
MODELIZACIÓN DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN LAS FUENTES DE EMISION

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL ATLÁNTICO - CRA

Material Particulado (PM10)
Dióxido de Azufre (SO₂)
Dióxido de nitrógeno (NO₂)

CC6195
Versión 00

Control De Contaminación Ltda.

2022

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	5
2.	OBJETIVOS	6
3.	FICHA TÉCNICA MODELO DE DISPERSIÓN	7
4.	SELECCIÓN DEL MODELO DE DISPERSIÓN	8
4.1	NIVEL DE DETALLE, COMPLEJIDADES METEOROLÓGICAS Y TOPOGRÁFICAS	9
4.1.1	CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS.....	9
4.1.2	MODELOS FÍSICOS Y MODELOS MATEMÁTICOS	10
4.1.3	MODELOS DISCRETIZADOS	10
4.1.4	MODELO GAUSSIANO:	11
4.1.5	CAPACIDAD TÉCNICA Y RECURSOS DISPONIBLES	13
5.	PREPARACIÓN DE DATOS PARA EJECUCIÓN DEL MODELO	14
5.1	DOMINIO DE MODELIZACIÓN.....	14
5.2	TERRENO – CURVAS DE NIVEL DEL ÁREA DE MODELIZACIÓN	15
5.3	RECEPTORES	16
5.4	MALLA DE RECEPTORES	16
5.5	RECEPTORES DISCRETOS - ESTACIONES DEL SVCA DE LA CRA.....	18
5.6	METEOROLOGÍA DE ÁREA DE MODELIZACIÓN.....	19
5.6.1	SUPERFICIE	21
5.6.2	ALBEDO	22
5.6.3	BOWEN	22
5.6.4	RUGOSIDAD	22
5.6.5	UPPER AIR (CAPA SUPERIOR)	23
5.6.6	CONDICIONES METEOROLÓGICAS 2020 - 2022.....	23
5.6.7	ROSAS DEL VIENTO AÑO 2020 - 2022.....	23
5.6.7.1	ROSA DE VIENTO DIURNA.....	25
5.6.7.2	ROSA DE VIENTO NOCTURNA	26
5.6.8	VARIABLES METEOROLÓGICAS - ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	28
5.6.9	ALTURA DE CAPA DE MEZCLA.....	40
5.7	DETERMINACIÓN DE EMISIONES	41
6.	EJECUCIÓN DEL MODELO DE DISPERSIÓN	45
6.1	AÑOS 2020 – 2022	45
7.	RESULTADOS DEL MODELO EN LOS PUNTOS SELECCIONADOS (SVCA-CRA).....	52
7.1	EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS (COMPARACIÓN NORMATIVA)	52
7.2	EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS (COMPARACIÓN MODELO - MEDICIONES).....	55
8.	CONCLUSIONES	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Modelo Matemático de Dispersión Gaussiano	13
Figura 2.	Dominio de Modelización.....	14
Figura 3.	Curvas de nivel Terreno.....	16
Figura 4.	Malla de receptores.....	17
Figura 5.	Configuración malla de receptores Coordenadas.....	18
Figura 6.	Receptores Discretos – SVCA - CRA	19



