridos para el cálculo inicial de contaminantes según el modelo propuesto son valores del mes de agosto del 2018.

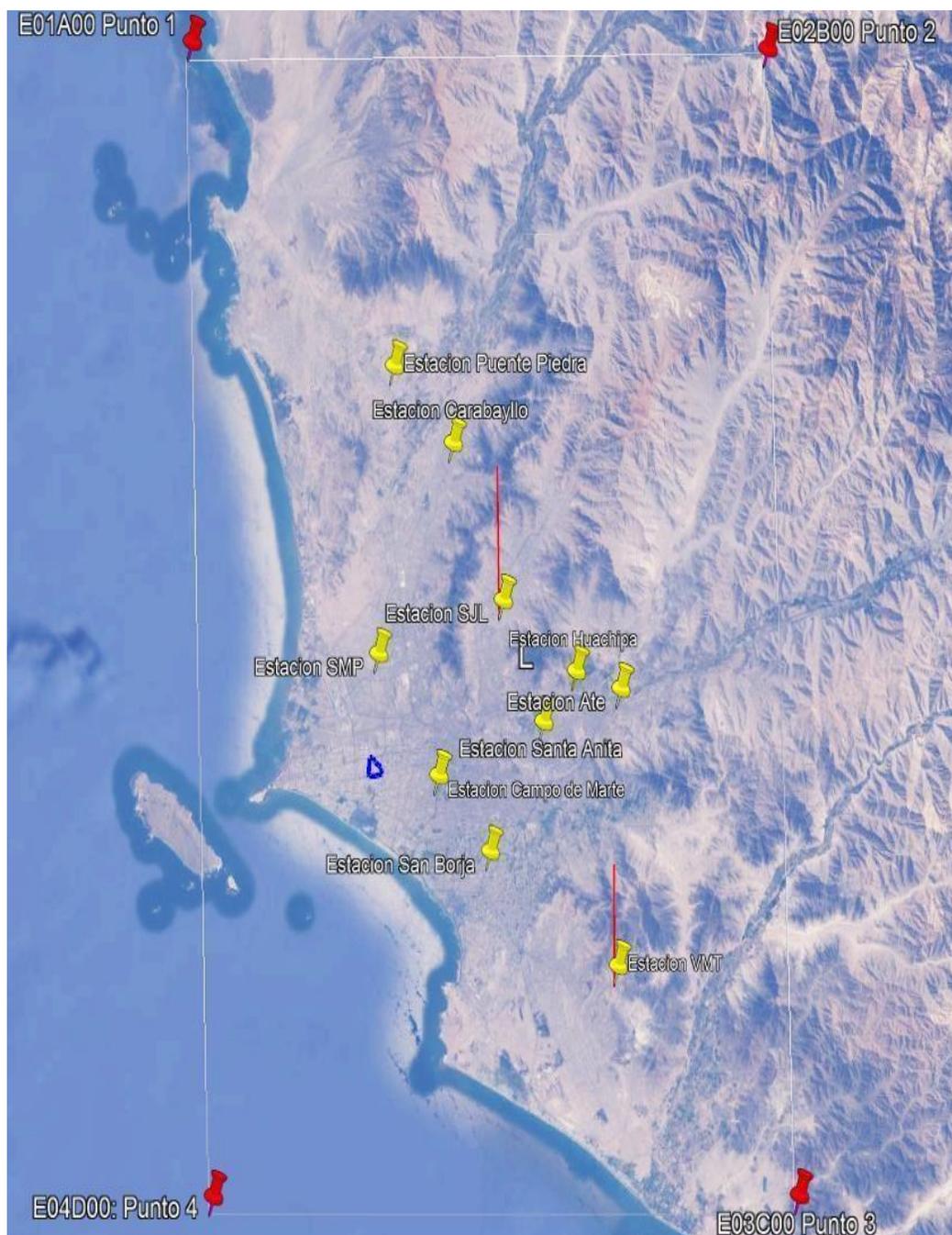
7.4 Datos de entrada (Input)

Los datos que hemos adquirido del Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología – SENAMHI, órgano oficial para monitorear el aire en la ciudad de Lima, corresponden al mes de agosto del 2019, estos datos ya cuentan un control de calidad, los instrumentos de medición, también se encuentran debidamente calibrado para realizar la lectura de las concentraciones en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), de los seis elementos contaminantes, es decir, luego del proceso de recolección de los datos cuentan con certificación de calidad tanto en la técnicas como en la metodología. Asimismo, la instrumentación de los equipos calibrados también cumple con la estandarización para hacer la medición continua de cada componente contaminante atmosférico en las 10 estaciones de medición ubicada según el esquema de la figura 48 (ver plano georreferenciado en Anexo I, ítem 12), donde los valores con iniciales se realizan a 1 y 10 metros de altitud de la superficie de la tierra.

Tabla 12. Coordenadas UTM de las estaciones de monitoreo en metros.

| ESTACIÓN | ESTE | NORTE | ALTITUD |
|--------------------------------|-----------------|------------------|----------------|
| Puente piedra | 274053.1 | 8687726.5 | 180 |
| Carabaylo | 278497.6 | 8683450.5 | 190 |
| San Juan de Lurigancho | 282308.4 | 8674688.3 | 240 |
| San Martin de Porres | 273047.6 | 8671604.2 | 60 |
| Huachipa | 287795.5 | 8670775.1 | 140 |
| Ate | 291126.1 | 8669830.2 | 360 |
| Santa Anita | 285388.5 | 8667920.9 | 270 |
| Campo de Marte | 277597.3 | 8664836.8 | 120 |
| San Borja | 281483.2 | 8660631.1 | 140 |
| <i>Villa María del Triunfo</i> | <i>291083.7</i> | <i>8654309.4</i> | <i>290</i> |

Figura 41. Estaciones de toma de datos de SENAMHI.



Adaptación referencial de Senamhi.

Los datos de ingreso son de las 10 estaciones de monitoreo de calidad de aire del SENAMHI establecido en diez distritos estratégicos de Lima Metropolitana, estos datos son tablas

de los cinco contaminantes atmosféricos en estudio, a los cuales aplicamos la interpolación polinómica o de Stirling con la cual se obtiene de la tabla de datos de contaminantes mostrado en la figura No. 49 siguiente:

Figura 42. Datos de ingreso en formato xls.

| No. DE | Delta de | Presion en | Presion en | Temperatura | Velocidad | cota o altura | PM 2,5 | PM 10 | SO _x | NO _x | O ₃ | CO | |
|------------|-------------|------------|------------|------------------|------------------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------|
| Mediciones | Volumen m3. | atm. | Pa. | en grados Kelvin | de viento x altura m/s | msnm | µg / m ³ | |
| 13 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 101323.79 | 297.00 | 2.45 | 1.00 | 72.63 | 83.40 | 15.66 | 35.23 | 19.15 | 1969.95 |
| 14 | 2 | 0.999564 | 0.999762 | 101300.89 | 296.81 | 3.30 | 20 | 72.77 | 83.54 | 15.68 | 35.30 | 19.19 | 1973.70 |
| 15 | 3 | 0.999105 | 0.999524 | 101276.78 | 296.61 | 8.14 | 40 | 72.89 | 83.65 | 15.71 | 35.36 | 19.22 | 1977.00 |
| 16 | 4 | 0.998646 | 0.999286 | 101252.68 | 296.41 | 6.11 | 60 | 72.99 | 83.71 | 15.73 | 35.41 | 19.25 | 1979.82 |
| 17 | 5 | 0.998186 | 0.999048 | 101228.58 | 296.21 | 5.43 | 80 | 73.08 | 83.74 | 15.75 | 35.45 | 19.27 | 1982.18 |
| 18 | 6 | 0.997725 | 0.998811 | 101204.49 | 296.01 | 5.09 | 100 | 73.15 | 83.73 | 15.76 | 35.48 | 19.29 | 1984.06 |
| 19 | 7 | 0.997265 | 0.998573 | 101180.41 | 295.81 | 4.89 | 120 | 73.20 | 83.68 | 15.77 | 35.51 | 19.30 | 1985.48 |
| 20 | 8 | 0.996805 | 0.998335 | 101156.33 | 295.61 | 4.75 | 140 | 73.24 | 83.59 | 15.78 | 35.53 | 19.31 | 1986.43 |
| 21 | 9 | 0.996344 | 0.998098 | 101132.26 | 295.41 | 4.65 | 160 | 73.25 | 83.46 | 15.79 | 35.53 | 19.31 | 1986.90 |
| 22 | 10 | 0.995883 | 0.99786 | 101108.19 | 295.21 | 4.58 | 180 | 73.25 | 83.30 | 15.79 | 35.53 | 19.31 | 1986.90 |
| 23 | 11 | 0.995421 | 0.997623 | 101084.13 | 295.01 | 4.52 | 200 | 73.24 | 83.09 | 15.78 | 35.53 | 19.31 | 1986.43 |
| 24 | 12 | 0.99311 | 0.996436 | 100963.91 | 284.01 | 6.11 | 300 | 73.13 | 82.70 | 15.76 | 35.47 | 19.28 | 1983.59 |
| 25 | 13 | 0.990792 | 0.995251 | 100843.84 | 283.01 | 5.43 | 400 | 72.94 | 82.11 | 15.72 | 35.38 | 19.23 | 1978.40 |
| 26 | 14 | 0.988466 | 0.994068 | 100723.90 | 282.01 | 5.09 | 500 | 72.66 | 81.34 | 15.66 | 35.25 | 19.16 | 1970.88 |

SENAMHI, 2018.

Como se observa en la figura 51., los datos indican diferencia de volumen, presión atmosférica, temperatura absoluta, velocidad de viento y cota sobre el nivel del mar en la parte izquierda y en la parte derecha se observan los valores de los contaminantes atmosféricos en el orden de izquierda a derecha de PM2.5, PM10, SO_x, NO_x, O₃ y CO.

En la parte inferior, tenemos pestañas que muestran los límites pedidos en la adquisición representado por E01A y E04D y las mediciones propiamente dicho de las estaciones que van de norte a sur, desde Puente Piedra, Carabayllo, estación SJL, hasta estación SMP. Tal como se muestra en la figura No.50.

Figura 43. Datos de ingreso SENAMHI en formato xls para Huachipa.

| ESTACION | Dat.Estac. | Altura | 187 msnm | | Altura de estacion | | 1 atm = 101325Pa | | | | | |
|------------|-------------|------------|------------|------------------|------------------------|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| HUACHIP | HUACHIP | Vel.Viento | 4.22945962 | m/s | E22900 | Vel. Viento | 1.6 - 3.3 m/s | 19 °C | Cota (m.) = 187 | | | |
| E22900 | E22900 | Temperat. | 19 °C | | 187 msnm | Para z=h Omsnm | Pz = | 101325Pa | donde Pa = Pascales | | | |
| No. DE | Delta de | Presion en | Presion en | Temperatura | Velocidad | cota o altura | PM 2,5 | PM 10 | SO ₂ | NO ₂ | O ₃ | CO |
| Mediciones | Volumen m3. | atm. | Pa. | en grados Kelvin | de viento x altura m/s | msnm | µg / m ³ |
| 1 | 1 | 0.997777 | 101099.77 | 292.00 | 4.23 | 187 | 35.74 | 186.7 | 0.17 | 80.26 | 0.08 | 2622 |
| 2 | 0.999709 | 0.997623 | 101084.13 | 291.87 | 5.54 | 200 | 35.73 | 187.05 | 0.17 | 80.24 | 0.08 | 2621.38 |
| 3 | 0.997471 | 0.996436 | 100963.91 | 290.87 | 7.77 | 300 | 35.68 | 186.97 | 0.17 | 80.13 | 0.08 | 2617.63 |
| 4 | 0.995225 | 0.995251 | 100843.84 | 289.87 | 6.91 | 400 | 35.59 | 186.48 | 0.17 | 79.92 | 0.08 | 2610.79 |
| 5 | 0.992972 | 0.994068 | 100723.90 | 288.87 | 6.48 | 500 | 35.45 | 185.57 | 0.17 | 79.61 | 0.08 | 2600.87 |
| 6 | 0.990714 | 0.992885 | 100604.11 | 287.87 | 6.22 | 600 | 35.28 | 184.24 | 0.17 | 79.22 | 0.08 | 2587.90 |
| 7 | 0.988447 | 0.991705 | 100484.46 | 286.87 | 6.05 | 700 | 35.06 | 182.50 | 0.17 | 78.73 | 0.08 | 2571.94 |
| 8 | 0.986175 | 0.990525 | 100364.96 | 285.87 | 5.92 | 800 | 34.80 | 180.36 | 0.17 | 78.15 | 0.08 | 2553.03 |
| 9 | 0.983895 | 0.989347 | 100245.59 | 284.87 | 5.83 | 900 | 34.50 | 177.84 | 0.17 | 77.48 | 0.08 | 2531.25 |
| 10 | 0.981609 | 0.98817 | 100126.37 | 283.87 | 5.76 | 1000 | 34.17 | 174.94 | 0.16 | 76.73 | 0.08 | 2506.67 |
| 11 | 0.979316 | 0.986995 | 100007.29 | 282.87 | 5.70 | 1100 | 33.80 | 171.69 | 0.16 | 75.89 | 0.08 | 2479.37 |
| 12 | 0.977016 | 0.985821 | 99888.35 | 281.87 | 5.65 | 1200 | 33.39 | 168.10 | 0.16 | 74.98 | 0.08 | 2449.46 |
| 13 | 0.974709 | 0.984649 | 99769.55 | 280.87 | 5.61 | 1300 | 32.95 | 164.20 | 0.16 | 73.98 | 0.07 | 2417.03 |
| 14 | 0.972395 | 0.983478 | 99650.90 | 279.87 | 5.58 | 1400 | 32.47 | 160.01 | 0.16 | 72.92 | 0.07 | 2382.19 |

SENAMHI, (2018)

Finalmente se observa el formato que muestra los datos hasta Villa María del Triunfo, según se muestra en la figura 51.

Figura 44. Datos de ingreso SENAMHI en formato xls para VMT.

| 6 | | | | | | | | | | | | |
|----|-------------|------------|------------|--------------------|------------------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 7 | Dat.Estac. | Altura | 292 msnm | Altura de estacion | 1 atm = 101325Pa | | | | | | | |
| 8 | VMT | Vel.Viento | 3.1 m/s | E23500 | Vel. Viento | 1.6 - 3.3 m/s | 20 °C | Cota (m.) = 292 | | | | |
| 9 | E23500 | Temperat. | 20 °C | 292 msnm | Para z=h Omsnm | Pz = | 101325Pa | donde Pa = Pascales | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | |
| 11 | Delta de | Presion en | Presion en | Temperatura | Velocidad | cota o altura | PM 2,5 | PM 10 | SO ₂ | NO ₂ | O ₃ | CO |
| 12 | Volumen m3. | atm. | Pa. | en grados Kelvin | de viento x altura m/s | msnm | µg / m ³ |
| 13 | 1.00 | 1.00 | 100973.52 | 293.00 | 3.10 | 292.00 | 27.22 | 104.40 | 4.08 | 6.52 | 2.10 | 865.95 |
| 14 | 0.999822 | 0.996436 | 100963.91 | 292.92 | 4.18 | 300 | 27.18 | 104.61 | 4.07 | 6.51 | 2.10 | 864.71 |
| 15 | 0.997595 | 0.995251 | 100843.84 | 291.92 | 5.43 | 400 | 27.11 | 104.58 | 4.06 | 6.49 | 2.09 | 862.45 |
| 16 | 0.995361 | 0.994068 | 100723.90 | 290.92 | 5.09 | 500 | 27.01 | 104.32 | 4.05 | 6.47 | 2.08 | 859.18 |
| 17 | 0.993121 | 0.992885 | 100604.11 | 289.92 | 4.89 | 600 | 26.87 | 103.82 | 4.03 | 6.44 | 2.07 | 854.89 |
| 18 | 0.990873 | 0.991705 | 100484.46 | 288.92 | 4.75 | 700 | 26.71 | 103.09 | 4.00 | 6.40 | 2.06 | 849.62 |
| 19 | 0.98862 | 0.990525 | 100364.96 | 287.92 | 4.65 | 800 | 26.51 | 102.14 | 3.97 | 6.35 | 2.05 | 843.37 |
| 20 | 0.986359 | 0.989347 | 100245.59 | 286.92 | 4.58 | 900 | 26.28 | 100.96 | 3.94 | 6.30 | 2.03 | 836.18 |
| 21 | 0.984092 | 0.98817 | 100126.37 | 285.92 | 4.52 | 1000 | 26.03 | 99.57 | 3.90 | 6.24 | 2.01 | 828.06 |
| 22 | 0.981818 | 0.986995 | 100007.29 | 284.92 | 4.48 | 1100 | 25.75 | 97.97 | 3.86 | 6.17 | 1.99 | 819.04 |
| 23 | 0.979537 | 0.985821 | 99888.35 | 283.92 | 4.44 | 1200 | 25.44 | 96.17 | 3.81 | 6.09 | 1.96 | 809.16 |
| 24 | 0.977249 | 0.984649 | 99769.55 | 282.92 | 4.41 | 1300 | 25.10 | 94.18 | 3.76 | 6.01 | 1.94 | 798.45 |
| 25 | 0.974954 | 0.983478 | 99650.90 | 281.92 | 4.38 | 1400 | 24.74 | 92.02 | 3.71 | 5.93 | 1.91 | 786.94 |
| 26 | 0.972653 | 0.982308 | 99532.38 | 280.92 | 4.36 | 1500 | 24.35 | 89.70 | 3.65 | 5.83 | 1.88 | 774.67 |
| 27 | 0.970344 | 0.98114 | 99414.01 | 279.92 | 4.34 | 1600 | 23.94 | 87.22 | 3.59 | 5.74 | 1.85 | 761.69 |

SENAMHI, (2019)

A partir de estos 12 libros que se presentan en la parte inferior del formato xls, los mismos que van desde (E01A , ..., VTM), mostrados anteriormente, mediante procesos simples de manejo de base de datos, simplificamos la totalidad de estos datos solamente a cuatro archivos principales que el modelo MDLE tiene estructurado para el ingreso masivo de datos, estos 4 archivos tienen en su estructura las mediciones de la totalidad de las estaciones cuyo inicio de dicho archivo mostrado en la figura 52, muestra los 30 primeras mediciones que ingresa al modelo.

Figura 45. Datos de ingreso del inicio del archivo Station_ASSAY.

| 1 | STAT-ID | FROM | TO | SAMPLE_No | PM25 | PM10 | SOx | NOx | O_3 | COx |
|----|---------|---------|---------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 2 | E01A00 | 0.00 | 4000.00 | E01A00-1 | 35.93 | 16.28 | 7.74 | 17.43 | 9.47 | 974.56 |
| 3 | E01A00 | 4000.00 | 4500.00 | E01A00-2 | 40.38 | 22.13 | 8.70 | 19.59 | 10.65 | 1095.37 |
| 4 | E01A00 | 4500.00 | 5000.00 | E01A00-3 | 43.28 | 26.00 | 9.33 | 20.99 | 11.41 | 1173.92 |
| 5 | E01A00 | 5000.00 | 5500.00 | E01A00-4 | 46.11 | 30.06 | 9.94 | 22.37 | 12.16 | 1250.65 |
| 6 | E01A00 | 5500.00 | 6000.00 | E01A00-5 | 48.83 | 34.22 | 10.52 | 23.69 | 12.88 | 1324.48 |
| 7 | E01A00 | 6000.00 | 6500.00 | E01A00-6 | 51.41 | 38.39 | 11.08 | 24.94 | 13.56 | 1394.35 |
| 8 | E01A00 | 6500.00 | 7000.00 | E01A00-7 | 53.80 | 42.44 | 11.59 | 26.10 | 14.19 | 1459.19 |
| 9 | E01A00 | 7000.00 | 7500.00 | E01A00-8 | 55.97 | 46.26 | 12.06 | 27.15 | 14.76 | 1518.00 |
| 10 | E01A00 | 7500.00 | 8000.00 | E01A00-9 | 57.88 | 49.74 | 12.47 | 28.07 | 15.26 | 1569.81 |
| 11 | E01A00 | 8000.00 | 8100.00 | E01A00-10 | 59.50 | 52.77 | 12.82 | 28.86 | 15.69 | 1613.75 |
| 12 | E01A00 | 8100.00 | 8200.00 | E01A00-11 | 60.80 | 55.27 | 13.10 | 29.49 | 16.03 | 1649.08 |
| 13 | E01A00 | 8200.00 | 8300.00 | E01A00-12 | 62.06 | 57.74 | 13.37 | 30.10 | 16.36 | 1683.18 |
| 14 | E01A00 | 8300.00 | 8400.00 | E01A00-13 | 63.26 | 60.17 | 13.63 | 30.69 | 16.68 | 1715.94 |
| 15 | E01A00 | 8400.00 | 8500.00 | E01A00-14 | 64.42 | 62.54 | 13.88 | 31.25 | 16.99 | 1747.27 |
| 16 | E01A00 | 8500.00 | 8600.00 | E01A00-15 | 65.52 | 64.85 | 14.12 | 31.78 | 17.27 | 1777.04 |
| 17 | E01A00 | 8600.00 | 8700.00 | E01A00-16 | 66.55 | 67.07 | 14.34 | 32.28 | 17.55 | 1805.18 |
| 18 | E01A00 | 8700.00 | 8800.00 | E01A00-17 | 67.53 | 69.19 | 14.55 | 32.76 | 17.80 | 1831.58 |
| 19 | E01A00 | 8800.00 | 8900.00 | E01A00-18 | 68.43 | 71.21 | 14.75 | 33.20 | 18.04 | 1856.15 |
| 20 | E01A00 | 8900.00 | 9000.00 | E01A00-19 | 69.27 | 73.10 | 14.93 | 33.60 | 18.26 | 1878.82 |
| 21 | E01A00 | 9000.00 | 9100.00 | E01A00-20 | 70.03 | 74.86 | 15.09 | 33.97 | 18.46 | 1899.50 |
| 22 | E01A00 | 9100.00 | 9200.00 | E01A00-21 | 70.72 | 76.48 | 15.24 | 34.30 | 18.65 | 1918.13 |
| 23 | E01A00 | 9200.00 | 9300.00 | E01A00-22 | 71.33 | 77.95 | 15.37 | 34.60 | 18.81 | 1934.63 |
| 24 | E01A00 | 9300.00 | 9400.00 | E01A00-23 | 71.86 | 79.25 | 15.48 | 34.86 | 18.94 | 1948.96 |
| 25 | E01A00 | 9400.00 | 9500.00 | E01A00-24 | 72.30 | 80.38 | 15.58 | 35.07 | 19.06 | 1961.06 |
| 26 | E01A00 | 9500.00 | 9600.00 | E01A00-25 | 72.66 | 81.34 | 15.66 | 35.25 | 19.16 | 1970.88 |
| 27 | E01A00 | 9600.00 | 9700.00 | E01A00-26 | 72.94 | 82.11 | 15.72 | 35.38 | 19.23 | 1978.40 |
| 28 | E01A00 | 9700.00 | 9800.00 | E01A00-27 | 73.13 | 82.70 | 15.76 | 35.47 | 19.28 | 1983.59 |
| 29 | E01A00 | 9800.00 | 9820.00 | E01A00-28 | 73.24 | 83.09 | 15.78 | 35.53 | 19.31 | 1986.43 |
| 30 | E01A00 | 9820.00 | 9840.00 | E01A00-29 | 73.25 | 83.30 | 15.79 | 35.53 | 19.31 | 1986.90 |
| 31 | E01A00 | 9840.00 | 9860.00 | E01A00-30 | 73.25 | 83.46 | 15.79 | 35.53 | 19.31 | 1986.90 |

En la figura 52, del archivo denominado "Station_ASSAY", se muestra el final del archivo indicando los datos finales del mismo archivo que están en el rango de 7,221 a 7,248 que es el último valor de las mediciones que ingresa al modelo para este archivo.

Figura 46. Datos de ingreso del final del archivo "Station_ASSAY."

| 7221 | STAM-ID | FROM | TO | SAMPLE_NO | PM25 | PM10 | SO2 | NO2 | O3 | CO |
|------|---------|---------|----------|-----------|-------|--------|------|------|------|--------|
| 7222 | E23520 | 8100.00 | 8200.00 | E23520-11 | 24.04 | 94.01 | 4.64 | 2.70 | 0.39 | 536.22 |
| 7223 | E23520 | 8200.00 | 8300.00 | E23520-12 | 24.53 | 97.99 | 4.74 | 2.76 | 0.39 | 547.30 |
| 7224 | E23520 | 8300.00 | 8400.00 | E23520-13 | 25.01 | 101.88 | 4.83 | 2.81 | 0.40 | 557.96 |
| 7225 | E23520 | 8400.00 | 8500.00 | E23520-14 | 25.47 | 105.68 | 4.92 | 2.87 | 0.41 | 568.14 |
| 7226 | E23520 | 8500.00 | 8600.00 | E23520-15 | 25.90 | 109.36 | 5.00 | 2.91 | 0.42 | 577.82 |
| 7227 | E23520 | 8600.00 | 8700.00 | E23520-16 | 26.31 | 112.89 | 5.08 | 2.96 | 0.42 | 586.97 |
| 7228 | E23520 | 8700.00 | 8800.00 | E23520-17 | 26.70 | 116.27 | 5.15 | 3.00 | 0.43 | 595.56 |
| 7229 | E23520 | 8800.00 | 8900.00 | E23520-18 | 27.05 | 119.46 | 5.22 | 3.04 | 0.43 | 603.55 |
| 7230 | E23520 | 8900.00 | 9000.00 | E23520-19 | 27.38 | 122.46 | 5.29 | 3.08 | 0.44 | 610.92 |
| 7231 | E23520 | 9000.00 | 9100.00 | E23520-20 | 27.68 | 125.24 | 5.34 | 3.11 | 0.44 | 617.64 |
| 7232 | E23520 | 9100.00 | 9200.00 | E23520-21 | 27.96 | 127.78 | 5.40 | 3.15 | 0.45 | 623.70 |
| 7233 | E23520 | 9200.00 | 9300.00 | E23520-22 | 28.20 | 130.08 | 5.44 | 3.17 | 0.45 | 629.07 |
| 7234 | E23520 | 9300.00 | 9400.00 | E23520-23 | 28.41 | 132.12 | 5.48 | 3.20 | 0.46 | 633.73 |
| 7235 | E23520 | 9400.00 | 9500.00 | E23520-24 | 28.58 | 133.88 | 5.52 | 3.22 | 0.46 | 637.66 |
| 7236 | E23520 | 9500.00 | 9600.00 | E23520-25 | 28.72 | 135.36 | 5.54 | 3.23 | 0.46 | 640.85 |
| 7237 | E23520 | 9600.00 | 9700.00 | E23520-26 | 28.83 | 136.55 | 5.56 | 3.24 | 0.46 | 643.30 |
| 7238 | E23520 | 9700.00 | 9800.00 | E23520-27 | 28.91 | 137.44 | 5.58 | 3.25 | 0.46 | 644.99 |
| 7239 | E23520 | 9800.00 | 9820.00 | E23520-28 | 28.95 | 138.02 | 5.59 | 3.26 | 0.46 | 645.91 |
| 7240 | E23520 | 9820.00 | 9840.00 | E23520-29 | 28.96 | 138.31 | 5.59 | 3.26 | 0.46 | 646.06 |
| 7241 | E23520 | 9840.00 | 9860.00 | E23520-30 | 28.96 | 138.53 | 5.59 | 3.26 | 0.46 | 646.06 |
| 7242 | E23520 | 9860.00 | 9880.00 | E23520-31 | 28.95 | 138.69 | 5.59 | 3.26 | 0.46 | 645.91 |
| 7243 | E23520 | 9880.00 | 9900.00 | E23520-32 | 28.94 | 138.79 | 5.58 | 3.26 | 0.46 | 645.60 |
| 7244 | E23520 | 9900.00 | 9920.00 | E23520-33 | 28.92 | 138.82 | 5.58 | 3.25 | 0.46 | 645.14 |
| 7245 | E23520 | 9920.00 | 9940.00 | E23520-34 | 28.89 | 138.80 | 5.58 | 3.25 | 0.46 | 644.53 |
| 7246 | E23520 | 9940.00 | 9960.00 | E23520-35 | 28.85 | 138.72 | 5.57 | 3.25 | 0.46 | 643.76 |
| 7247 | E23520 | 9960.00 | 9980.00 | E23520-36 | 28.81 | 138.57 | 5.56 | 3.24 | 0.46 | 642.84 |
| 7248 | E23520 | 9980.00 | 9990.00 | E23520-37 | 28.77 | 138.37 | 5.55 | 3.24 | 0.46 | 641.77 |
| 7249 | E23520 | 9990.00 | 10000.00 | E23520-38 | 28.71 | 138.10 | 5.54 | 3.23 | 0.46 | 640.55 |
| 7250 | | | | | | | | | | |
| 7251 | | | | | | | | | | |

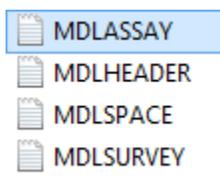
Como podemos observar el tamaño de la base de datos en número de registros es de 7,249 esto es en uno de los 4 archivos que se muestra en la figura 54. Asimismo, en este grafico se observa los libros que van de izquierda a derecha desde Station_HEADER, Station_SURVEY y Station_SPACE, los mismos que con el primer archivo Station_ASSAY, conforman los 4 archivos principales de ingreso de datos al modelo MDLE.

Figura 47. Cuatro archivos principales de ingreso al MDLE.

| 1 | STAT-ID | LOCATIONX | LOCATIONY | LOCATIONZ | LENGTH | ZONE |
|----|---------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|
| 2 | E01A00 | 258772.1 | 8705786.4 | 0 | 10000 | ZONE 1 |
| 3 | E02B00 | 301776.5 | 8705786.4 | 1111 | 8889 | ZONE 1 |
| 4 | E03C00 | 304743.5 | 8641591.4 | 327 | 9673 | ZONE 1 |
| 5 | E04D00 | 260991.1 | 8641087.4 | 0 | 10000 | ZONE 1 |
| 6 | E01A01 | 261772.1 | 8705786.4 | 88 | 9912 | ZONE 1 |
| 7 | E01A02 | 263772.1 | 8705786.4 | 492 | 9508 | ZONE 1 |
| 8 | E01A03 | 265772.1 | 8705786.4 | 364 | 9636 | ZONE 1 |
| 9 | E01A04 | 267772.1 | 8705786.4 | 263 | 9737 | ZONE 1 |
| 10 | E01A05 | 269772.1 | 8705786.4 | 248 | 9752 | ZONE 1 |
| 11 | E01A06 | 271772.1 | 8705786.4 | 575 | 9425 | ZONE 1 |
| 12 | E01A07 | 273772.1 | 8705786.4 | 865 | 9135 | ZONE 1 |
| 13 | E01A08 | 275772.1 | 8705786.4 | 958 | 9042 | ZONE 1 |
| 14 | E01A09 | 277772.1 | 8705786.4 | 1464 | 8536 | ZONE 1 |
| 15 | E01A10 | 279772.1 | 8705786.4 | 1211 | 8789 | ZONE 1 |
| 16 | E01A11 | 281772.1 | 8705786.4 | 868 | 9132 | ZONE 1 |
| 17 | E01A12 | 283772.1 | 8705786.4 | 756 | 9244 | ZONE 1 |
| 18 | E01A13 | 285772.1 | 8705786.4 | 694 | 9306 | ZONE 1 |
| 19 | E01A14 | 287772.1 | 8705786.4 | 781 | 9219 | ZONE 1 |
| 20 | E01A15 | 289772.1 | 8705786.4 | 736 | 9264 | ZONE 2 |
| 21 | E01A16 | 291772.1 | 8705786.4 | 984 | 9016 | ZONE 2 |
| 22 | E01A17 | 293772.1 | 8705786.4 | 1309 | 8691 | ZONE 2 |
| 23 | E01A18 | 295772.1 | 8705786.4 | 878 | 9122 | ZONE 2 |
| 24 | E01A19 | 297772.1 | 8705786.4 | 952 | 9048 | ZONE 2 |
| 25 | E01A20 | 299772.1 | 8705786.4 | 1043 | 8957 | ZONE 2 |
| 26 | E04D01 | 261772.1 | 8640591.4 | 0 | 10000 | ZONE 1 |
| 27 | E04D02 | 263772.1 | 8640591.4 | 0 | 10000 | ZONE 1 |
| 28 | E04D03 | 265772.1 | 8640591.4 | 0 | 10000 | ZONE 1 |
| 29 | E04D04 | 267772.1 | 8640591.4 | 0 | 10000 | ZONE 1 |
| 30 | E04D05 | 269772.1 | 8640591.4 | 0 | 10000 | ZONE 1 |
| 31 | E04D06 | 271772.1 | 8640591.4 | 0 | 10000 | ZONE 1 |

Luego, a partir de estos cuatro archivos, cambiamos de formato de xls, a formato csv, los mismos que se muestran en la figura 55.

Figura 48. Archivos principales del MDLE en formato SCV.



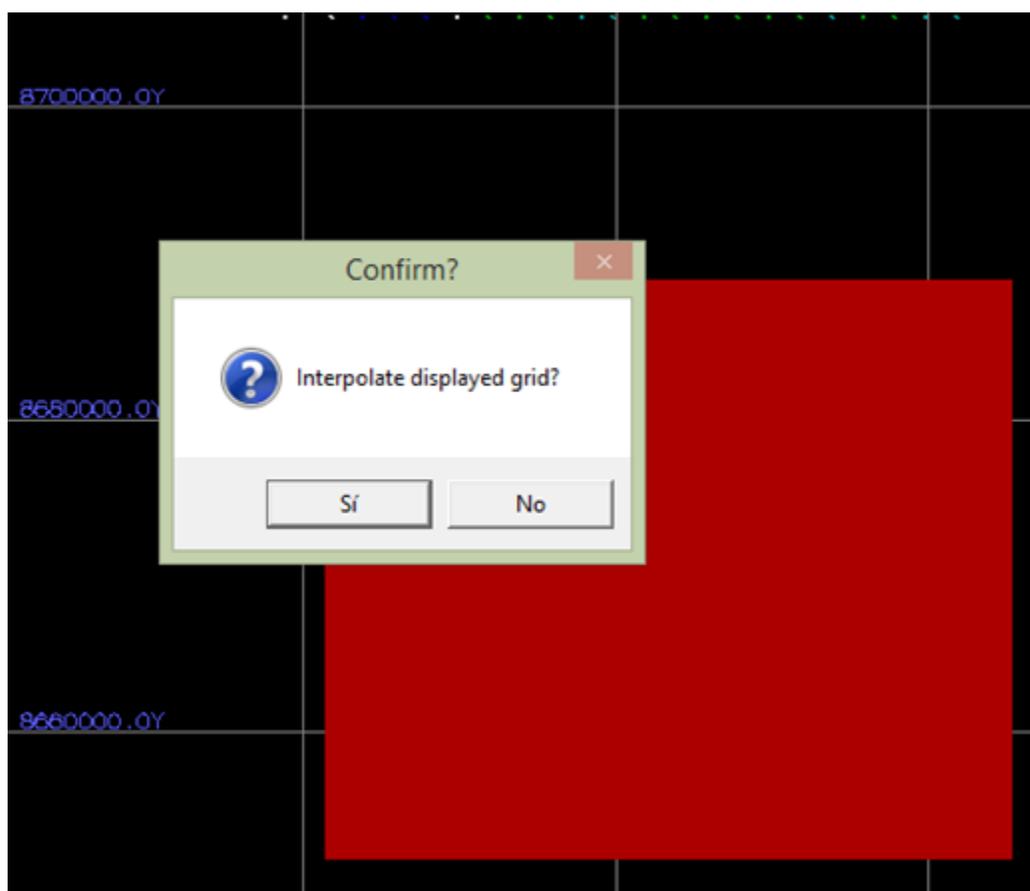
Estos son los cuatro archivos en formato SCV que el modelo MDLE almacena dentro de su estructura interna para luego procesar y ejecutar los algoritmos del modelo en base a las fórmulas tanto de Stirling como de Kriging, obteniendo la información de salida.

7.5 Proceso de calculo

7.5.1 Interpolación en 2D

La ejecución de los algoritmos se realiza en dos etapas, inicialmente se ejecuta en el plano de vista de planta, mediante 100 iteraciones en el área que le asignemos en forma manual, tal como se muestra en la figura 56, donde el área de color rojo es la que se le asigna en forma gráfica y las coordenadas UTM de color azul, indican la posición georreferenciadas de la superficie terrestre, por supuesto el área de color rojo, donde se procesa la información se encuentra dentro de las condiciones de frontera del modelo MDLE.

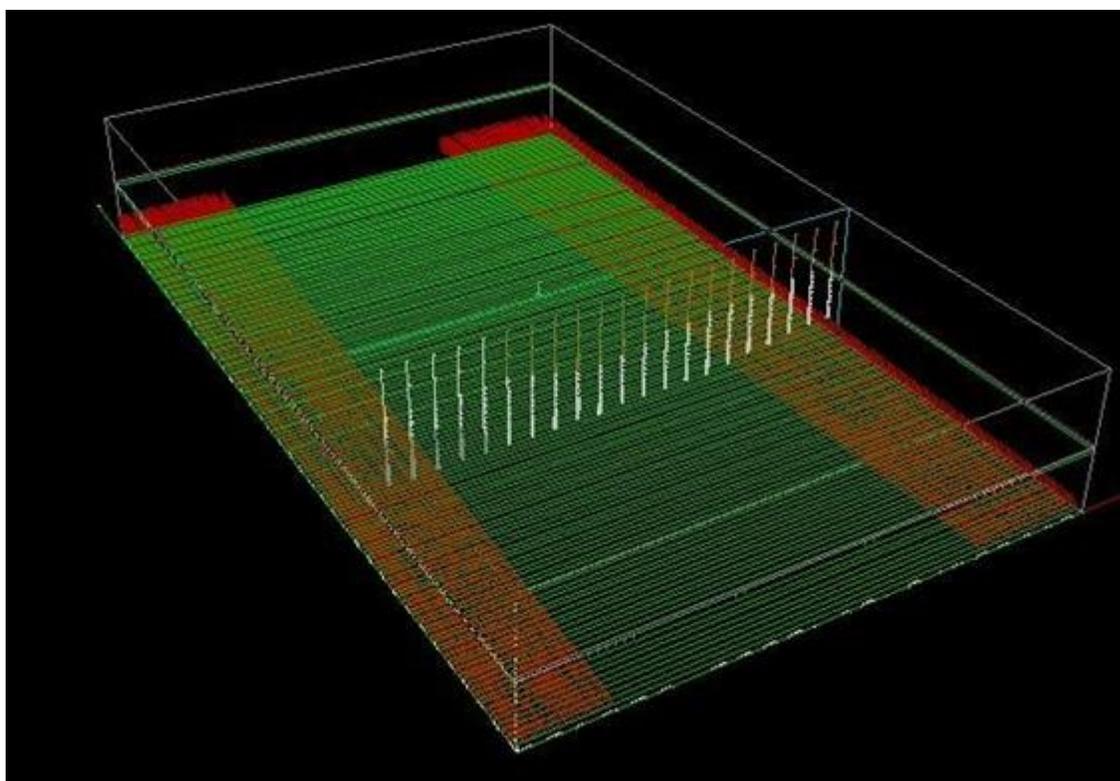
Figura 49. Interpolación 2D del MDLE en el área asignada.



7.5.2 Interpolación en 3D

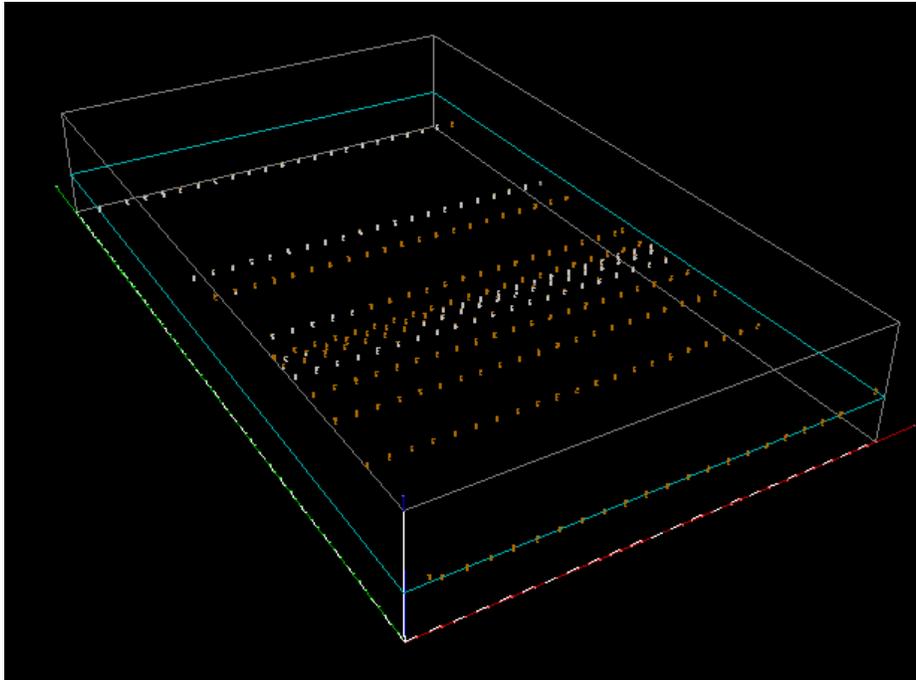
Para la ejecución de los algoritmos en el espacio tridimensional, donde se da solución al sistema de ecuaciones lineales de kriging, se activa las condiciones geométricas del modelo, tal como se muestra en la figura No. 57. Donde el área de color rojo es la que se le asigna en forma gráfica y las coordenadas UTM de color azul, indican la posición georreferenciada de la superficie terrestre, por supuesto el área de color rojo, donde se procesa la información se encuentra dentro de las condiciones de frontera del modelo MDLE.

Figura 50. Interpolación 3D en todo el ámbito del MDLE.



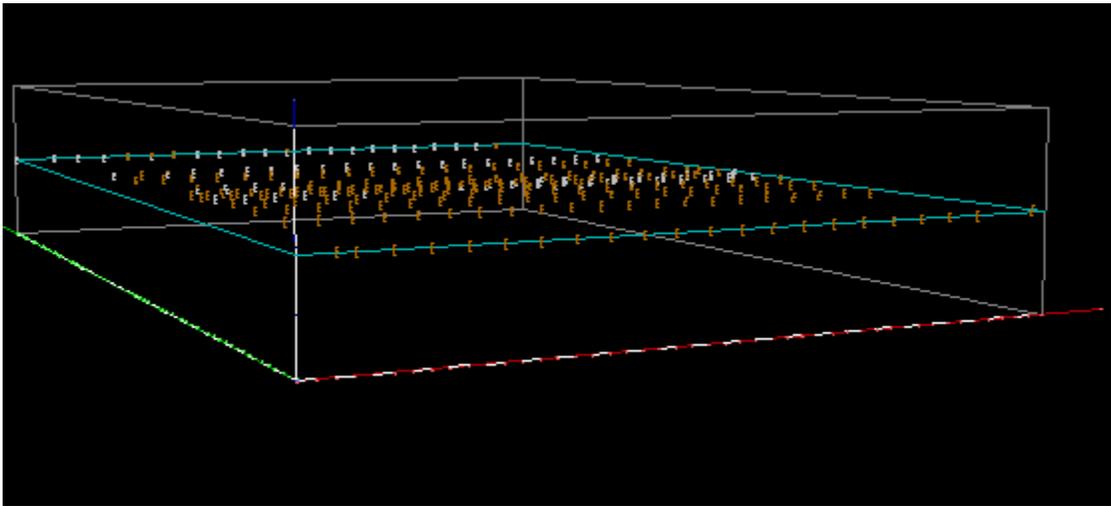
En la figura No. 58, vemos la asignación gráfica del espacio que deseamos ejecutar la interpolación, donde, gráficamente seleccionamos con el cuadro interactivo toda la geometría del modelo preferentemente iniciando desde el centro del objeto.