Figura 7. Sectores de Superficie Aermet View.....	22
Figura 8. Rosa de Vientos años 2020 -2022.....	24
Figura 9. Frecuencias de velocidad del viento 2020 - 2022.....	24
Figura 10. Rosa de Vientos año 2020 -2022 – Diurna.....	25
Figura 11. Frecuencias de velocidad del viento Diurno 2020 -2022.....	26
Figura 12. Rosa de Vientos año 2020 -2022 – Nocturna.....	27
Figura 13. Frecuencias de velocidad del viento Nocturno 2020 -2022.....	27
Figura 14. Temperatura Bulbo Seco promedio mensual 2020 – 2022.....	30
Figura 15. Temperatura Bulbo Húmedo promedio mensual 2020 - 2022.....	30
Figura 16. Humedad Relativa promedio mensual 2020 - 2022.....	31
Figura 17. Presión Barométrica promedio mensual 2020 - 2022.....	31
Figura 18. Dirección del Viento promedio mensual 2020 - 2022.....	32
Figura 19. Velocidad del Viento promedio mensual 2020 - 2022.....	32
Figura 20. Radiación promedio mensual 2020 - 2022.....	33
Figura 21. Nubosidad promedio mensual 2020 - 2022.....	33
Figura 22. Temperatura Bulbo Seco promedio horaria 2020 – 2022.....	36
Figura 23. Temperatura Bulbo Húmedo promedio horaria 2020 – 2022.....	37
Figura 24. Humedad Relativa promedio horaria 2020 - 2022.....	37
Figura 25. Presión Barométrica promedio horaria 2020 - 2022.....	38
Figura 26. Dirección del Viento promedio horaria 2020 - 2022.....	38
Figura 27. Velocidad del Viento promedio horaria 2020 - 2022.....	39
Figura 28. Radiación promedio horaria 2020 - 2022.....	39
Figura 29. Nubosidad promedio horaria 2020 - 2022.....	40
Figura 30. Altura de Mezcla 2020 - 2022.....	41
Figura 31. Fuentes de Emisión consideradas para la Modelización.....	43
Figura 32. PM10 24 Horas $\mu\text{g}/\text{m}^3$ – 2020 a 2022.....	46
Figura 33. PM10 Anual $\mu\text{g}/\text{m}^3$ – 2020 a 2022.....	47
Figura 34. SO ₂ 1 Hora $\mu\text{g}/\text{m}^3$ – 2020 a 2022.....	48
Figura 35. SO ₂ 24 Horas $\mu\text{g}/\text{m}^3$ – 2020 a 2022.....	49
Figura 36. NO ₂ 1 Hora $\mu\text{g}/\text{m}^3$ – 2020 a 2022.....	50
Figura 37. NO ₂ Anual $\mu\text{g}/\text{m}^3$ – 2020 a 2022.....	51



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas dominio de Modelización.....	15
Tabla 2. Coordenadas estaciones SVCA-CRA	18
Tabla 3. Parámetros de Superficie.....	23
Tabla 4. Variables meteorológicas promedios mensuales 2020 - 2022	28
Tabla 5. Variables meteorológicas promedios horarios 2020 - 2022.....	34
Tabla 6. Características fuentes fijas puntuales modelizadas.....	41
Tabla 7. Ubicación de Fuentes de emisión	42
Tabla 8. Emisiones de fuentes fijas puntuales.....	44
Tabla 9. Localización Máximos de Concentración Años 2020 - 2022.....	45
Tabla 10. Concentraciones máximas – Años 2020 - 2022.....	52
Tabla 11. Aportes al SVCA-CRA – Años 2020 - 2022	52
Tabla 12. Normatividad vigente de calidad del aire	53
Tabla 13. Comparación normativa calidad del aire año 2020 a 2022	53
Tabla 14. Aportes PM10 al SVCA-CRA – Años 2020 - 2022.....	54
Tabla 15. Aportes SO ₂ al SVCA-CRA – Años 2020 - 2022	54
Tabla 16. Aportes NO ₂ al SVCA-CRA – Años 2020 - 2022	54
Tabla 17. Aportes PM10 24 horas – Mediciones.....	55
Tabla 18. Aportes PM10 Anual – Mediciones.....	55

1. INTRODUCCIÓN

Un modelo de dispersión es una imagen simplificada de la realidad, no contiene todas las características del sistema real, pero contiene características de interés para el manejo de temas específicos o problemas científicos.

Los contaminantes descargados en el aire son transportados grandes distancias por corrientes de aire de gran escala y son dispersados por pequeñas corrientes o turbulencias, las cuales mezclan los contaminantes con aire limpio a una altura determinada sobre la superficie.

La dispersión por viento es un proceso muy complejo debido a la presencia de celdas convectivas (remolinos) de diferentes tamaños en la atmósfera. Por esta razón no existe una teoría exacta que describa la relación entre las concentraciones de contaminantes en el ambiente y los procesos y factores meteorológicos causantes.

De esta forma se define un modelo de dispersión atmosférica como una simulación matemática de los procesos físicos y químicos que gobiernan el transporte, dispersión y transformación de contaminantes en la atmósfera. Es un medio para estimar las concentraciones de contaminación en función de variables como la dirección del viento, con información de entrada acerca de las fuentes emisoras y la naturaleza de la atmósfera.

Los modelos de contaminación del aire son programas de computadora que calculan la concentración del contaminante en función de las condiciones meteorológicas predominantes en una fuente, en intervalos de tiempo establecidos y utilizando como insumos información referente a la tasa de emisión del contaminante, las características de la fuente de emisión, la topografía local, datos meteorológicos del área de interés y en general el ambiente de fondo del contaminante.