Figura 51. Selección en 3D de todo el ámbito del MDLE.



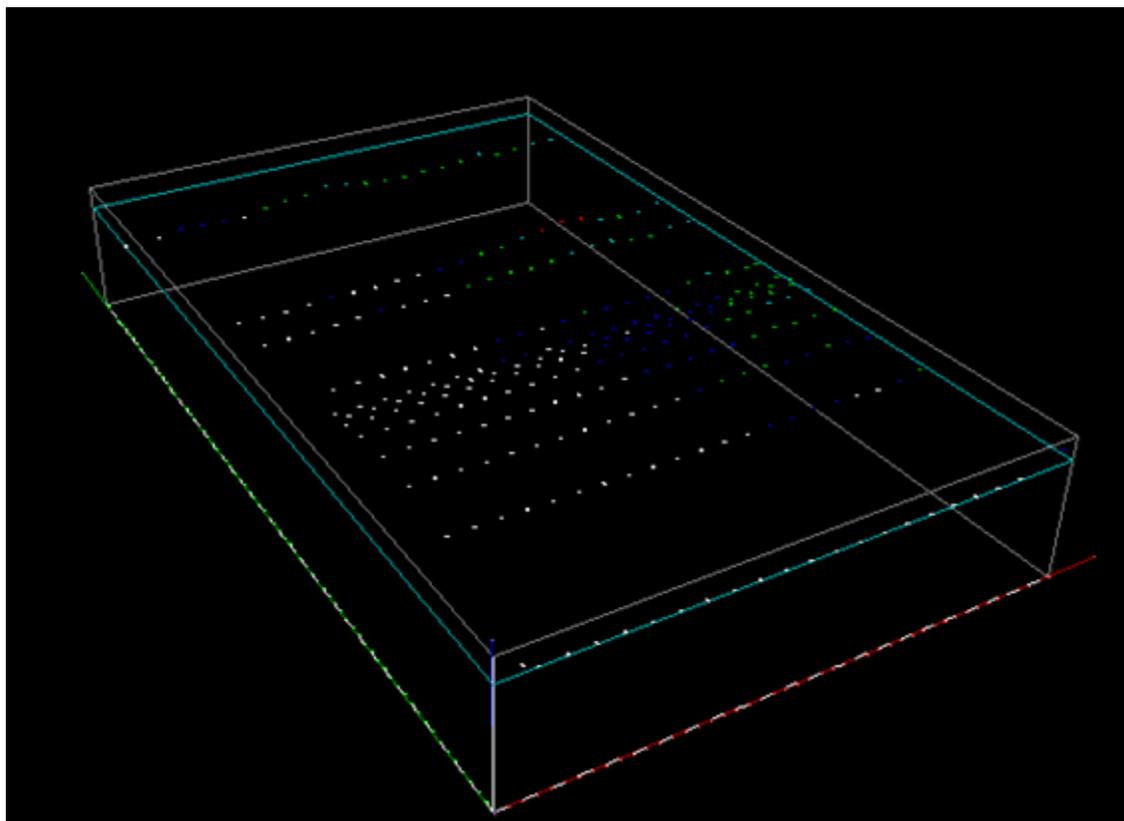
La línea que se encuentra en el medio del objeto geométrico es el área de selección, el mismo que se desplaza en las vistas de planta según el rango de iteración que elegimos, la figura 59, es otra vista desde un Angulo más cercano, esto es posible aplicando zoom del soporte lógico que estamos utilizando en este caso el Gemcom.

Figura 52. Zoom en 3D del área de selección.



Finalmente, en la figura 60 observamos la totalidad de los puntos a interpolar en todo el ámbito geométrico del modelo, nótese que, el área de selección se ha desplazado a la parte superficial de la geometría del modelo, es decir al límite de la condición de frontera vertical.

Figura 53. Desplazamiento del área de selección al extremo superior del modelo.

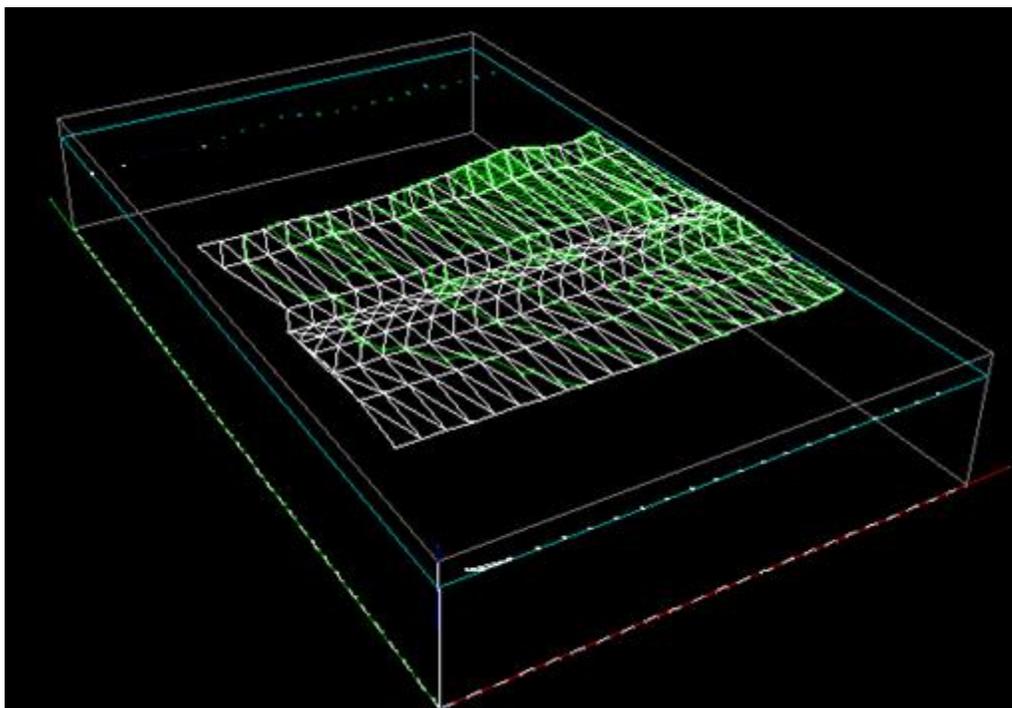


7.6 Datos de salida (Output)

7.6.1 Isovalores de partículas

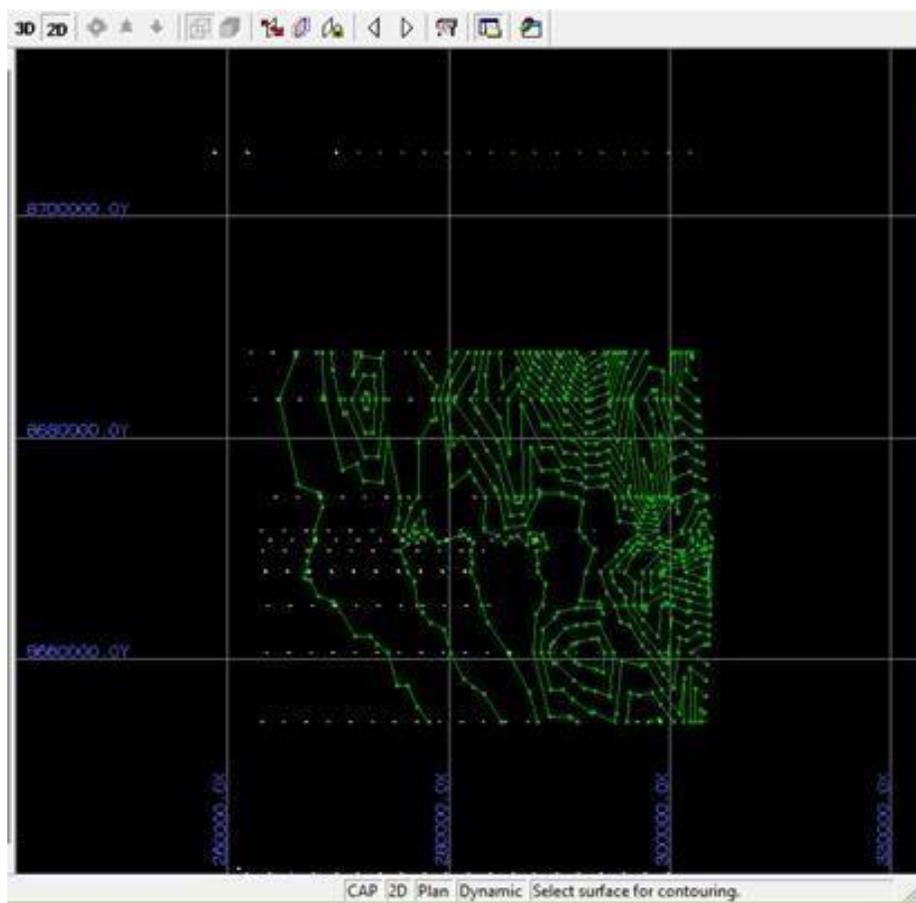
Luego del proceso de cálculo el modelo MDLE, presenta los valores de las partículas en suspensión para las diferentes altitudes sobre el nivel del mar, desde los valores que van en la superficie topográfica, hasta una altitud del límite de h , que está representada por la variable Z_k , para $k = 1, \dots, 10000$ metros, estos mapas podemos ver en 3D y en 2D, desde la zona 1, donde Z_k , varía de 0 a 1914 msnm. La figura 61, muestra el mapa de isovalores (en color verde) de las partículas PM10 en 3D.

Figura 54. Vista en 3D de isovalores de PM10.



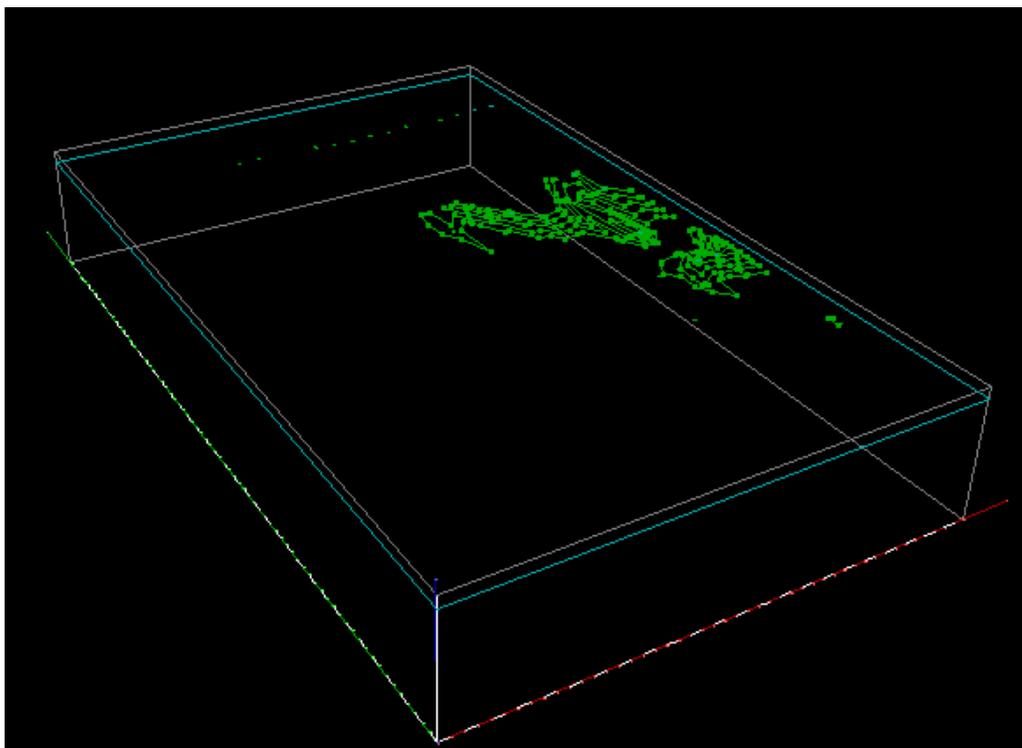
Por el amplio alcance geográfico no se pueden apreciar las isovalores, por lo que mostramos a continuación en 2D, tal como se muestra en la figura 62.

Figura 55. Vista en 2D de isovalores de PM10.



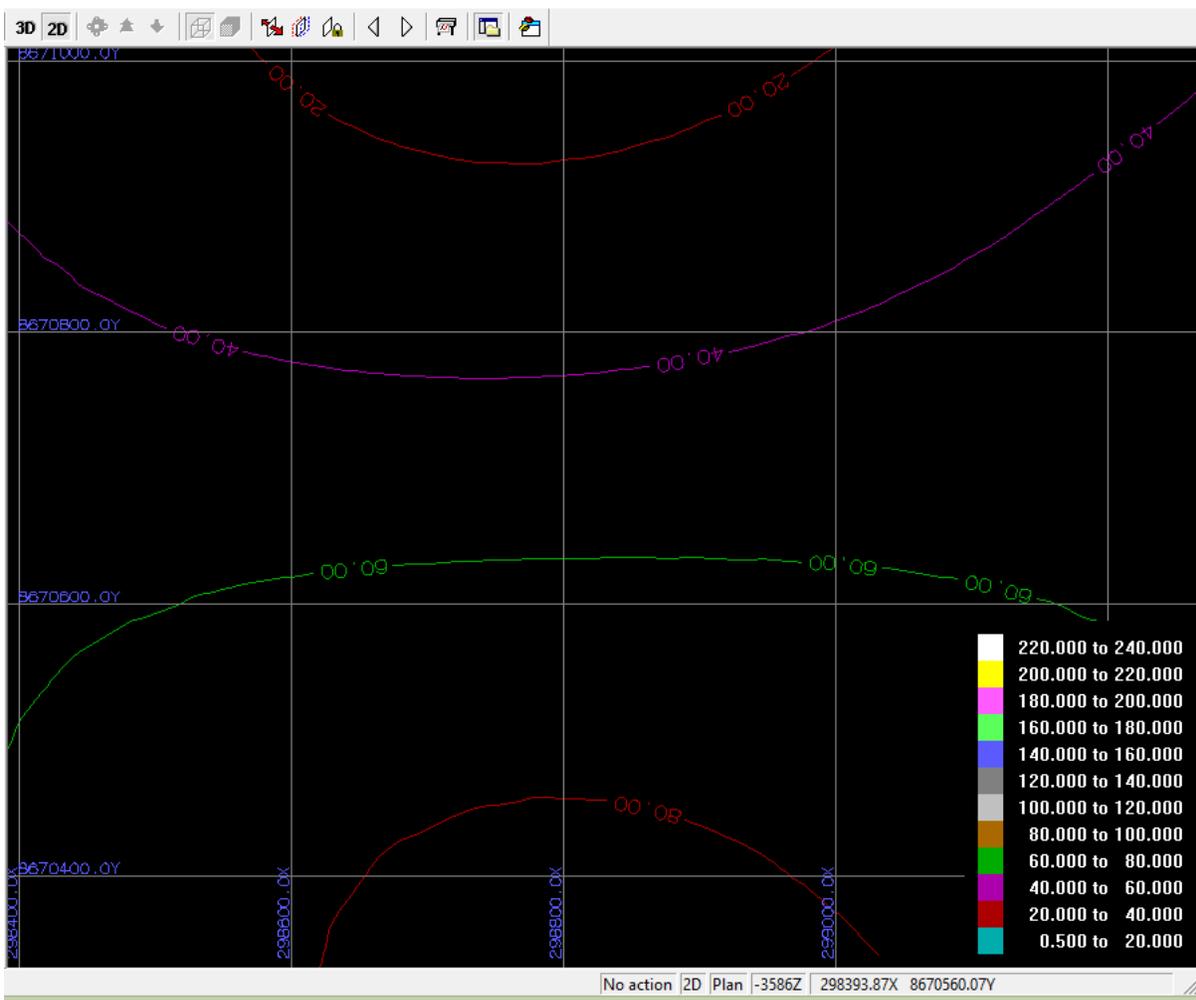
En la figura 63, visualizamos las isovalores a otra altitud diferente, siempre en el rango de 10 a 10000, ya que la condición de frontera topográfica está limitada hasta esta cota.

Figura 56. Vista en 3D de isovalores de PM10 en otra cota.



La figura 64 muestra las isovalores de PM10 después de aplicar el zoom en el área de la vista en planta.

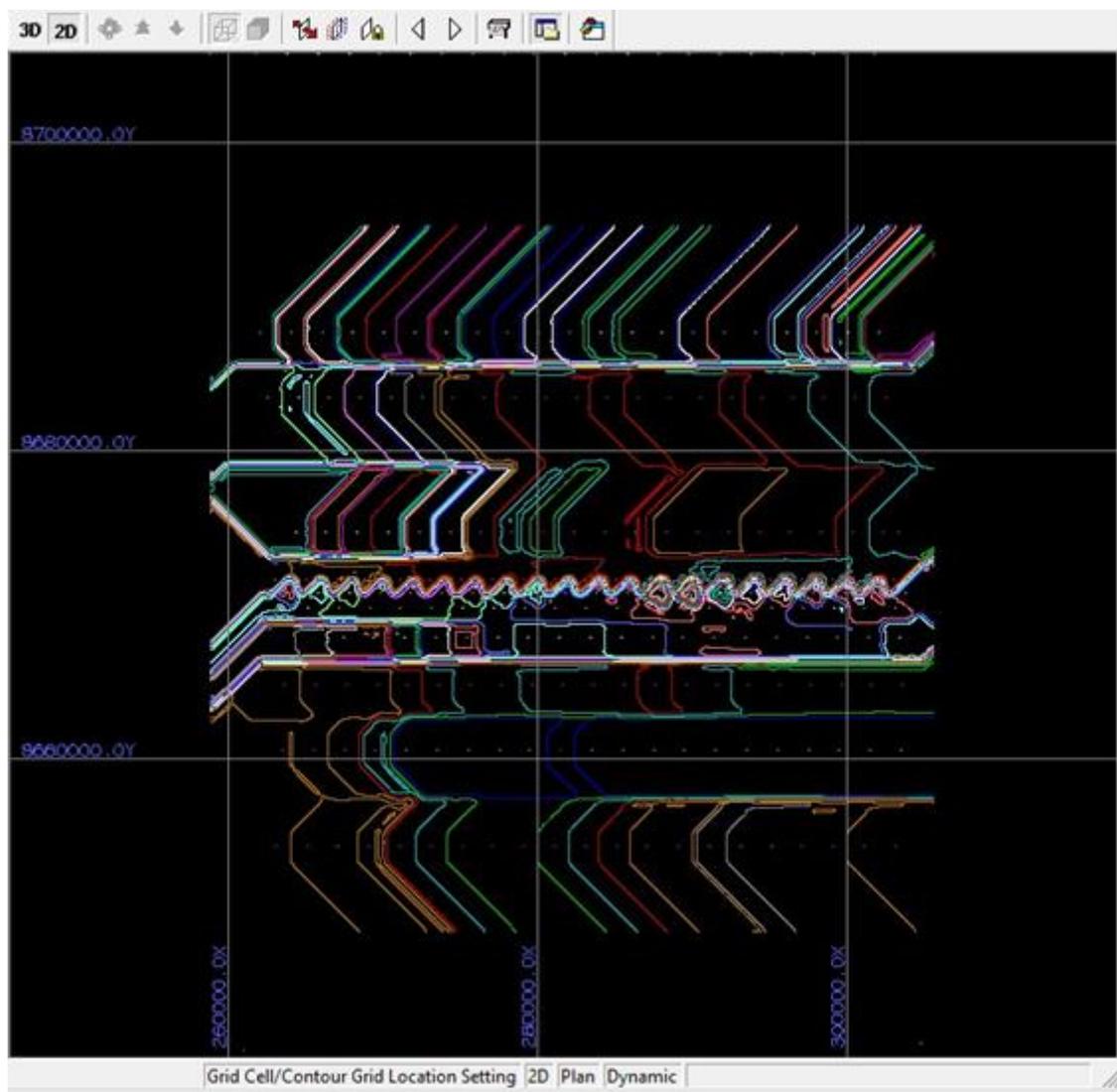
Figura 57. Curvas de isovalores de PM10.