Mediante el software de Modelización AERMOD VIEW 9.9.0, se modelizó la dispersión de los contaminantes introducidos a la atmósfera provenientes las actividades ubicadas dentro de la jurisdicción de la Corporación Regional de Atlántico (CRA), las cuales generan contaminantes tales como Material Particulado Menor a Diez Micras (PM10), Dióxido de Azufre (SO₂) y Dióxido de Nitrógeno (NO₂).

Para ello se parte de la información primaria obtenida de las mediciones directas realizadas por actividades dentro de la jurisdicción de la CRA y con base en ello se establece el comportamiento de la dispersión de los contaminantes depositados en la atmósfera.



2. OBJETIVOS

- Modelizar la dispersión de los contaminantes generados por las actividades dentro de la jurisdicción de la CRA en los años 2020 a 2022 con el fin de determinar la pertinencia de la ubicación actual de las estaciones de calidad del aire perteneciente el Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire de la CRA (SVCA-CRA).
- Determinar el área de alcance de las emisiones teóricas y niveles máximos resultantes del modelo de dispersión de los contaminantes: Material Particulado Menor a Diez Micras (PM10), Dióxido de Azufre (SO₂) y Dióxido de Nitrógeno (NO₂) producto de las actividades desarrolladas dentro de la jurisdicción de la CRA.
- Generar mapas de concentración que permitan identificar zonas con mayores concentraciones de Material Particulado Menor a Diez Micras (PM10), Dióxido de Azufre (SO₂) y Dióxido de Nitrógeno (NO₂) para generar la información necesaria para proponer la ubicación de nuevas estaciones para el Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire de la CRA.

3. FICHA TÉCNICA MODELO DE DISPERSIÓN

Nombre del proyecto	Corporación Autónoma Regional Del Atlántico – CRA
Departamento	ATLÁNTICO
Tipo de modelo	Dispersión Gausseana – aire
Herramienta de Modelización	Aermod View versión 9.9.0
Actividad principal modelizada	Emisiones de fuentes fijas puntuales
Altura de sobre nivel del mar	Nivel del suelo (42 msnm)
Radio de Modelización	7,5 Km
Información meteorológica	Modelo WRF años 2020 a 2022
Contaminantes modelizados	PM10, SO ₂ y NO ₂
Normatividad aplicable	Resolución 2254 de 2017- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Anexos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mapas de concentración (kml) 2. Mapas de concentración (shp) 3. Mapas de terreno (hgt, KML) 4. Meteorología (sam, .sfc, .pfl, .au) 5. Receptores (xls) 6. Archivo de fuentes (xls) 7. Archivos de concentración (xls) 8. Datos SVCA – CRA 9. Análisis datos SVCA - CRA

El actual informe se realizó para los siguientes años de modelización:

- Modelo de dispersión de contaminantes para los Años 2020 a 2022, este modelo incluye la meteorología continua de los 3 años generando resultados representativos de los 3 años.

4. SELECCIÓN DEL MODELO DE DISPERSIÓN

Un modelo de dispersión es una imagen simplificada de la realidad, no contiene todas las características del sistema real, pero contiene características de interés para el manejo de temas específicos o problemas científicos.

Los contaminantes descargados en el aire son transportados grandes distancias por corrientes de aire de gran escala y son dispersados por pequeñas corrientes o turbulencias, las cuales mezclan los contaminantes con aire limpio a una altura determinada sobre la superficie.

La dispersión por viento es un proceso muy complejo debido a la presencia de celdas convectivas (remolinos) de diferentes tamaños en la atmósfera. Por esta razón no existe una teoría exacta que describa la relación entre las concentraciones de contaminantes en el ambiente y los procesos y factores meteorológicos causantes.

De esta forma se define un modelo de dispersión atmosférica como una simulación matemática de los procesos físicos y químicos que gobiernan el transporte, dispersión y transformación de contaminantes en la atmósfera. Es un medio para estimar las concentraciones de contaminación en función de variables como la dirección del viento, con información de entrada acerca de las fuentes emisoras y la naturaleza de la atmósfera.

Los modelos de contaminación del aire son programas de computadora que calculan la concentración del contaminante en función de las condiciones meteorológicas predominantes en una fuente, en intervalos de tiempo establecidos y utilizando como insumos información referente a la tasa de emisión del contaminante, las características de la fuente de emisión, la topografía local, datos meteorológicos del área de interés y en general el ambiente de fondo del contaminante.