7.6.2 Isovalores de gases

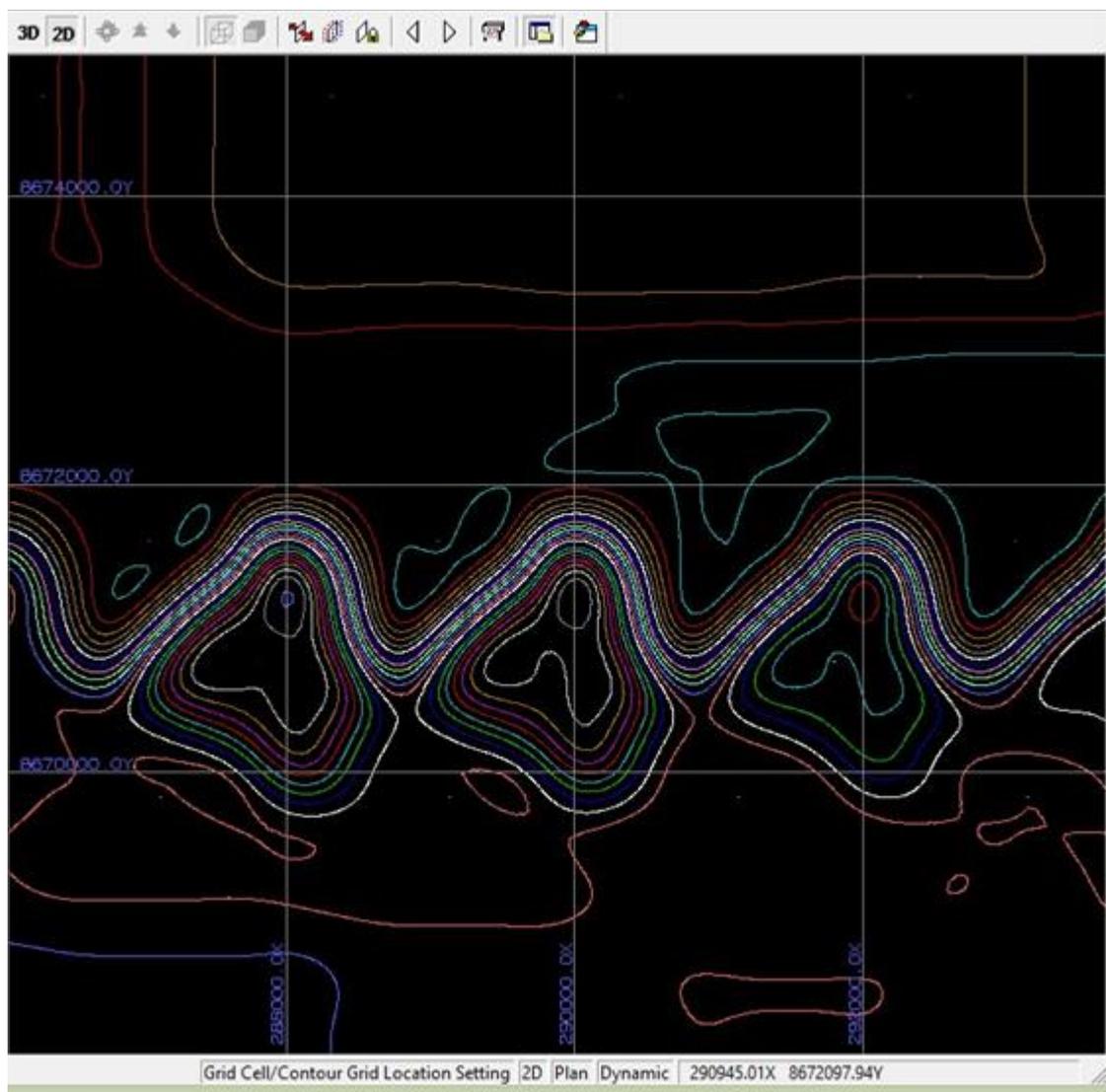
Las curvas para los isovalores de los elementos gaseosos contaminantes del aire se muestran en la figura 65. Mostramos para el CO, desde la totalidad hasta las más ampliadas con zoom.

Figura 58. Curvas de isovalores de CO.



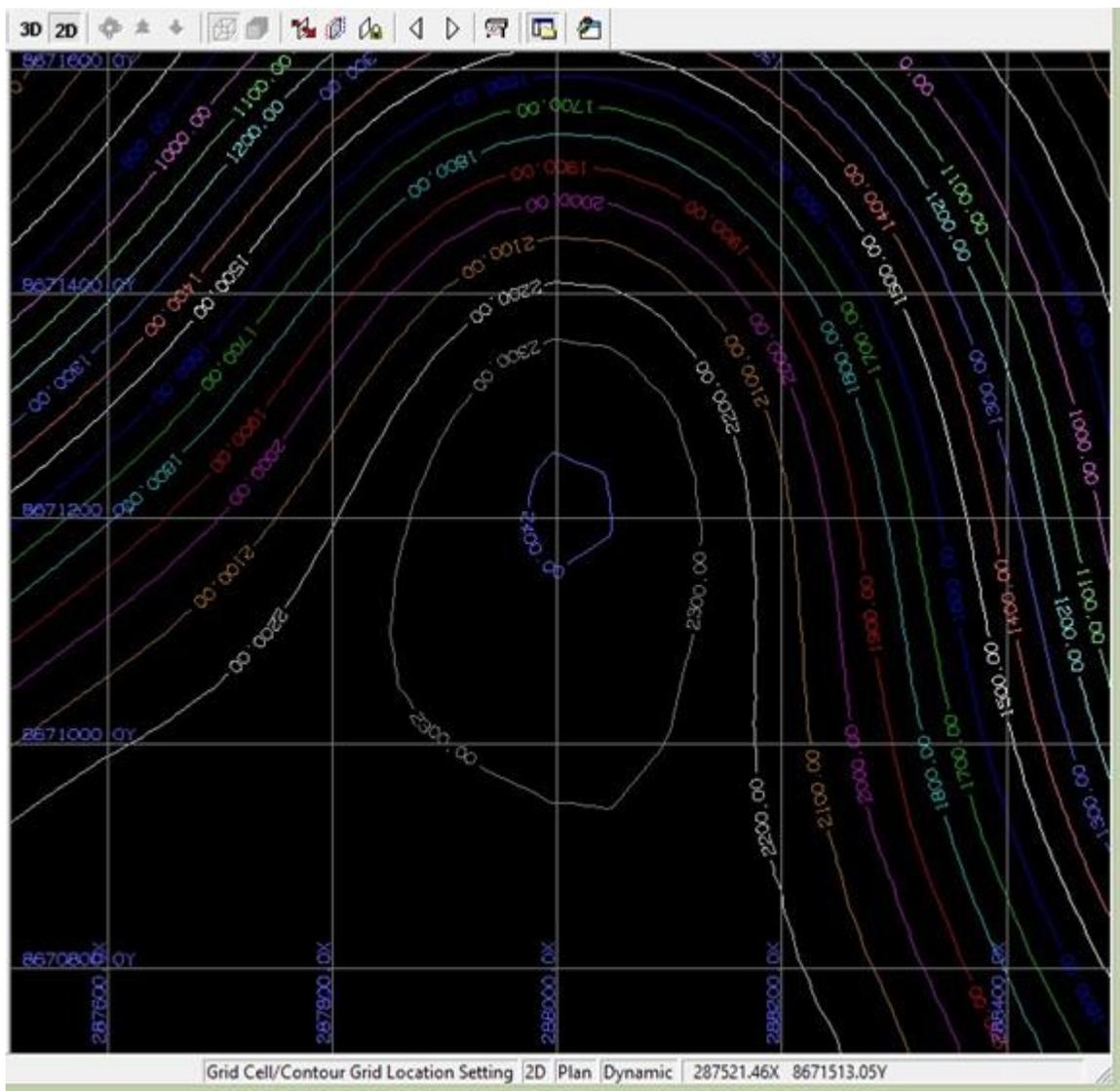
Otra vista más cercana nos muestra la figura 66, mostramos el acercamiento de una parte del mapa de isovalores mediante el ZOOM de soporte informático del modelo y visualizamos este interfaz.

Figura 59. Curvas de isovalores de CO ampliada con zoom.



Finalmente, podemos apreciar en la figura No. 67, los valores que el modelo ha obtenido mediante la interpolación de Stirling y Kriging, respectivamente.

Figura 60. Curvas de isovalores de CO a detalle.



8. Resultados

8.1 Análisis e Interpretación de resultados

8.1.1 Estadística de resultados

a. Análisis lineal

La información estadística de los datos que ingresaron para la ejecución de los dos algoritmos se presenta en los cuadros siguientes, donde mostramos, los histogramas de distribución normal y log-normal del análisis lineal y asimismo los reportes del análisis multivariable. Solamente presentamos en esta parte del presente documento los análisis de algunos elementos contaminantes, la presentación del análisis para el resto de los elementos se encuentra en el anexo. Los siguientes gráficos, muestran para la partícula en suspensión $PM_{2.5}$.

Figura 61. Histograma de distribución normal para $PM_{2.5}$.

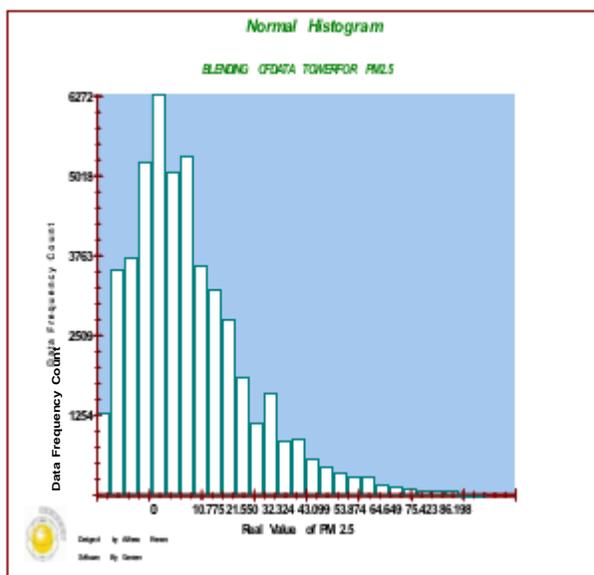


Figura 62. Histograma de log-normal para PM_{2.5}.

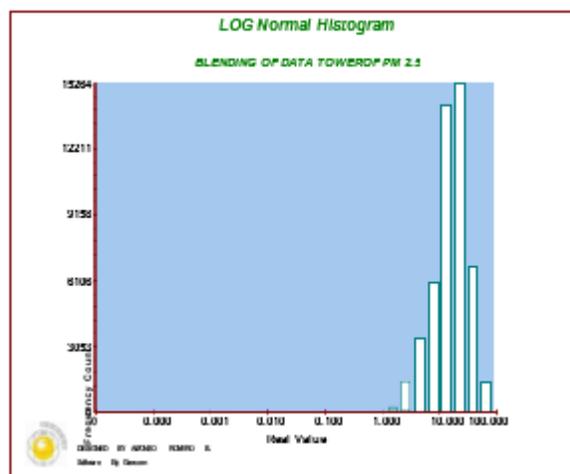
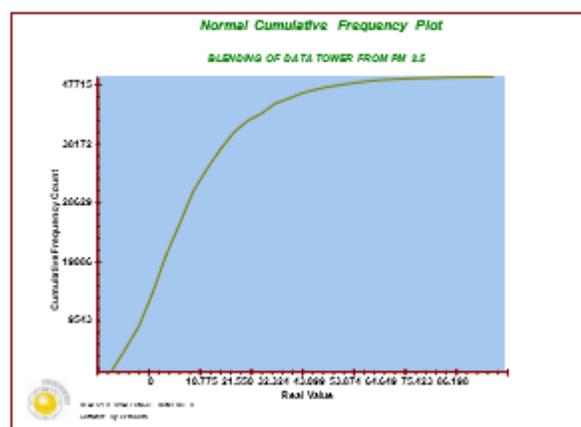


Figura 63. Frecuencia acumulada para PM_{2.5}.



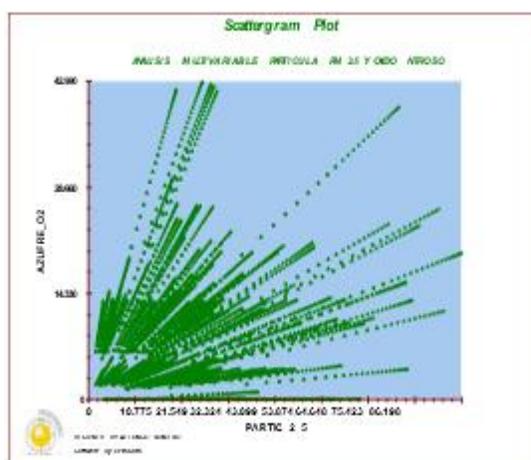
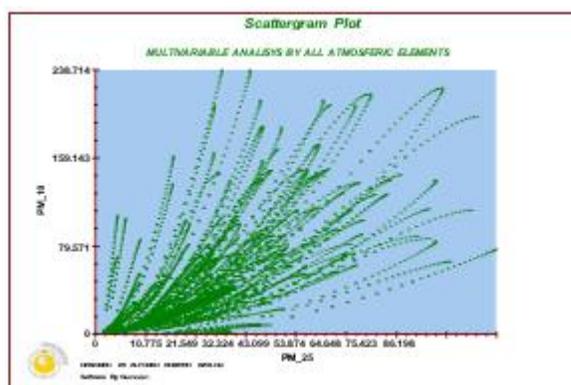
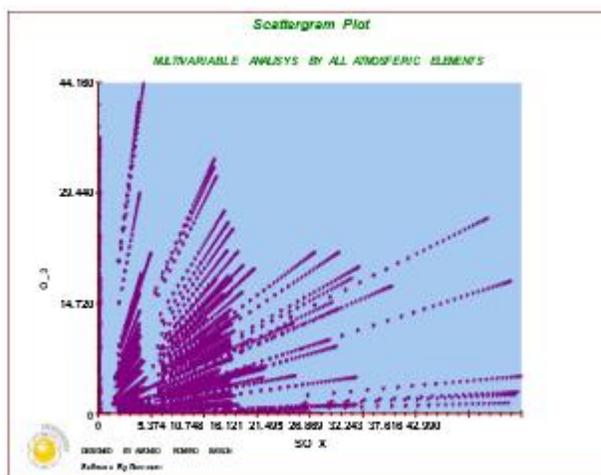
b. Análisis lineal**Figura 64. Interrelación multivariada para $PM_{2.5}$ y SO_2 .****Figura 65. Interrelación multivariada para $PM_{2.5}$ y PM_{10} .**

Figura 66. Interrelación multivariada para O_3 y SO_2 .



8.2 Geoestadística de resultados

Los diversos resultados del análisis geoestadístico del modelo, presentamos en las siguientes Figuras.

Figura 67. Semi variogramapara $PM_{2.5}$.

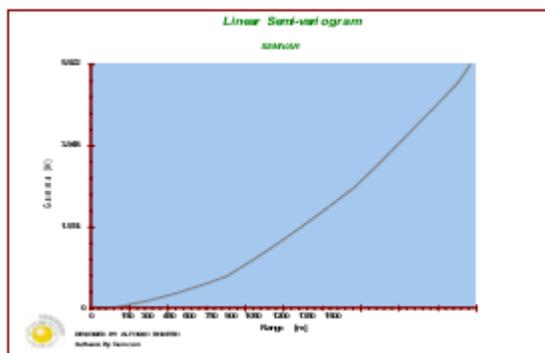


Figura 68. Semi variograma para O₃.

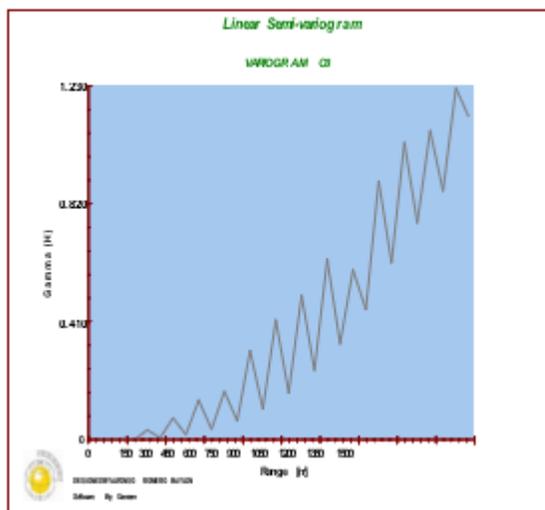
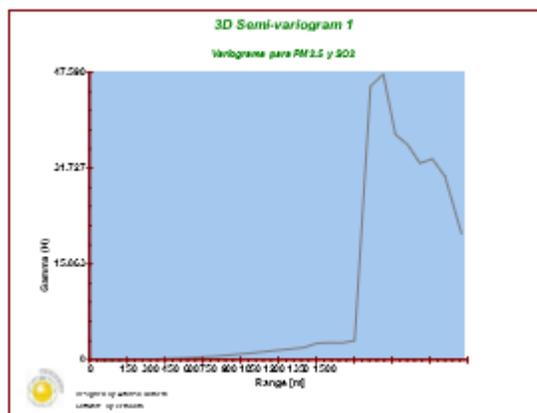


Figura 69. Semi variograma espacial para PM_{2.5} y SO₂.



8.3 Interpretación de resultados para PM₁₀

a. Instrumentos de interpretación

La evolución de los estándares o índices de calidad del aire – ICA, oficializada por el Minam en el 2008, fue adaptado de los estándares de calidad de la EPA, tal como se muestran los valores en la tabla. 13.

Desde el año 2000 estos valores se venían utilizando en la calificación del estado del aire y los rangos establecidos en el ICA, estaban muy elevados.

Tabla 13. Colores y rango de valores establecidos por ICA - Minam.

| Índice de Calidad del Aire - ICA | PM ₁₀ (µg /m ³) | SO (µg /m ³) | NO ₂ (µg /m ³) | O ₃ (µg /m ³) |
|----------------------------------|---|-----------------------------|--|---|
| | 24 Horas | 24 Horas | 01 Horas | 08 Horas |
| 0 - 50 | 0 - 50 | 0 - 20 | >0 - 40 | >0 - 60 |
| >50 - 100 | >50 - 150 | >20 - 80 | >40 - 200 | >60 - 120 |
| >100 - 200 | >150 - 250 | >80 - 500 | > 200 | > 120 |
| >200 - 300 | >250 - 420 | >500 - 2500 | | |
| > 300 | > 420 | > 2500 | | |

Minam (2008).

Asimismo, tenemos también el estado de la calidad del aire y el rango del índice establecido. La siguiente tabla, muestra estos índices y el estado del aire para ICA.

Tabla 14. Estado, rango y color de calidad de aire.

| Estado de Calidad del Aire | Rangos del ICA |
|----------------------------|----------------|
| Bueno | 0 - 50 |
| Moderado | >50 - 100 |
| Malo | >100 - 200 |
| Muy malo | >200 - 300 |
| Alerta máxima | >300 - 500 |

Minam (2008).

El indicador INCA.

Para obtener este Índice Nacional de Calidad de Aire – INCA, oficializada para por el Minam en el 2015, los valores que a continuación mostramos son las que se consideran a partir de dicho año. El INCA, es cuasi similar al ICA, pero con algunas diferencias, tal como mostramos en la tabla No. 15.

Tabla 15. Índice INCA para partículas en suspensión.

| Rangos INCA PM10 | PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Rangos INCA PM 2.5 | PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--|
| | 24 Horas | | 01 Horas |
| 0 - 50 | 0 - 75 | 0 - 50 | 0 - 12.5 |
| >51 - 100 | >76 - 150 | >51 - 100 | >12.6 - 25 |
| >101 - 167 | >151 - 250 | >101 - 500 | >25.1 - 125 |
| > 300 | > 250 | > 500 | > 125 |

Minam (2008).

Tabla 16. Índice INCA para SOx y NOx.

| Rangos INCA SO2 | SO2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Rangos INCA NO2 | NO2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| | 24 Horas | | 01 Horas |
| 0 - 50 | 0 - 10 | 0 - 50 | 0 - 100 |
| >51 - 100 | >11 - 20 | >51 - 100 | >101 - 200 |
| >101 - 625 | >21 - 500 | >100 - 150 | >201 - 300 |
| > 625 | > 500 | > 150 | > 300 |

Minam (2015).

A diferencia de ICA, el INCA considera como estado de la calidad del aire, como una categoría de calidad del aire, considerando solo cuatro categorías llamado también nivel de calidad del aire asignando, con los colores que indicamos en la tabla 17, a cada categoría.

Tabla 17. Categorías del estado del aire según color y rango INCA.

| Categoría del Nivel de Calidad del Aire | Índice de Calidad del Aire – INCA (Valores adimensionales) | | | |
|---|---|-----------------------|----------------------|----------------------|
| | PARA PM _{2.5} | PARA PM ₁₀ | PARA SO ₂ | PARA NO ₂ |
| Buena | 0 - 50 | 0 - 50 | 0 - 50 | 0 - 50 |
| Moderada | >51 - 100 | >51 - 100 | >51 - 100 | >51 - 100 |
| Mala | >101 - 500 | >101 - 167 | >101 - 625 | >100 - 150 |
| Umbral de cuidado | > 500 | > 300 | > 625 | > 150 |

Minam (2015).

Las concentraciones de cada elemento contaminante que define por su concentración en el aire mostramos en la tabla No. 18. Estos rangos son independientes del rango de INCA.

Tabla 18. Rango del valor de concentración en µg /m³, por cada elemento contaminante.

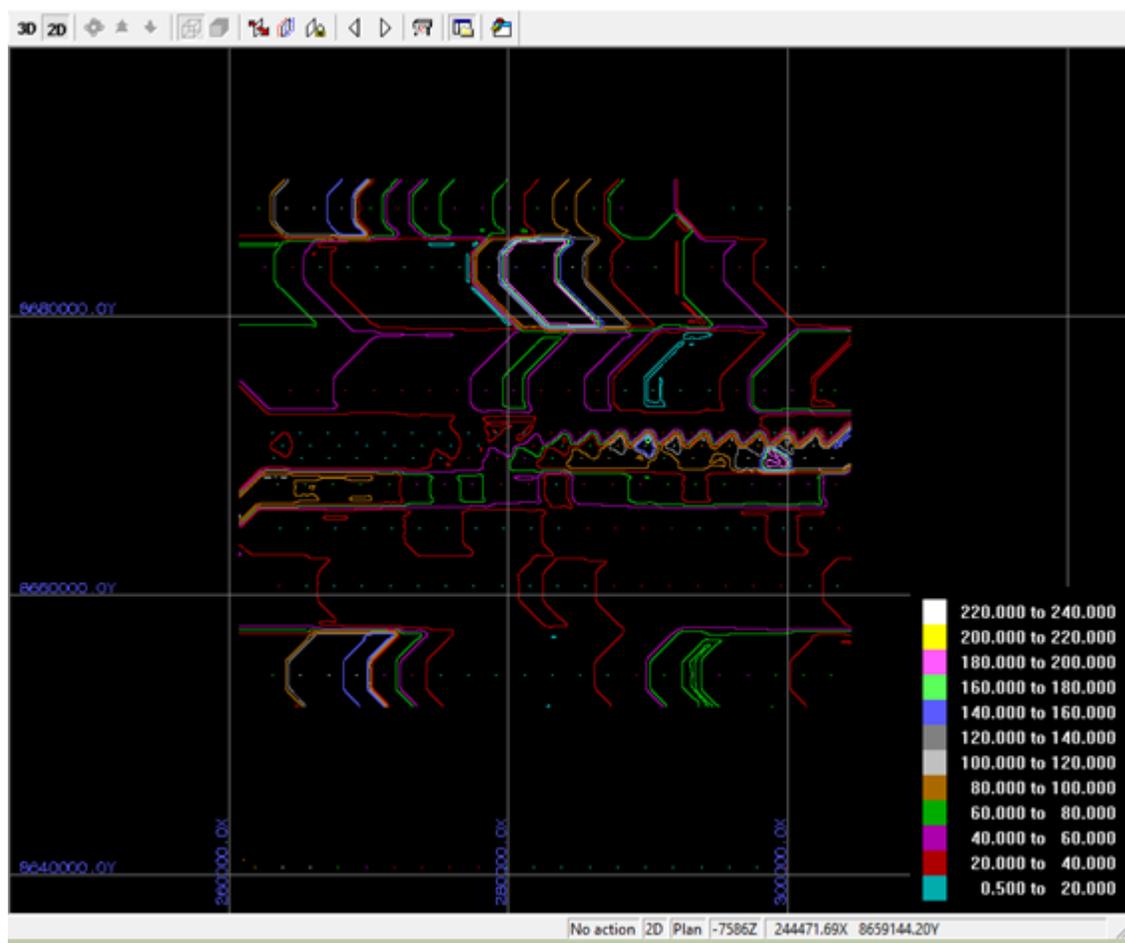
| Estado del Aire | Rango del valor de medición del contaminante en µg /m ³ | | | |
|--------------------|--|------------------|-----------------|-----------------|
| | PM _{2.5} | PM ₁₀ | SO ₂ | NO ₂ |
| Según corresponde. | 0 - 12.5 | 0 - 75 | 0 - 10 | 0 - 100 |
| Según corresponde. | >12.6 - 25 | >76 - 150 | >11 - 20 | >101 - 200 |
| Según corresponde. | >25.1 - 125 | >151 - 250 | >21 - 500 | >201 - 300 |
| Según corresponde. | > 125 | > 250 | > 500 | > 300 |

Para ver la independencia de los rangos de valores de concentración por cada contaminante, con el rango del INCA, nos indica que, si la medición promedio de PM 10 es de 70 $\mu\text{g} / \text{m}^3$, este pertenece al rango de valor de concentración entre 0 a 75, lo que significa que pertenece al rango de 0 a 50 del INCA, y la categoría del aire es buena el mismo que se representa por el color verde, como observamos el rango INCA es menor que el rango valor de concentración de componente atmosférico, en este caso PM_{10} .

b. Resultados de concentración de PM 10, del modelo MDLE.

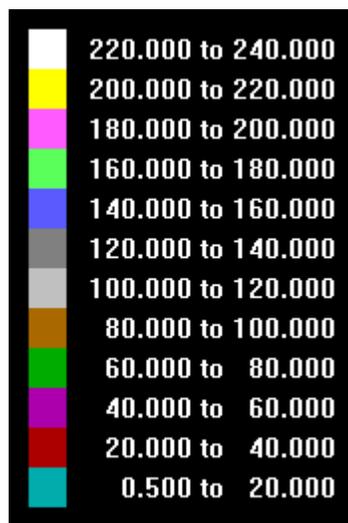
En la figura 70, es la información que entrega el modelo MDLE, en la parte de la leyenda se muestran los rangos de las concentraciones en $\mu\text{g} / \text{m}^3$, para PM 10, en una vista de planta incluyendo las coordenadas UTM de ubicación real.

Figura 70. Isovalores de PM₁₀ en lima metropolitana.

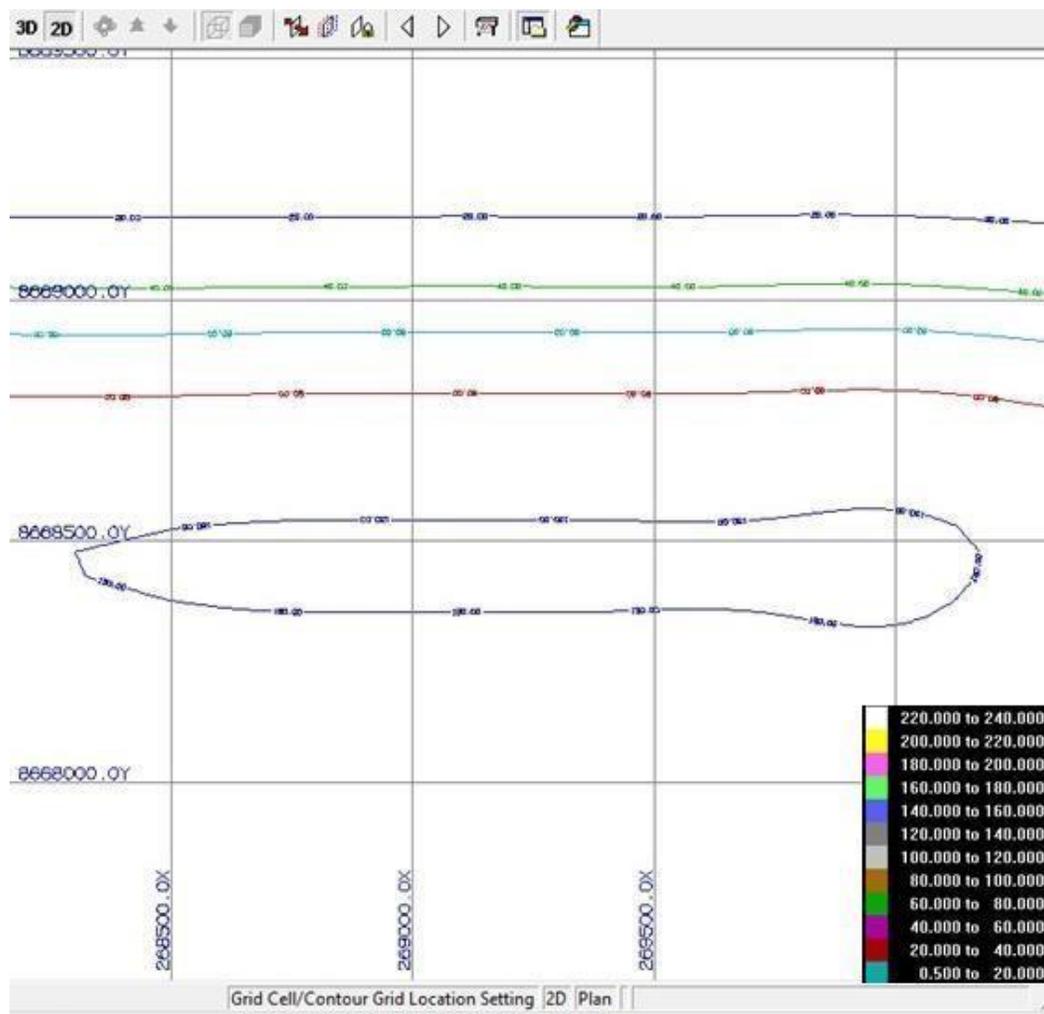


Los isovalores que se muestran como resultado del modelo MDLE, son calculados a una altitud de 5000 m s.n.m., en la leyenda muestra la variación de los valores de las concentraciones de las partículas PM₁₀, esto indica que, el comportamiento de este elemento contaminante se dispersa siguiendo las características mostradas en los isovalores de la figura 70.

Los correspondientes valores mostrados en la parte inferior derecha de la figura 71, son rangos establecidos para cada isovalor de $\mu\text{g}/\text{m}^3$, de PM₁₀ en a una altitud de 5 km de altitud en el espacio, en este caso es la zona, correspondiente a la zona espacial 2, que corresponde al rango superior a la Capa limite.

Figura 71. Variación de valores de PM₁₀.

Los isovalores están representados por líneas de valores equivalentes, en la figura 72, observamos estas líneas, y para calificar el estado del aire con el INCA, comparamos los rangos de la figura 73 con los rangos de Inca y PM₁₀. Una vista con mayor “zoom” del interfaz anterior se visualizan las dimensiones de los isovalores.

Figura 72. Isovalores de PM₁₀ en µg /m³.

La línea de color rojo nos muestra el valor 20 µg /m³ de concentración de partículas PM₁₀, esto significa que según la tabla 19 y 20 un estado de calidad de aire “Bueno”.

Tabla 19. Rango de valores de PM₁₀ y otros elementos.

| Estado del Aire | Rango del valor de medición del contaminante en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | | | |
|--------------------|--|------------|-----------------|-----------------|
| | PM 2.5 | PM 10 | SO ₂ | NO ₂ |
| Según corresponde. | 0 - 12.5 | 0 - 75 | 0 - 10 | 0 - 100 |
| Según corresponde. | >12.6 - 25 | >76 - 150 | >11 - 20 | >101 - 200 |
| Según corresponde. | >25.1 - 125 | >151 - 250 | >21 - 500 | >201 - 300 |
| Según corresponde. | ➤ 125 | ➤ 250 | ➤ 500 | ➤ 300 |

Corresponde al rango de valor de medición de 0 a 75, y al comparar con el rango de INCA según la tabla siguiente.

Tabla 20. Rango de valores INCA.

| Categoría del Nivel de Calidad del Aire | Índice de Calidad del Aire – INCA (Valores adimensionales) | | | |
|---|--|------------|----------------------|----------------------|
| | PARA PM 2.5 | PARA PM 10 | PARA SO ₂ | PARA NO ₂ |
| Buena | 0 - 50 | 0 - 50 | 0 - 50 | 0 - 50 |
| Moderada | >51 - 100 | >51 - 100 | >51 - 100 | >51 - 100 |
| Mala | >101 - 500 | >101 - 167 | >101 - 625 | >100 - 150 |
| Umbral de cuidado | ➤ 500 | ➤ 300 | ➤ 625 | ➤ 150 |

Interpretación final, para el caso de PM₁₀, con el análisis realizado, mostramos que el rango de valor PM₁₀, de 0 – 75, corresponde al rango de INCA 0 – 50, el cual pertenece indicador “buena”, referente al estado del aire en la zona interpretada, una vez más se observa que los rangos entre valores de los contaminantes atmosféricos y el INCA son independientes en sus

cifras de intervalo de rango, pero relacionales en la calificación del estado de calidad del aire. Este procedimiento de análisis e interpretación es viable de realizar también para cada elemento contaminante y en la zona topográfica que deseamos, así como en la cota o altitud de elección, la versatilidad del modelo MDLE, permite diversificar, porque entrega información de concentración de elementos contaminantes en todo el ámbito topográfico de Lima metropolitana y a la altitud o cota de cada 100 metros hasta los 10 mil metros que es la única condición de frontera rígida.

8.4 Presentación de resultados

8.4.1 Por elementos contaminantes.

PM 2.5, el valor de la medición de las partículas en suspensión muestra la figura 73, de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, aplicando los rangos de valores y la tabla INCA, se tiene los componentes del aire en esta parte del modelo que se muestra al desplegar la tabla 21.

Figura 73. Isovalor de valor calculado por algoritmos.

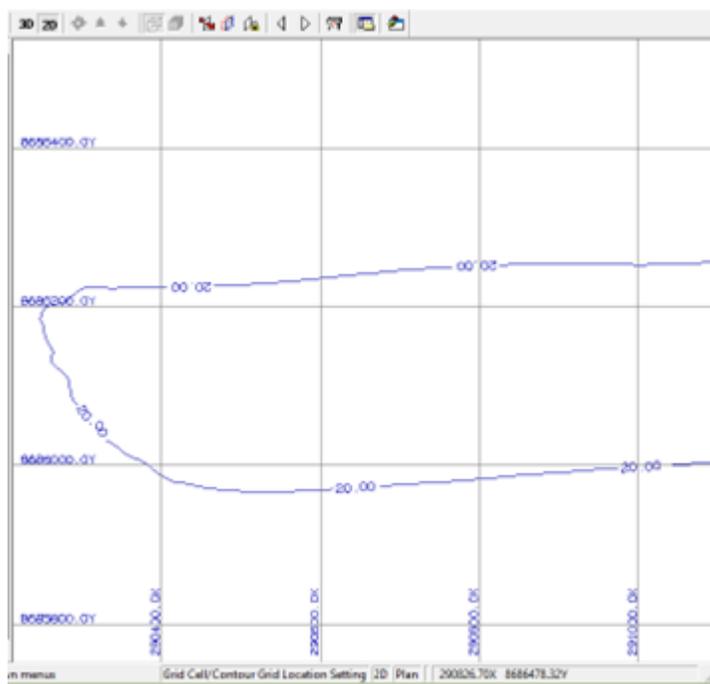


Tabla 21. Identificación del estado del aire con valor obtenido del modelo para PM 2.5.

| Valor obtenido por el modelo para partículas PM 2.5 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Categoría del estado del aire por presencia de PM 2.5 | | | |
|---|--|---|------------------------------|-------------------------------------|
| | Rango de valor medido PM 2.5 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Rango adimensional INCA para valor obtenido | Categoría de calidad de aire | Color de estado del aire según INCA |
| 20 | 12.6 - 25 | 0 - 50 | Buena | Verde |
| Estado del aire por correlación de rangos | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

PM10, el valor de la medición de las partículas en suspensión muestra la figura 75, de 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, aplicando los rangos de valores e indicador INCA, se tiene que el estado del aire, en esta parte del modelo y, se muestra en la tabla 22.

Figura 74. Isovalor de valor obtenido con modelo para PM10.

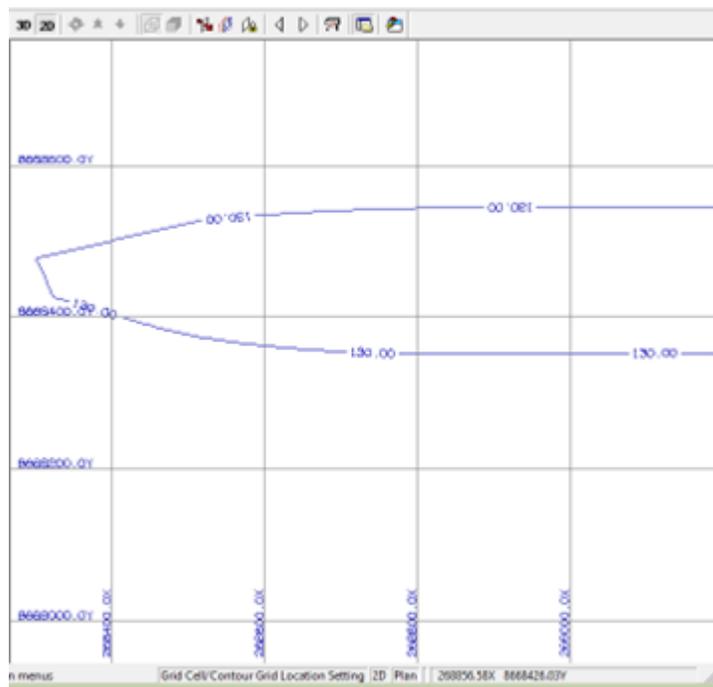


Tabla 22. Identificación de estado del aire con valor obtenido de modelo para PM10.

| Valor obtenido por el modelo para partículas PM10 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Estado calidad de aire por presencia de PM10 | | | |
|---|--|---|------------------------------|-------------------------------------|
| | Rango de valor medido PM10 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Rango adimensional INCA para valor obtenido | Categoría de calidad de aire | Color de estado del aire según INCA |
| 130 | 76 - 150 | >101 - 167 | Mala | Naranja |
| Estado del aire por correlación de rangos | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

SO_x, el valor del óxido de azufre se muestra en la figura 75 de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, aplicando los rangos de valores e indicador INCA, se tiene que el estado del aire en esta parte del modelo mostrado en la tabla 23.

Figura 75. Isovalor obtenido para SOx.

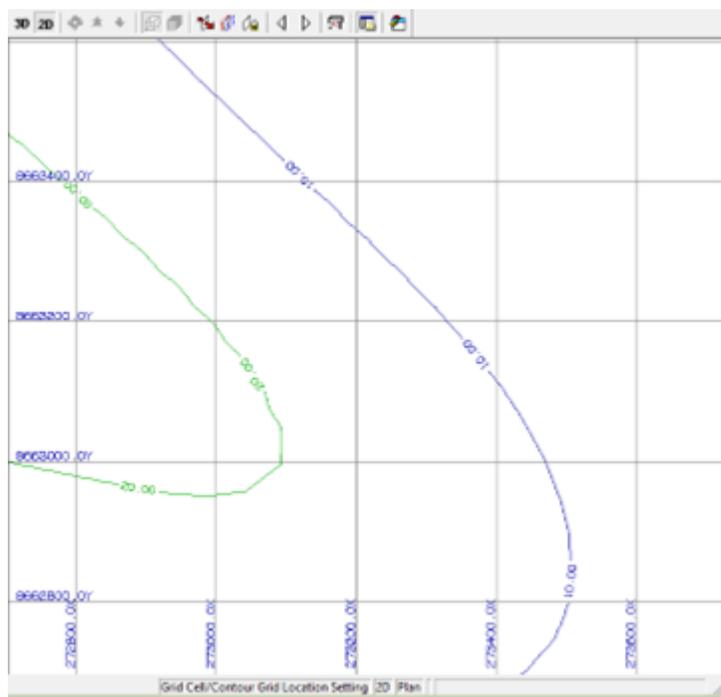


Tabla 23. Identificación de estado del aire con valor obtenido para SOx.

| Valor obtenido por el modelo para SOx en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Estado calidad de aire por presencia de SOx | | | |
|---|---|---|------------------------------|-------------------------------------|
| | Rango de valor medido SOx en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Rango adimensional INCA para valor obtenido | Categoría de calidad de aire | Color de estado del aire según INCA |
| 10 | 0 - 10 | 0 - 50 | Buena | Verde |
| <i>Estado del aire por correlación de rangos</i> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

NOx, el valor del óxido de nitrógeno se muestra en la figura 76, de $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, aplicando los rangos de valores e indicador INCA, se tiene que el estado del aire en esta parte del modelo, mostrado en la tabla 24.

Figura 76. Isovalor obtenido para NOx.

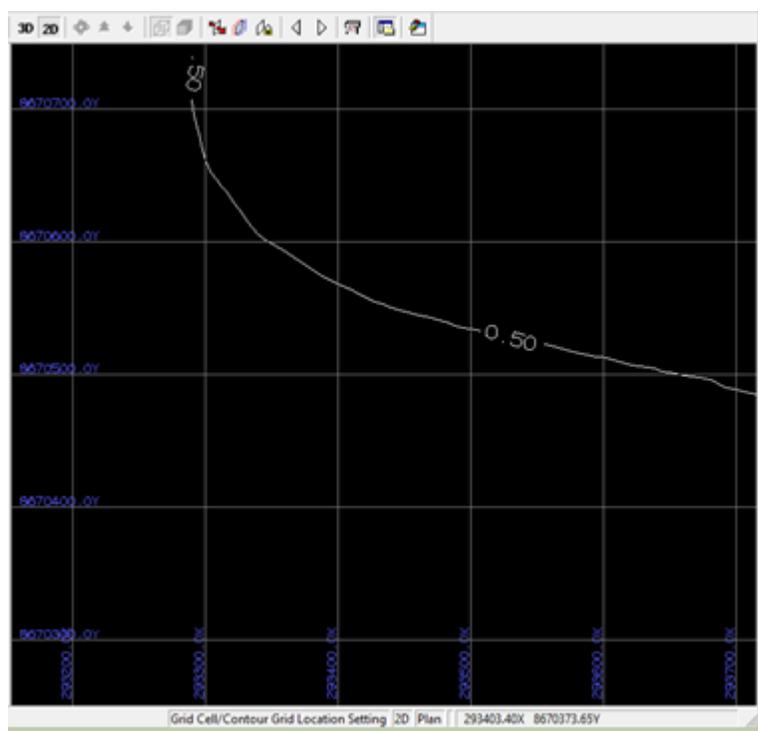


Tabla 24. Identificación de estado del aire con valor obtenido para NOx.

| Valor obtenido por el modelo para NOx en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Estado calidad de aire por presencia de NOx | | | |
|---|---|---|------------------------------|-------------------------------------|
| | Rango de valor medido NOx en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Rango adimensional INCA para valor obtenido | Categoría de calidad de aire | Color de estado del aire según INCA |
| 0.5 | 0 - 10 | 0 - 100 | Buena | Verde |
| Estado del aire por correlación de rangos | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

O₃, el valor del ozono se muestra en la figura 77, de 30 µg /m³, aplicando los rangos de valores e indicador INCA, se tiene, el estado del aire con el modelo, mostrado en la tabla 25.

Figura 77. Isovalor obtenido para O₃

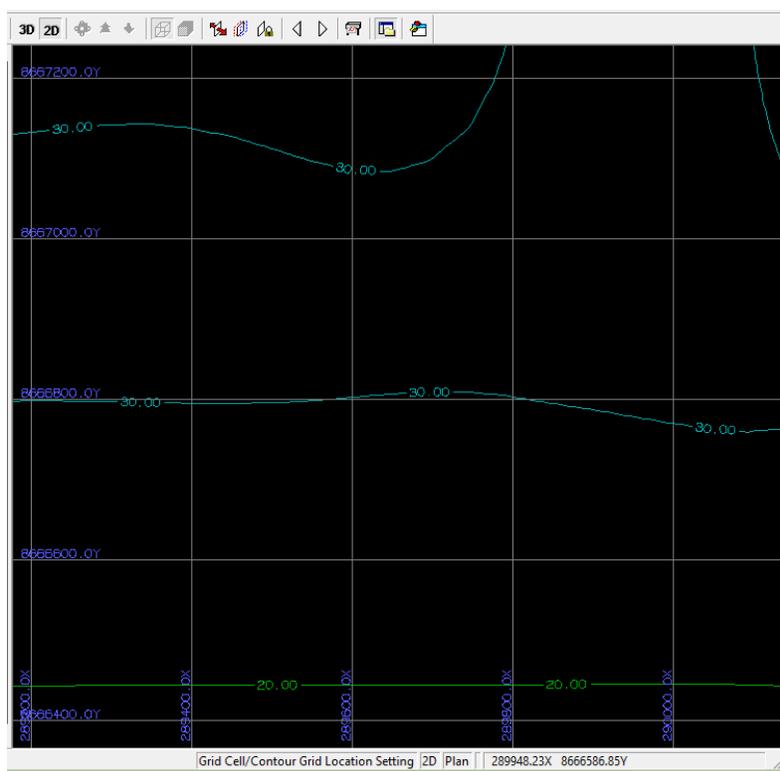


Tabla 25. Identificación de estado del aire con valor obtenido para O₃.

| Valor obtenido por el modelo para O ₃ en µg /m ³ | Estado calidad de aire por presencia de O ₃ | | | |
|--|--|---|------------------------------|-------------------------------------|
| | Rango de valor medido O ₃ en µg /m ³ | Rango adimensional INCA para valor obtenido | Categoría de calidad de aire | Color de estado del aire según INCA |
| 30 | 0 - 50 | 0 - 60 | Buena | Verde |
| Estado del aire por correlación de rangos | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

CO, el valor del óxido de carbono se muestra en la tabla 26, para $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, aplicando los rangos de valores e indicador INCA, se tiene que el aire en esta parte, el modelo muestra en la figura 78.