Mediante el software de Modelización AERMOD VIEW 9.9.0, se modelizó la dispersión de los contaminantes introducidos a la atmósfera provenientes las actividades ubicadas dentro de la jurisdicción de la Corporación Regional de Atlántico (CRA), las cuales generan contaminantes tales como Material Particulado Menor a Diez Micras (PM10), Dióxido de Azufre (SO₂) y Dióxido de Nitrógeno (NO₂) partiendo de información primaria obtenida de las mediciones directas realizadas por actividades dentro de la jurisdicción de la CRA y con base en ello se establece el comportamiento de la dispersión de los contaminantes depositados en la atmósfera.

Para el desarrollo del actual proyecto el modelo seleccionado para la ejecución de la modelización de las fuentes fijas de emisión es el AERMOD, modelo desarrollado por la *Environmental Protection Agency*, USEPA¹, definido como: *Un modelo de pluma de estado estacionario que incorpora dispersión de aire basada en la estructura de turbulencia de la capa límite planetaria y conceptos de escala, incluido el uso de fuentes superficiales y elevadas en terrenos simples y complejos.* Adicionalmente, el AERMOD se encuentra debidamente recomendado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), ahora Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) en el *Protocolo Para El Monitoreo Y Seguimiento De La calidad Del Aire, Manual De Diseño De Sistemas De Vigilancia De La Calidad Del Aire* de octubre de 2010, *Numeral 4.4 Modelación preliminar*, descrito de la siguiente manera: *AERMOD: Es un modelo de*

¹ <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models>

dispersión de pluma de estado estable que usa distribución Gaussiana en la vertical y la horizontal para condiciones estables y en la horizontal para condiciones convectivas. La distribución de la concentración vertical para condiciones convectivas resulta de asumir una función de densidad de probabilidad bi-Gaussiana de la velocidad vertical. AERMOD incorpora conceptos comunes acerca de la dispersión en terrenos complejos haciendo más realista la modelación. Fue diseñado como reemplazo del ISCST².

4.1 Nivel de detalle, complejidades meteorológicas y topográficas

En cuanto a la representatividad espacial el modelo AERMOD cuenta con un dominio de modelización recomendado de hasta 50 kilómetros, por lo cual se ajusta de manera adecuada al objetivo del actual proyecto ya que con este dominio máximo se abarcan las 7 estaciones de calidad del aire de la red actual de la CRA, objeto de rediseño junto con las áreas disponibles para la ubicación de las 2 estaciones nuevas.

Es de aclarar que si bien el dominio máximo recomendado es de 50 kilómetros este puede ser ajustado a las necesidades del proyecto, así como a la ubicación de las fuentes fijas puntuales a modelizar; de igual forma, se destaca que el AERMOD permite configurar mallas de receptores desde ajustadas (25 metros) hasta mallas muy gruesas (2,500 metros)³. Situación que se ajusta a las necesidades del proyecto.

Finalmente, el modelo seleccionado AERMOD atiende todas las necesidades de complejidades meteorológicas ya que se emplearon 3 años de meteorología, los cuales describen de manera detallada el comportamiento del clima en la zona de estudio, esto mediante la Herramienta AERMET VIEW. Adicionalmente, es de aclarar que el modelo AERMOD permite modelizar la emisión de los contaminantes en terrenos complejos, plenos y todas sus combinaciones al contar con información detallada de las alturas sobre el nivel del mar en el área de modelización y asignarlas a las fuentes y receptores mediante la herramienta AERMAP VIEW.

4.1.1 Características de los modelos

El modelo de dispersión seleccionado para realizar la aproximación matemática de las concentraciones contaminantes esperadas de la operación del proyecto es un modelo gaussiano.

Para Seinfeld, un modelo de calidad del aire ambiente es un medio por el cual pueden relacionarse las emisiones de contaminantes con las concentraciones de esos contaminantes en el aire (Seinfeld, 1978). En otros términos, un modelo de dispersión es una herramienta que pretende conocer la inmisión a partir de la emisión. El primer modelo orientado en este sentido data de los años 20 del siglo pasado, formalizado por científicos militares británicos con la finalidad de mejorar la eficacia del uso de gases tóxicos de guerra. Y ya en esa década Taylor introdujo la noción de la turbulencia en la atmósfera (Darly and Zanetti, 2007). Más tarde, en la década de los 30, Sutton y Bossanquet trataron de las propiedades de difusión de las plumas emitidas por las chimeneas industriales (MacDonald, 2003).