Figura 78. Isovalor obtenido para CO.

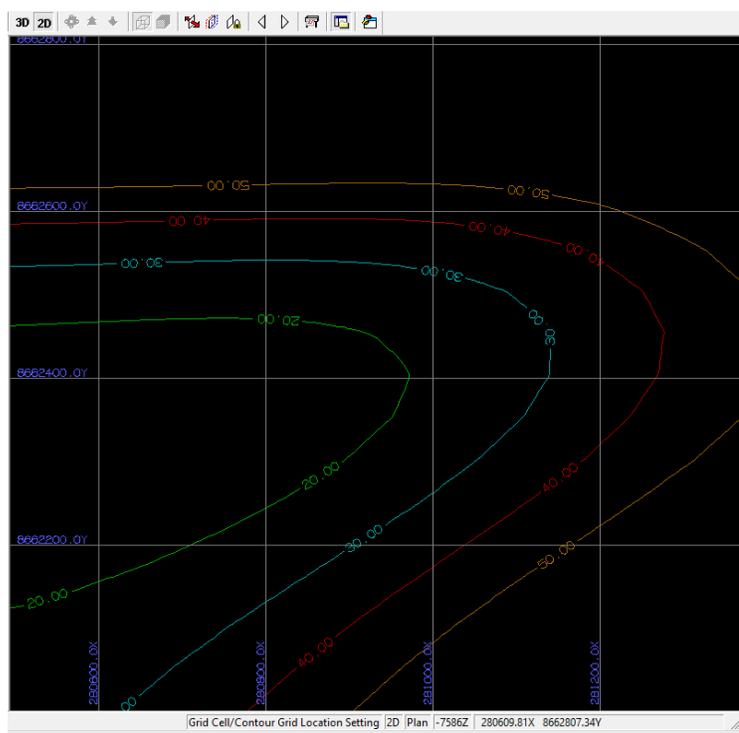


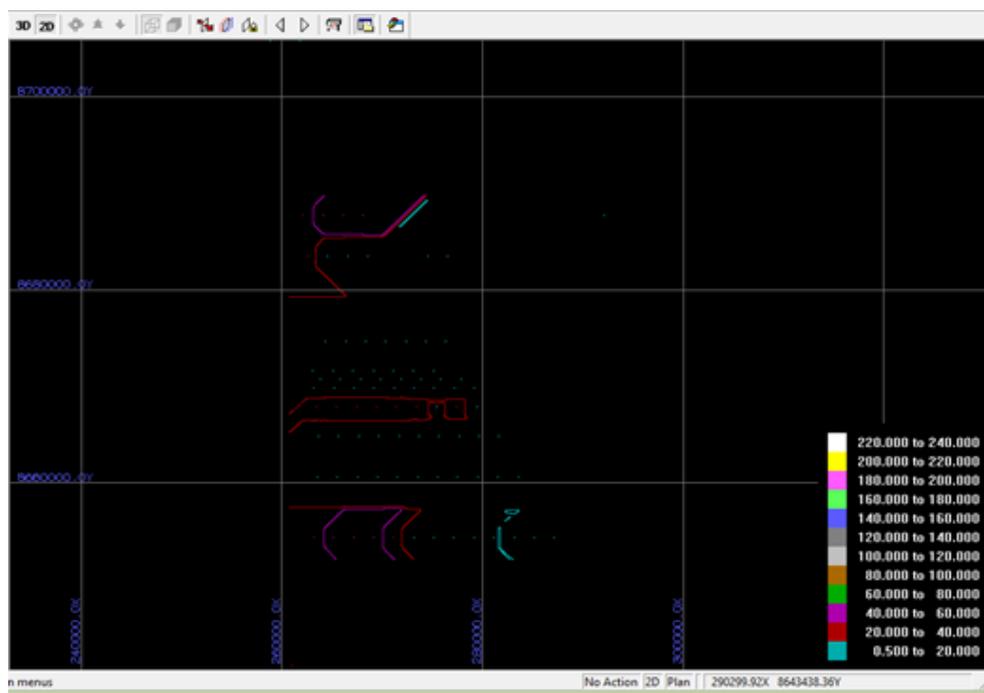
Tabla 26. Identificación de estado del aire con valor obtenido para CO.

| Valor obtenido por el modelo para CO en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Estado calidad de aire por presencia de CO | | | |
|--|--|---|------------------------------|-------------------------------------|
| | Rango de valor medido CO en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Rango adimensional INCA para valor obtenido | Categoría de calidad de aire | Color de estado del aire según INCA |
| 50 | 0 - 500 | 0 - 1000 | Moderada | Verde |
| Estado del aire por correlación de rangos | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

8.4.2 Por zona espacial atmosférica en m s.n.m.

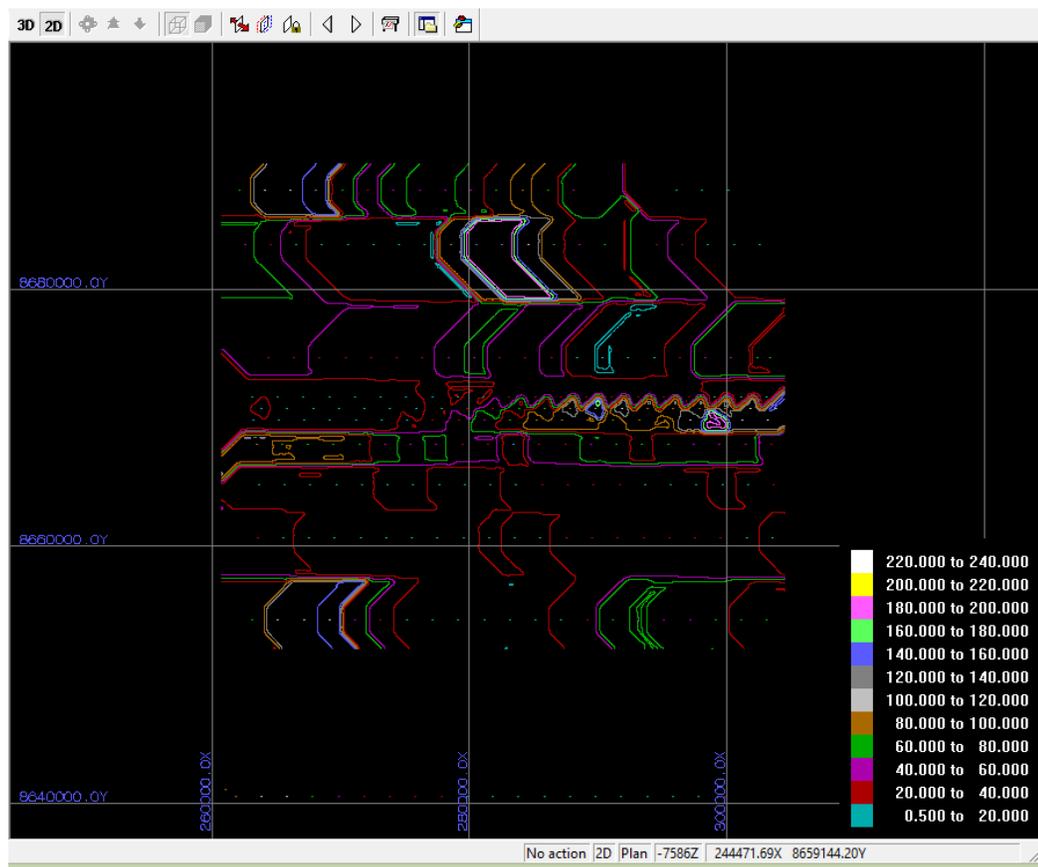
PM10 a nivel del mar, las mediciones de los contaminantes se realizan a 10 metros de altitud, pero el modelo considera los intervalos de medida cada 100 metros y elegimos la vista de planta a la altitud de 40 metros donde los valores en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ se observan en la figura 80, en forma de isovalores de Lima y la figura 79, muestra estas mismas concentraciones a 9000 metros de altitud.

Figura 79. Isovalor obtenido para CO.



La información del modelo muestra en la figura 81, la concentración del PM10 en la zona este no se aprecian debido a la presencia topográfica entrando al este, el plano de planta corta al relieve topográfico.

Figura 80. Isovalores obtenido para PM10 a 9000 msnm.



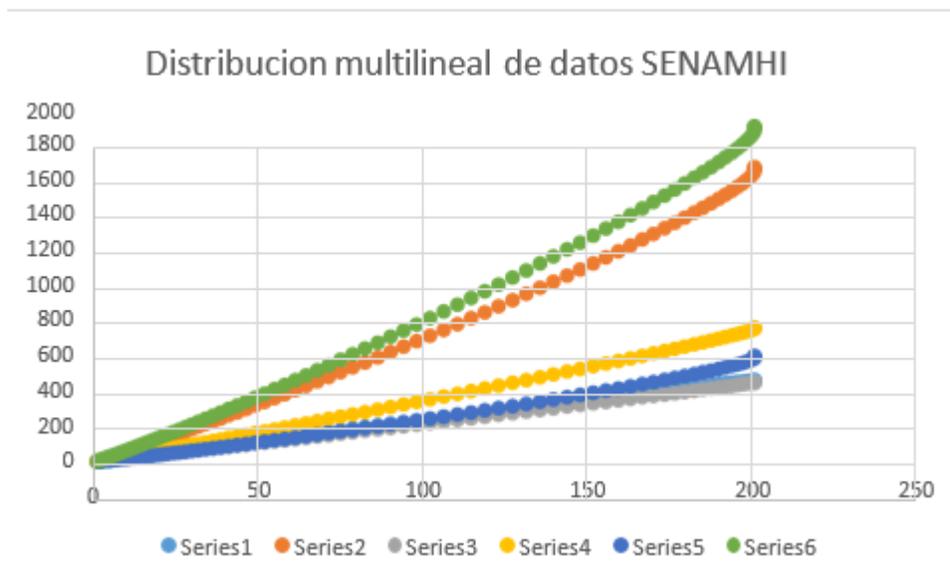
La figura 81, muestra los isovalores en toda el área del modelo, a una altitud de 9Km, a esta altitud, la distribución en el espacio 3D de las concentraciones tienen un comportamiento tal como se observa.

8.5 Validación del modelo MDLE

8.5.1 Validación multivariable

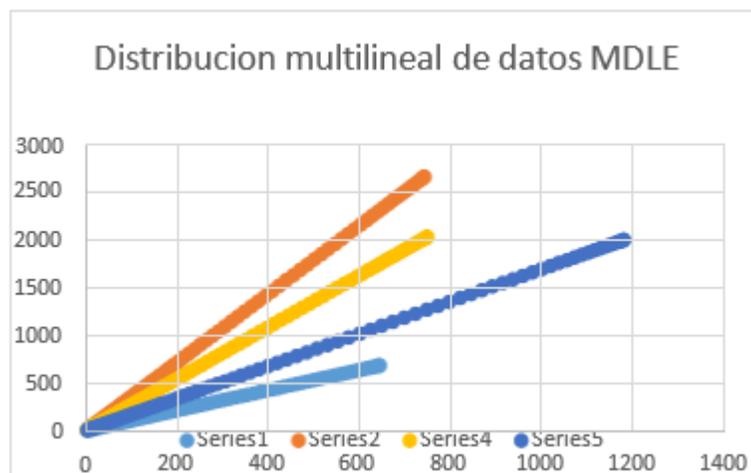
La naturaleza multivariable del modelo MDLE, implica ver el comportamiento de las concentraciones por elemento contaminante en las 10 estaciones de monitoreo de SENAMHI y los datos procesados por la interpolación de Stirling, la comparación de distribución de datos originales de las estaciones y los procesados por el algoritmo de Stirling nos muestra la tabla 27, indicando el nivel de variabilidad en su distribución espacial de los datos adquiridos, y la tabla 28, muestra dicha variabilidad de distribución espacial de los datos procesados por la interpolación con el algoritmo de Stirling en el modelo MDLE.

Tabla 27. Distribución multilínea de datos adquiridos a SENAMHI.



La similitud de las formas que se presentan de ambas gráficas muestra que tanto los datos adquiridos, así como los datos procesados por el algoritmo de Stirling para el ingreso (input) al MDLE, mantienen el mismo sesgo estadístico, esto significa que, la variabilidad entre ambos datos es mínima.

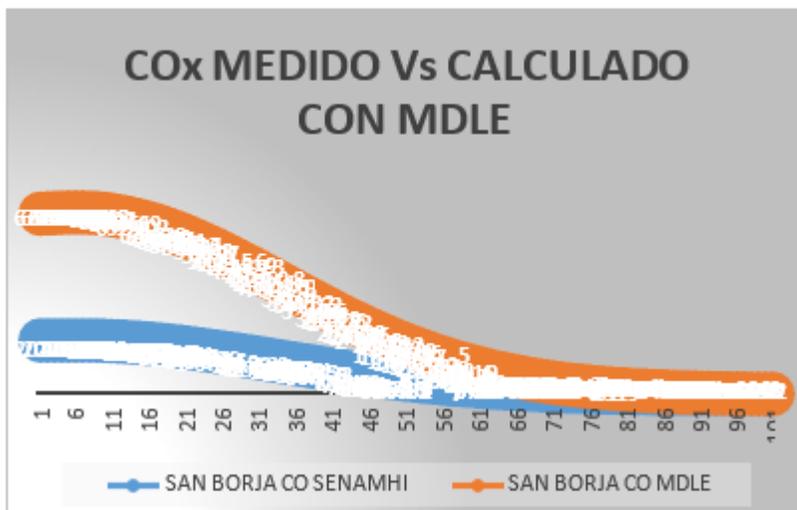
Tabla 28. Distribución multinínea de datos de Stirling.



El comportamiento de la tendencia de datos para una sola variable en este caso para el COx, medido por SENAMHI y la concentración de Cox, obtenido con el algoritmo de Stirling,

muestran en la figura 81 la misma tendencia funcional dando consistencia a la validación estadística de los datos del modelo.

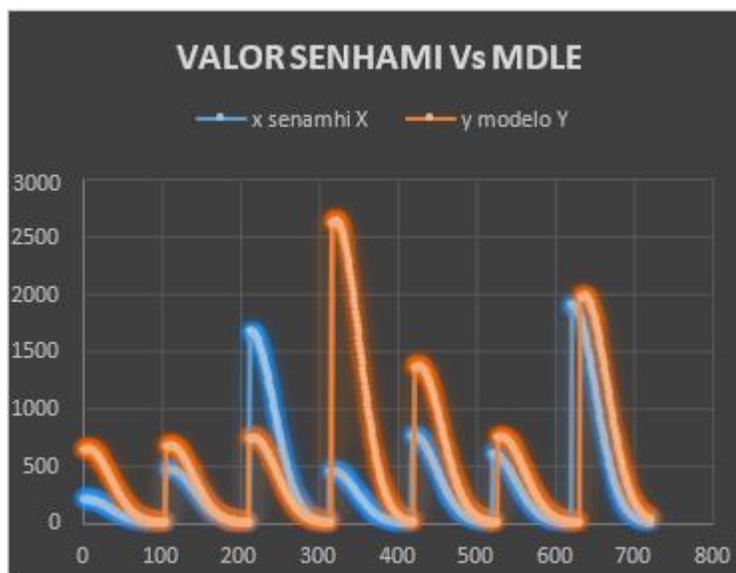
Figura 81. Tendencia unilineal de datos para el Cox.



8.5.2 Validación Geoestadística del MDLE

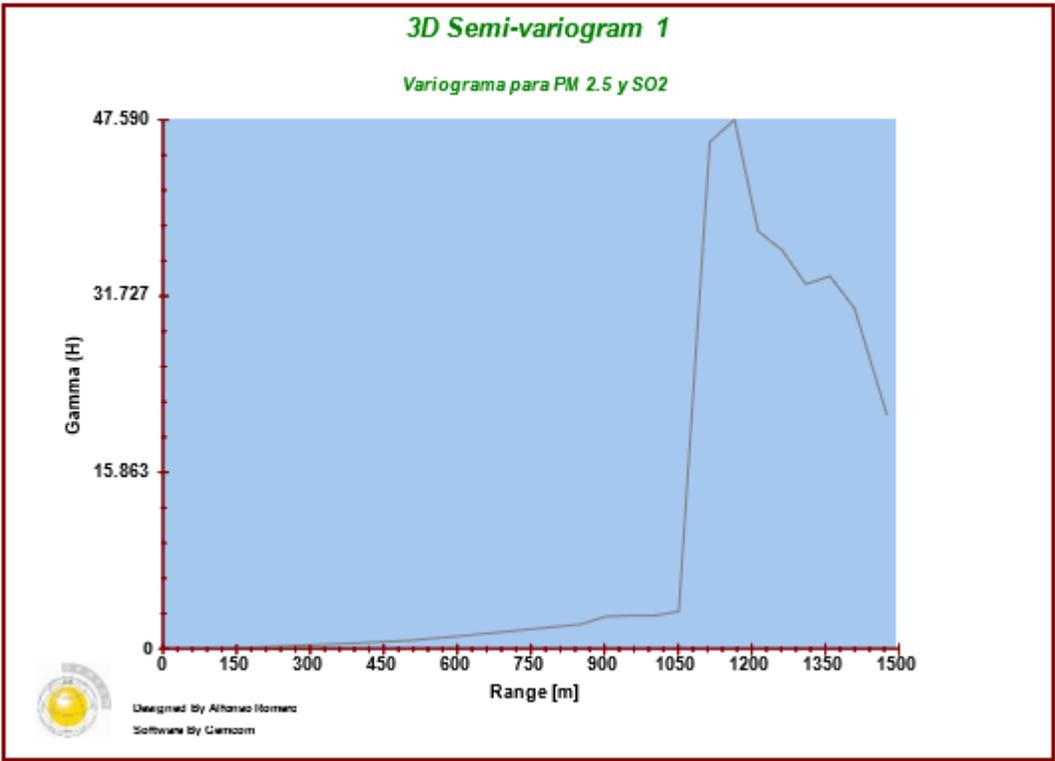
La validación del modelo MDLE, de naturaleza geoespacial en el presente documento, emplea a la función geoestadística de Semivariograma espacial o 3D, la figura 82, indica la característica de los semivariogramas en las variables del modelo por tener las variables georreferenciadas, en este caso las variables utilizadas en el modelo tienen esta caracterización principal que mostramos en el gráfico.

Figura 82. Saltos de variograma de la Geoestadística del MDLE.



El gráfico se observa el comportamiento geoespacial de los datos al aplicar el algoritmo de Stirling, y claramente la amplitud de tamaño de los datos del modelo son coincidentes con el gran volumen de datos que se genera a partir de los datos adquiridos, manteniendo el sesgo estadístico y la amplitud geoestadística coincidente con el sesgo estadístico y al ser mínimo en diferencia de sesgos entre el estadístico y el geoestadístico el nivel de error en el proceso de cálculo es menor al 5% indicando que son datos consistentes, aquellos datos que se obtienen como resultado de iterar el algoritmo de Stirling.

Figura 83. Semivariograma 3D componentes de atmosféricos PM y SO.



9. Conclusiones

El Modelo de Localización Espacial – MDLE, de los contaminantes atmosféricos obtiene valores de las concentraciones en el espacio geométrico y, precisa dichos valores a diferentes altitudes cada 500 m s.nm. hasta los 10 mil metros sobre el nivel del mar, representado en el modelo por el punto $P(x) = (x_i, y_j, z_k)$, donde z_k , se define como la longitud de la troposfera.

Los parámetros climáticos en el modelo, como variables aleatorias entre los principales son la velocidad y dirección del viento así, como, la variación de la temperatura, el primero por su orientación direccional y el otro por su relación altitud y temperatura.

En el modelo MDLE, los elementos contaminantes en relación a la presencia de los aspectos geográficos tienen la distribución de un modelo de dispersión, es decir, muy cercanos a la superficie de la tierra, y a altitudes mayores a los 10 metros, el comportamiento es similar a altitudes mayores del espacio troposférico.

La contribución de los algoritmos en el MODELO DE LOCALIZACION ESPACIAL – MDLE, se verifica en los procesos de cálculo de las cantidades por contaminantes en la atmosfera a través de la interpolación de valores medidos y adquiridos del SENAMHI, estos valores son procesados mediante el algoritmo de Stirling y el algoritmo de Kriging. El primero suaviza los cálculos a lo largo de las diez estaciones de monitoreo de SENAMHI a partir de datos tomados a 10 metros de altitud e interpolados hasta los 10 mil metros de altitud para cada estación, mientras que el algoritmo de Kriging, interpola en 3D dentro del espacio establecido por el MDLE.

10. Bibliografía

1. **GONZALES, H. (2015).** Análisis de calidad del aire. V congreso de ingeniería ambiental de Chile.
2. **MARTINEZ, ERNESTO (2004).** Contaminación atmosférica. Universidad de Castilla. ISBN 8484273245, P.13, 39
3. **MANAHAN, ESTANLEY (2007).** Introducción a la Química Ambiental, Edit. Reverte. 402 p.
4. **MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO MARINO.** (http://www.mma.es/portal/secciones/calidad_contaminacion/atmosfera/emisiones/programa_techos.htm)
5. **MENDOZA, V. (2014).** Algoritmos de modelación y predicción cuadrática. Edit. Comité de matemática Chile.
6. **RODRIGUEZ RIVAS, MANUEL (1991)** Teoría y diseño de la investigación científica, Ediciones Atusparia, Perú
7. **RODRIGUEZ RIVAS, MANUEL (2002)** La ciencia, Fondo editorial de la Universidad Inca Garcilaso de la Vega, Perú
8. **SPEEDING, JOSEPH.** Contaminación atmosférica (1981). ISBN 84-291- 7506-7. Edit. Reverte. p. 33.
9. **SANCHEZ, VICENTE (1982).** El proceso de toma de decisiones y organización de la evaluación. México.
10. **VÁSQUEZ, M.R. (1997).** Flórmula de las Reservas Biológicas de Iquitos, Perú. Allpahuayo - Mishana. Missouri Botanical Garden. 1046 p.
11. **LOZADA C, PUGA (20174).** Fórmula de interpolación de Stirling. Pucp. Lima, p. 176 — 186.
12. **JACOBSON, MARK (2002).** Atmospheric Pollution: History, Science, and Regulation. New York: Cambridge University Press.
13. **KORC, M. (2009).** Diagnóstico de las emisiones del parque automotor del área metropolitana de Lima y Callao. XXVII Congreso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental.

14. **M. ALFARO, (1996).** Estadística. Departamento de Ingeniería Matemática, U. de Chile, 1996.
15. **M. ALFARO, (2003).** Introducción al Muestreo Minero. Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2003.
16. **H. CRAMER, (1955).** Métodos Matemáticos de Estadística. Aguilar, Madrid, 1955.
17. **G. MATHERON (2005).** Curso de Geoestadística. Ecole Nationale Supérieure des Mines de París, 2005.
18. **MATHERON (2005).** La Teoría de las Variables Regionalizadas y sus Aplicaciones. ENS. De Minas de París. 2005.
19. **A. JOURNEL (1978).** Mining Geostatistics. Academic Press, 1978.
20. **J. P CHILÉS Y GEOSTATISTICS,(2000).** Modeling Spatial Uncertainty. Wiley University, 2000.

11. Anexos

ESTACION PUENTE PIEDRA

devel

Google

Esta página no puede cargar Google Maps correctamente.

[Do you own this website?](#)

development purposes only

For development purposes only

Inforación general

| | |
|---------------------|---|
| PROPIETARIO | SENAMHI |
| OPERADOR | Dirección de Redes de Observación y Datos |
| PROVINCIA | LIMA |
| DISTRITO | PUENTE PIEDRA |
| COORDENADAS | -11.86325 -77.07413 |
| RECEPCIÓN DE DATOS | En Línea |
| INICIO DE OPERACIÓN | 03/12/2014 |

Google

Fotos de Estación

VISTA PANORÁMICA



VISTA NORTE



VISTA ESTE



Parámetros meteorológicos

| Parámetro | Frecuencia | Altura de medición | Fecha primer registro | Fecha último registro | Técnica de medición | Marca | Gráficos |
|---|------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------|----------|
| Temperatura ambiente (Temperatura - °C) | Horario | 1 m. | | 20/11/2018 | Automatico | VAISALA | |
| Velocidad del viento (Vel. viento - m/s) | Horario | 1 m. | | 20/11/2018 | Automatico | VAISALA | |
| Dirección del viento (Dir. viento - °) | Horario | 1 m. | | 20/11/2018 | Automatico | VAISALA | |
| Humedad relativa del aire (Humedad relativa - %) | Horario | 1 m. | | 20/11/2018 | Automatico | VAISALA | |
| Precipitación | Horario | 1 m. | | 20/11/2018 | Automatico | VAISALA | |

Instrumentos de medición utilizados

| Parámetro contaminantes | Fecha primer registro | Fecha último registro | Metodo | Técnica | Marca |
|---|-----------------------|-----------------------|------------|--|-------------------|
| Material Particulado menor a 10 micras (PM10) | 03/12/2014 | 30/08/2019 | Automatico | Atenuacion de Rayos Beta Monitor 5014i | THERMO SCIENTIFIC |
| Material Particulado menor a 2.5 micras (PM2.5) | 03/12/2014 | 30/08/2019 | Automatico | Atenuacion de Rayos Beta Monitor 5014i | THERMO SCIENTIFIC |
| Dioxido de Azufre SO ₂ | 03/12/2014 | 30/08/2019 | Automatico | Fluorescencia UV Analizador T100 | TELEDYNE |
| Oxidos de Nitrogeno NO ₂ | 03/12/2014 | 30/08/2019 | Automatico | Quimioluminiscencia Analizador T200 | TELEDYNE |
| Monoxido de Carbono CO | 03/12/2014 | 30/08/2019 | Automatico | Infrarrojo No Dispersivo Analizador T300 | TELEDYNE |
| Ozono Troposferico O ₃ | 03/12/2014 | 30/08/2019 | Automatico | Fotometria UV Analizador T400 | TELEDYNE |

ESTACION VILLA MARIA DEL TRIUNFO



Inforación general

| | |
|---------------------|---|
| PROPIETARIO | SENAMHI |
| OPERADOR | Dirección de Redes de Observación y Datos |
| PROVINCIA | LIMA |
| DISTRITO | VILLA MARIA DEL TRIUNFO |
| COORDENADAS | -12.16639 -76.92 |
| RECEPCIÓN DE DATOS | En Línea |
| INICIO DE OPERACIÓN | |

Fotos de Estación

VISTA PANORAMICA



VISTA NORTE



VISTA ESTE



VISTA OESTE



VISTA SUR



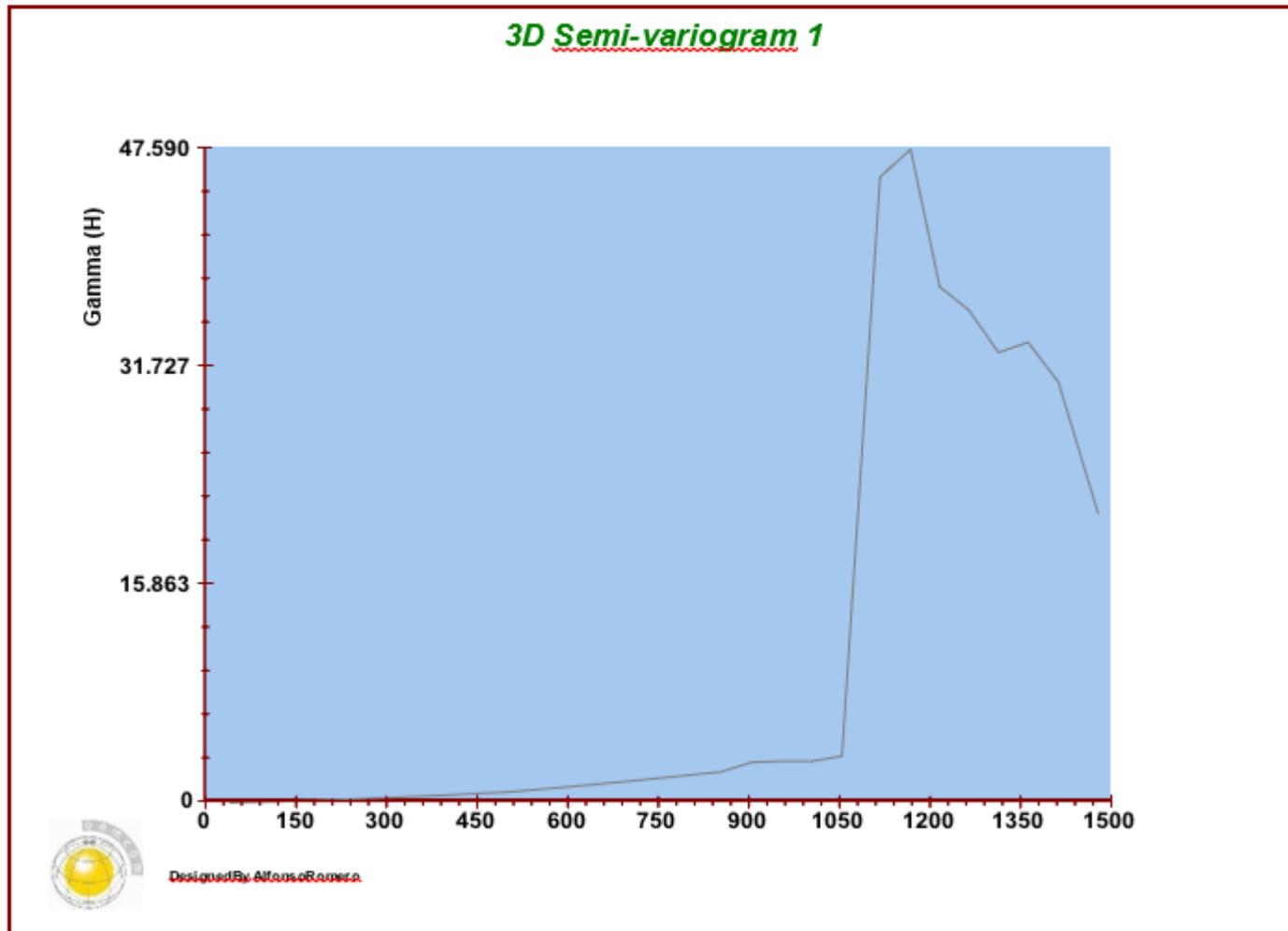
Parámetros meteorológicos

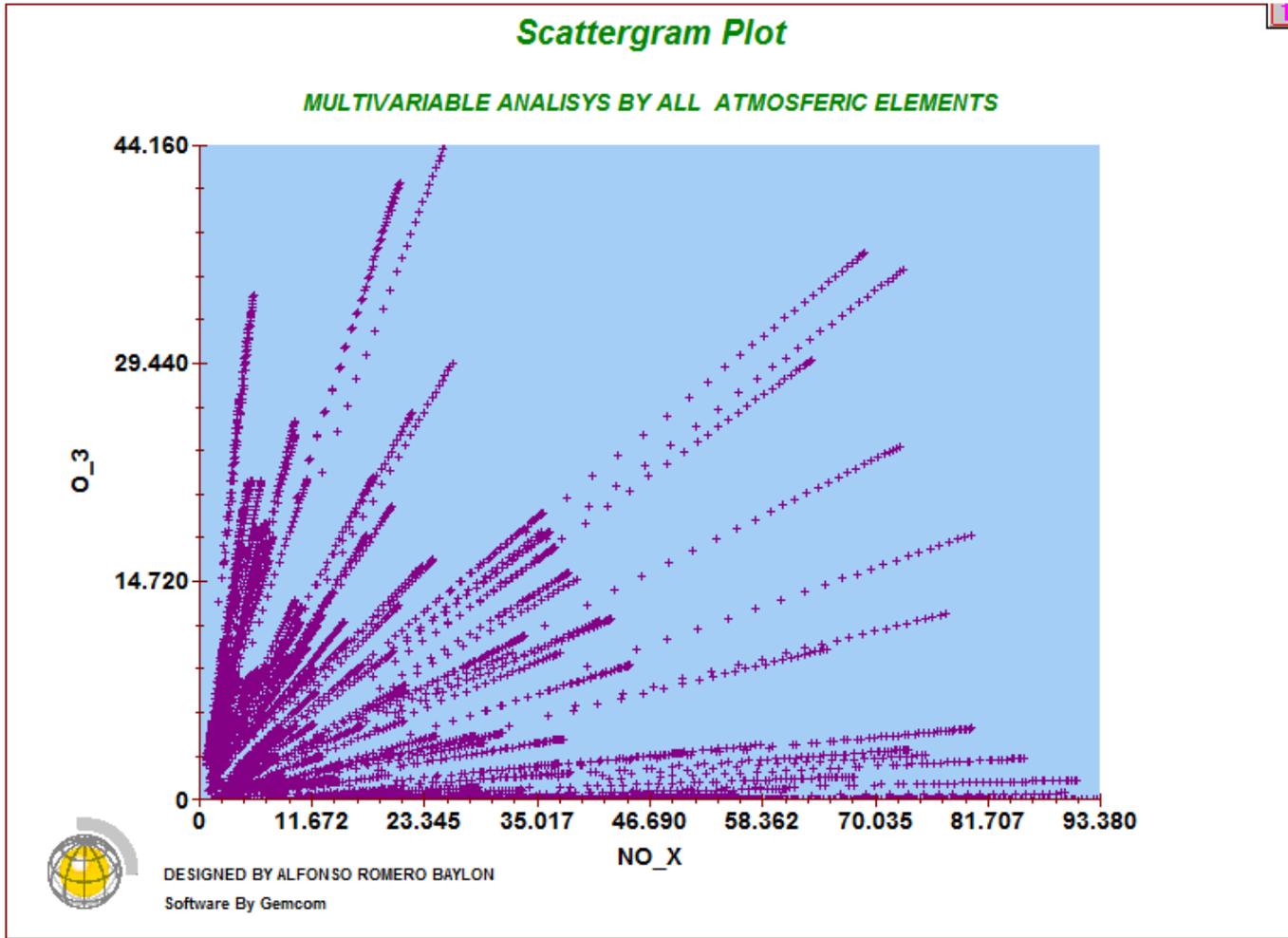
| Parámetro | Frecuencia | Altura de medición | Fecha primer registro | Fecha último registro | Técnica de medición | Marca | Gráficos |
|--|------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------|-------------------------|
| Temperatura ambiente (Temperatura - °C) | Horario | 1 m. | | 20/11/2018 | Automatico | VAISALA | Gráfico |
| Velocidad del viento (Vel. viento - m/s) | Horario | 1 m. | | 20/11/2018 | Automatico | VAISALA | Gráfico |
| Dirección del viento (Dir. viento - °) | Horario | 1 m. | | 20/11/2018 | Automatico | VAISALA | Gráfico |
| Humedad relativa del aire (Humedad relativa - %) | Horario | 1 m. | | 20/11/2018 | Automatico | VAISALA | Gráfico |
| Precipitación | Horario | 1 m. | | 20/11/2018 | Automatico | VAISALA | Gráfico |

Instrumentos de medición utilizados

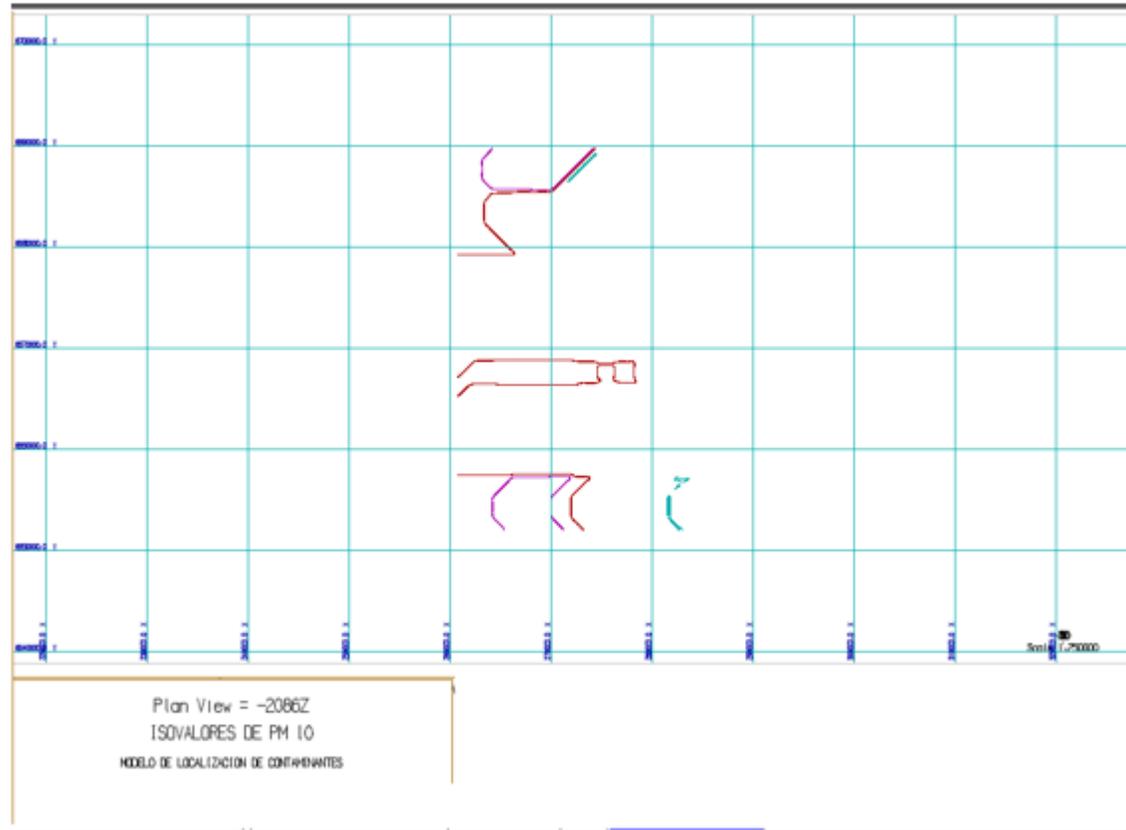
| Parámetro contaminantes | Fecha primer registro | Fecha último registro | Metodo | Técnica | Marca |
|---|-----------------------|-----------------------|------------|--|-------------------|
| Material Particulado menor a 10 micras (PM10) | 03/12/2014 | 30/08/2019 | Automatico | Atenuacion de Rayos Beta Monitor 5014i | THERMO SCIENTIFIC |
| Material Particulado menor a 2.5 micras (PM2.5) | 03/12/2014 | 30/08/2019 | Automatico | Atenuacion de Rayos Beta Monitor 5014i | THERMO SCIENTIFIC |
| Dioxido de Azufre SO2 | 03/12/2014 | 30/08/2019 | Automatico | Fluorescencia UV Analizador T100 | TELEDYNE |
| Oxidos de Nitrogeno NO2 | 03/12/2014 | 30/08/2019 | Automatico | Quimioluminiscencia Analizador T200 | TELEDYNE |
| Monoxido de Carbono CO | 03/12/2014 | 30/08/2019 | Automatico | Infrarrojo No Dispersivo Analizador T300 | TELEDYNE |
| Ozono Troposferico O3 | 03/12/2014 | 30/08/2019 | Automatico | Fotometria UV Analizador T400 | TELEDYNE |

ANEXO II: Resultados diversos del modelo MDLE

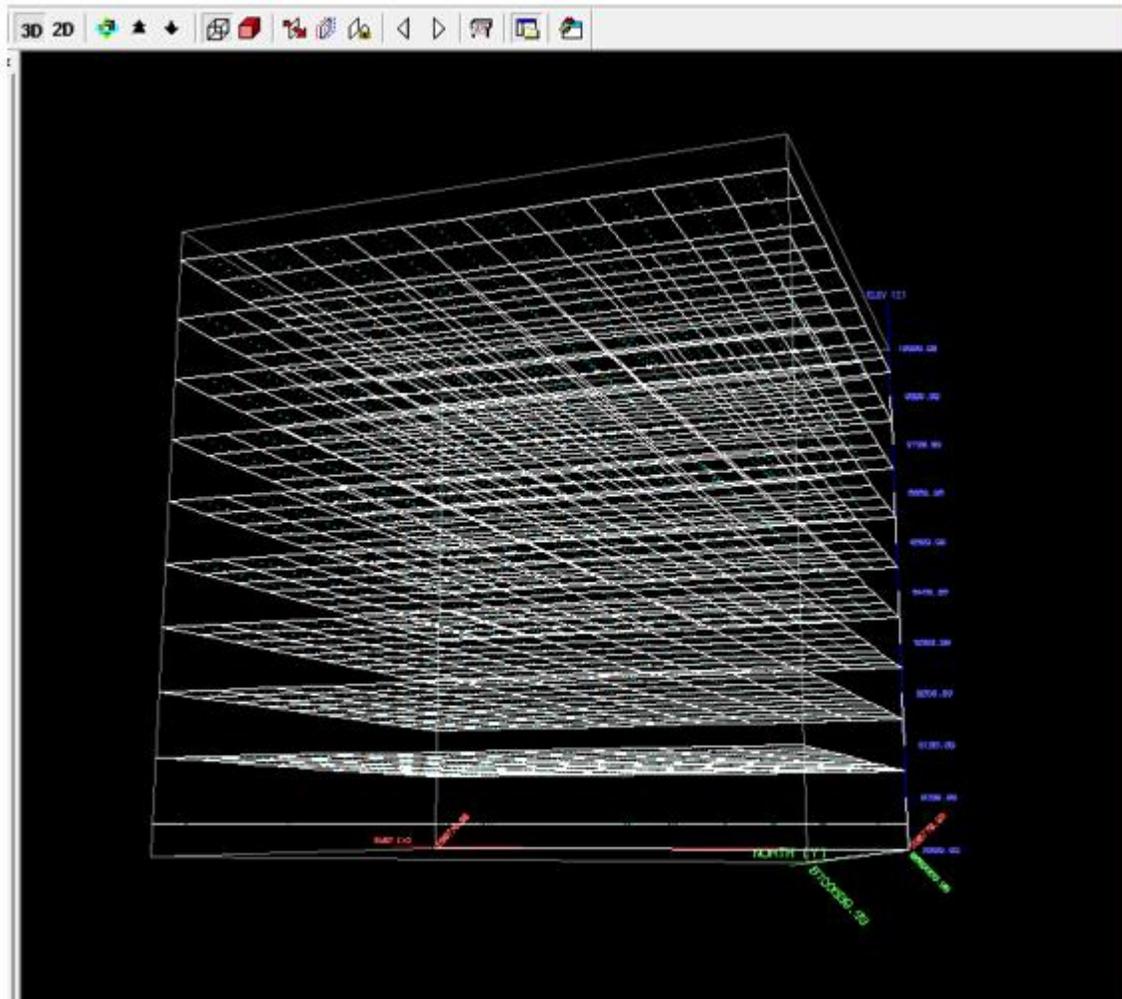




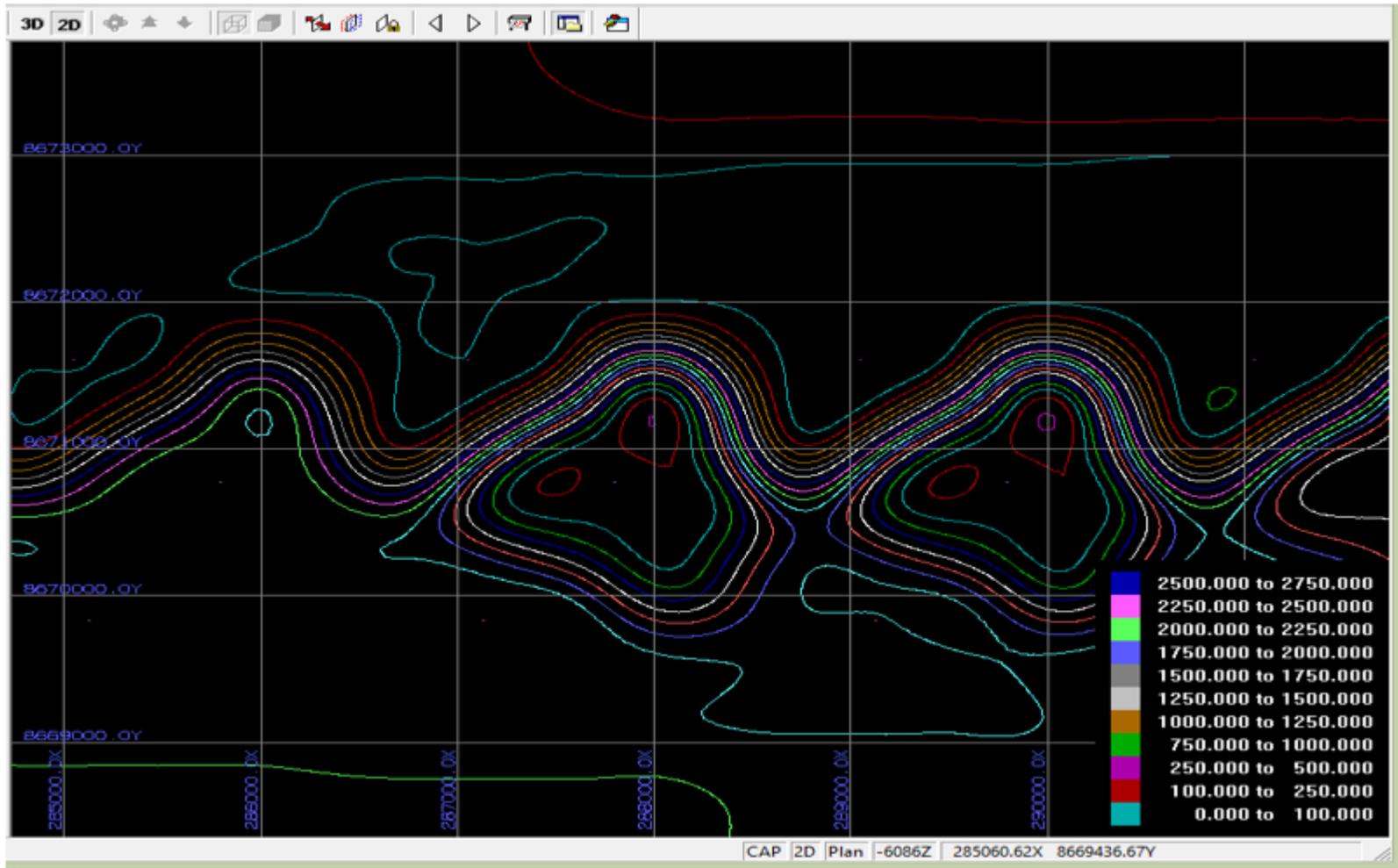
Isovalores de PM 10 a 8 mil msnm.



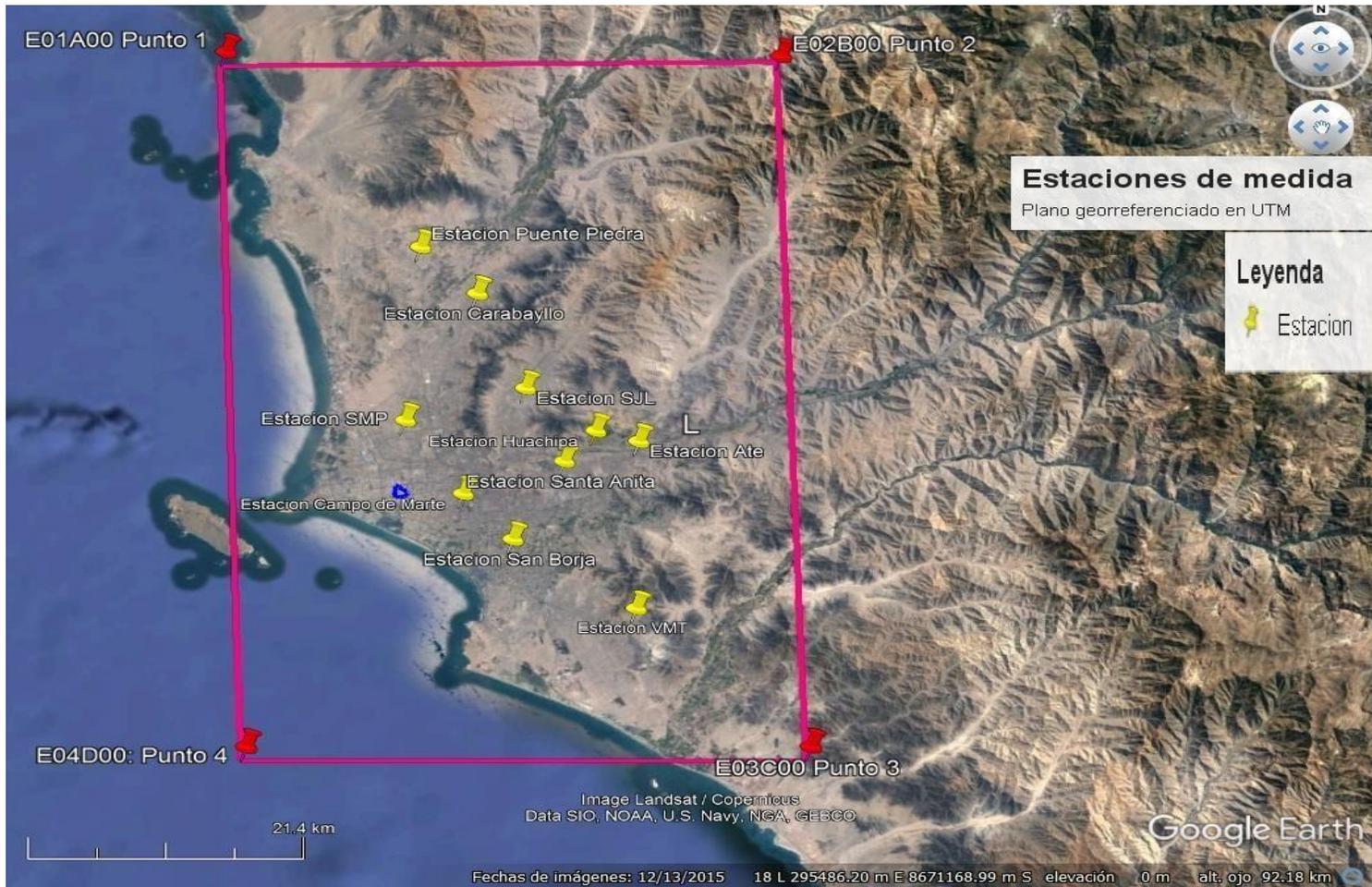
Condiciones de frontera 3D del modelo MDLE



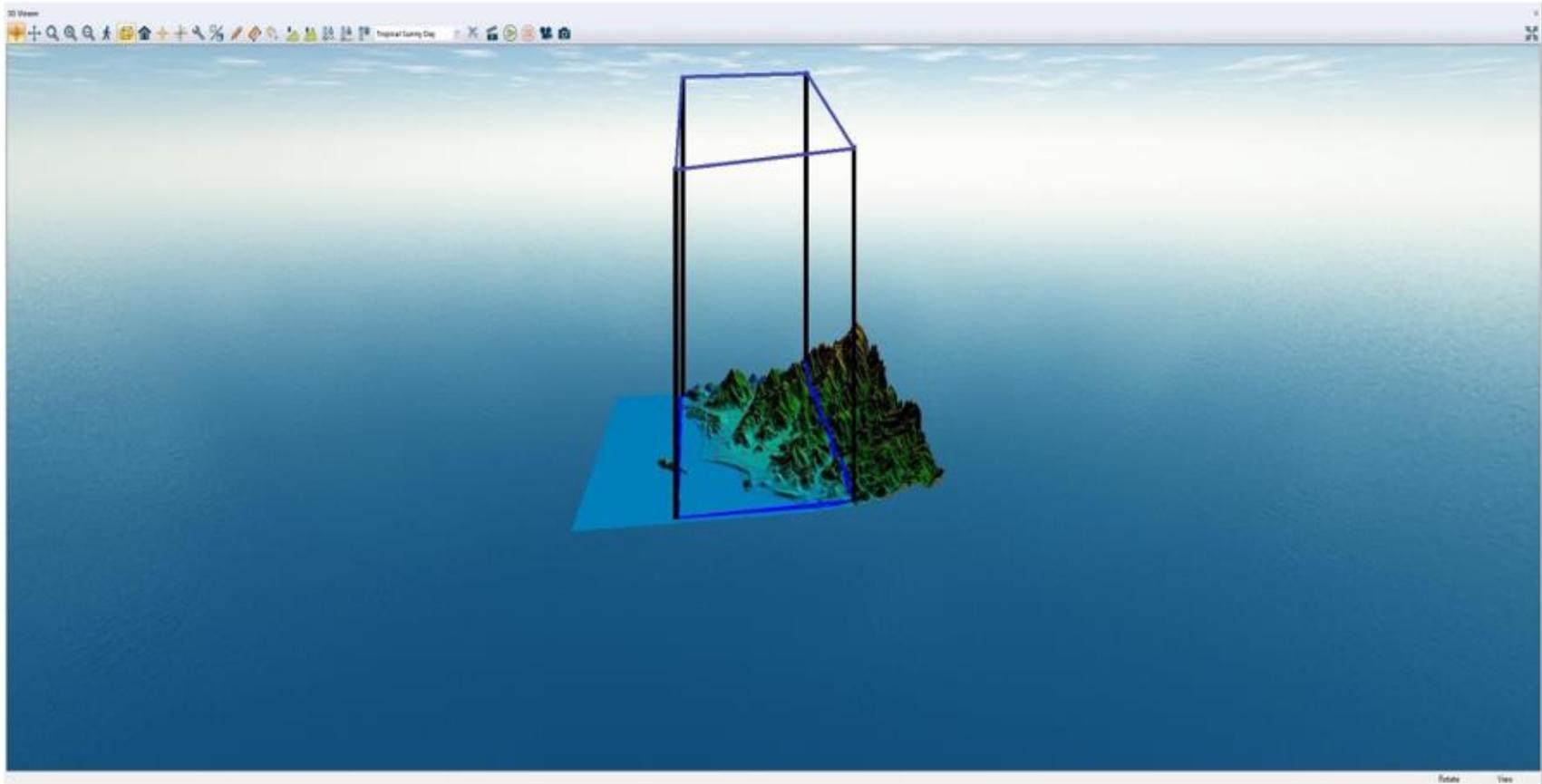
ISOVALORES DE CO EN 2750 M.S.NM



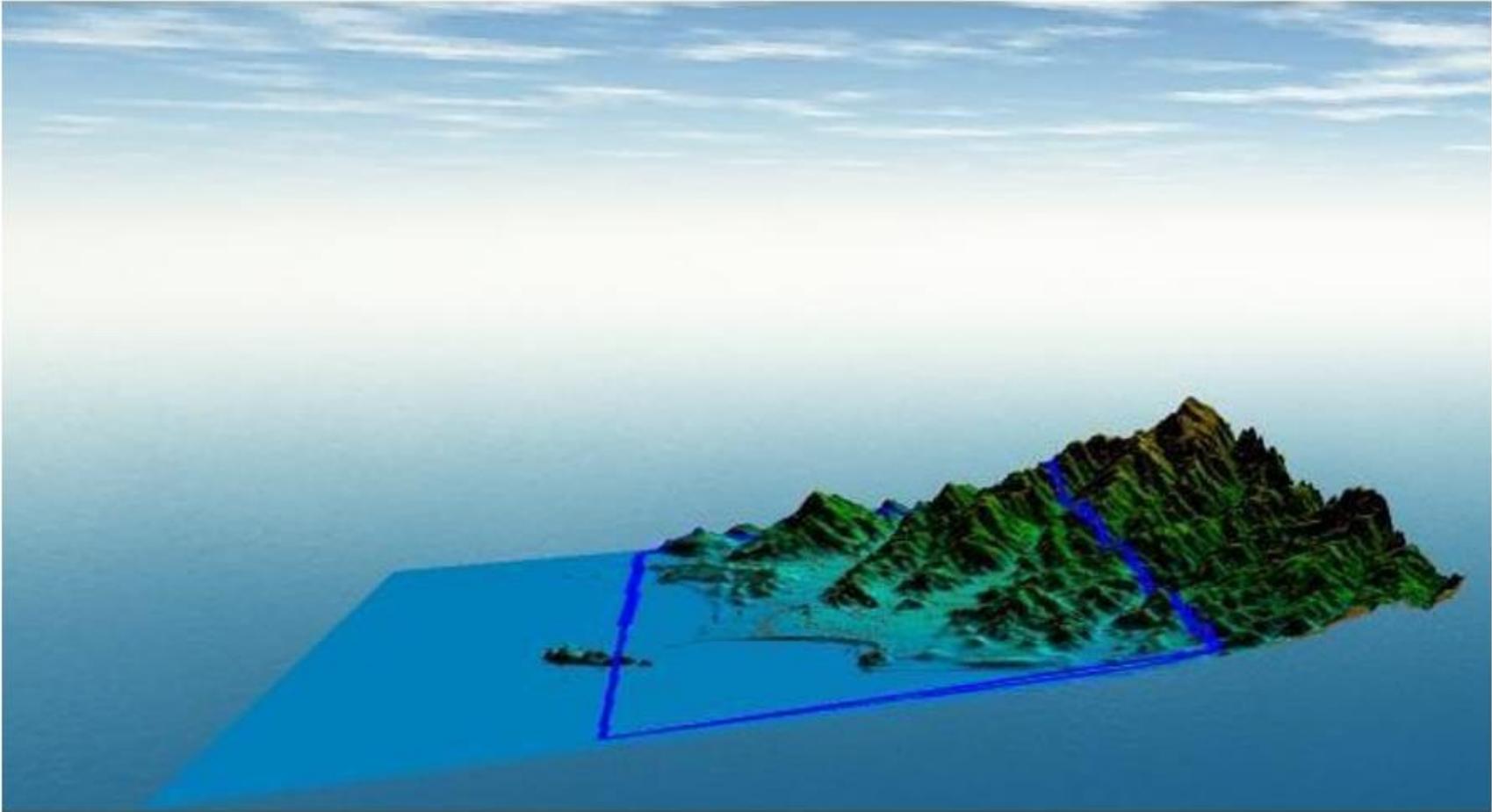
ANEXO III: PLANOS PLANO EN UTM DE ESTACIONES



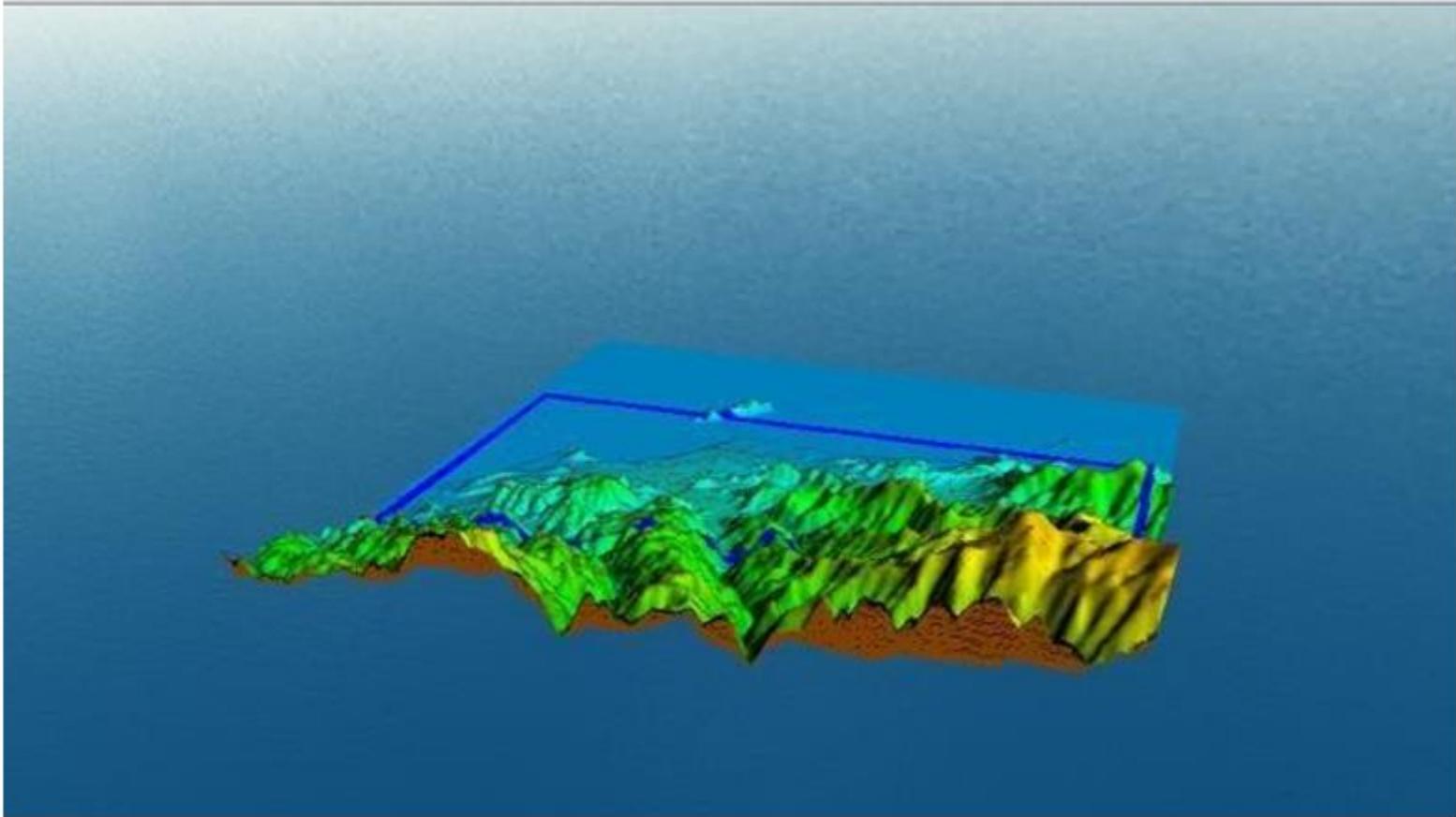
Vista 3D del Modelo MDLE



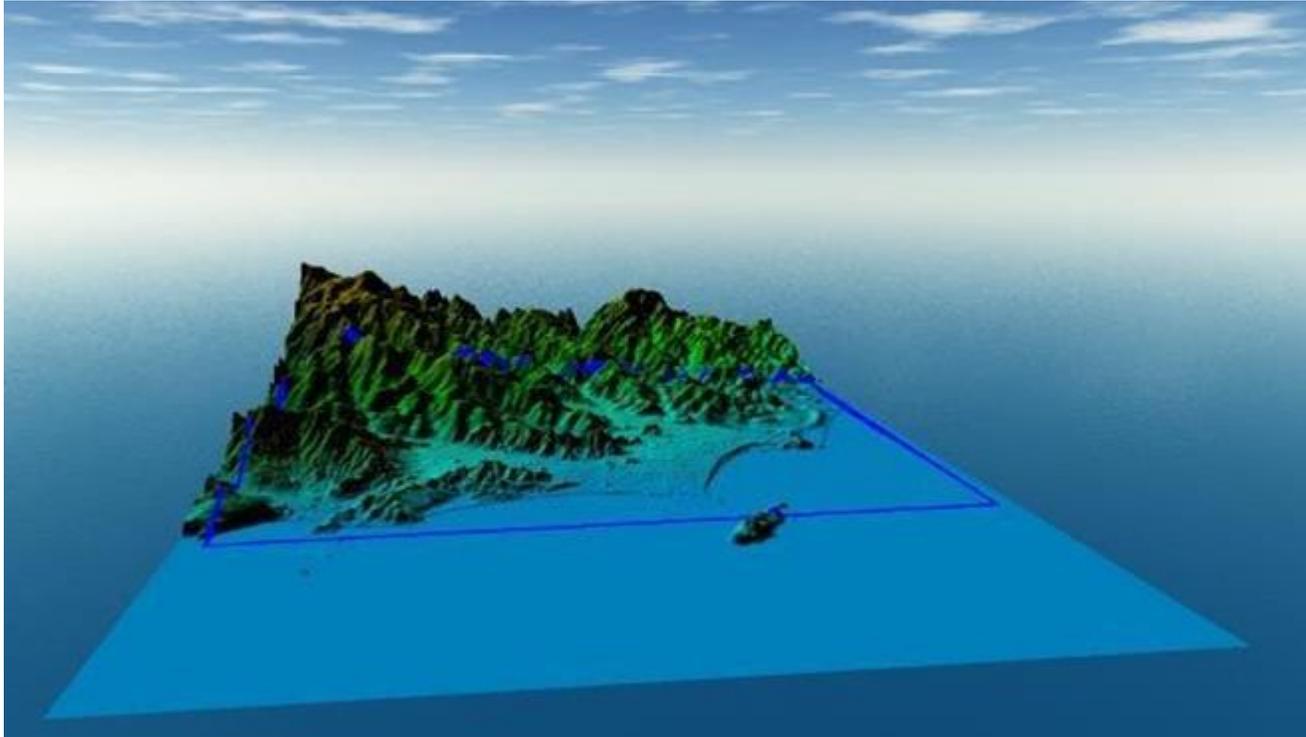
Vista 3D de Modelo MDLE de Sur - Norte



Vista 3D de Modelo MDLE de Este - Oeste



Vista 3D de Modelo MDLE de Este - Oeste



-Editorial-
CILADI
Centro de Investigación Latinoamericano
para el Desarrollo e Innovación

ISBN: 978-9942-7292-7-9