² https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Disenio.pdf

³ https://static.azdeq.gov/aqd/modeling_guidance.pdf

4.1.2 Modelos Físicos y Modelos Matemáticos

Existen en la literatura numerosas clasificaciones de modelos de dispersión. Antes que recurrir a una clasificación supuestamente exhaustiva, cabe establecer sucesivas distinciones. En general cabe distinguir entre modelos físicos, con la utilización de maquetas y túneles de viento, y modelos matemáticos, elaborados con conceptos fisicomatemáticos (Torres Jerez, 2007). Entre estos modelos matemáticos cabe distinguir entre modelos estadísticos y modelos determinísticos. Los modelos estadísticos son descriptivos o a posteriori, obtenidos a partir de los datos reales. Intentan modelizar lo ya ocurrido, a los efectos de saber un poco más el todo conociendo la parte. Se trata de modelos deductivos que no se adentran en explicaciones del cómo ni el por qué, limitándose a formalizar el fenómeno, aquello que es percibirle y cuantificable. Se concretan en ecuaciones que no tienen ningún significado físico (Jacobson, 2005), como es el caso de las funciones polinomiales obtenidas por ajustes de medidas mediante superficies de respuesta.

Los modelos matemáticos determinísticos pretenden adelantarse a los hechos, trabajando inductivamente para modelizar el comportamiento futuro de los sistemas, por inducción. Se concretan en ecuaciones paramétricas, con parámetros que tienen un significado físico (Jacobson, 2005). En este caso todos los parámetros son función de las variables tiempo y espacio. El problema radica en la formalización matemática de estos modelos, y en su flexibilidad formal para ir corrigiéndose con arreglo a las sucesivas validaciones con los hechos experimentales. En ambos casos, más allá de las atribuciones conductuales que derivan de hechos experimentales probados, no se emiten hipótesis, reconociendo la inaccesibilidad del nóumeno.

4.1.3 Modelos Discretizados

En 1904, el científico noruego Bjerkens propuso que la predicción del tiempo se podía considera un problema matemático con siete ecuaciones en derivadas parciales con siete incógnitas: las tres componentes de la velocidad del viento, la presión, la densidad, la temperatura y la humedad específica (Lezaun, 2006). Desde entonces se está trabajando en la aplicación de la dinámica de fluidos a la dispersión atmosférica. La modelización de la atmósfera mediante ecuaciones en derivadas parciales acarrea una doble discretización: la discretización del espacio y la discretización de las ecuaciones. Para la discretización del espacio se parcela la atmósfera en cajas, lo suficientemente pequeñas como para que sea legítimo manejarlas como entes numéricos, y lo suficientemente grandes como para que mantengan cualitativamente las propiedades de toda la atmósfera, y las variables atmosféricas sean homogéneas en el interior de cada caja. La discretización de las ecuaciones consiste en la adaptación de las ecuaciones a ese espacio discretizado, asumiendo los intervalos discretos que adoptarán sus valores entre celdas adjuntas mediante, por ejemplo, diferencias finitas. Cuanto más pequeñas sean las cajas atmosféricas y menor el paso de tiempo, el coste de la resolución es mayor, pero cabe esperar que la aproximación será mejor.

La ecuación de difusión-advención. Bajo un punto de vista teórico conceptual, en una atmósfera inerte e inmóvil, esto es, homogénea, la dispersión de una sustancia gaseosa tendrá lugar según la ley de difusión.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -k \frac{\partial^2 C}{\partial x_i^2}$$

Pero la realidad es que la atmósfera es turbulenta, y anisótropa. De modo que la ecuación ha de matizarse según la difusión turbulenta que no es igual para las tres dimensiones.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -k_1 \frac{\partial^2 C}{\partial x_1^2} - k_2 \frac{\partial^2 C}{\partial x_2^2} - k_3 \frac{\partial^2 C}{\partial x_3^2}$$

Pero la atmósfera no está inmóvil, sino que hay un viento. Por lo que hay que considerar la advección del producto emitido en el fluido atmosférico en movimiento.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial C}{\partial x_i} = -k_1 \frac{\partial^2 C}{\partial x_1^2} - k_2 \frac{\partial^2 C}{\partial x_2^2} - k_3 \frac{\partial^2 C}{\partial x_3^2}$$

Si, además, el producto emitido tiene capacidad de reacción, esto es, capacidad para transformarse y a la postre desaparecer, la ecuación queda:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial C}{\partial x_i} = -k_1 \frac{\partial^2 C}{\partial x_1^2} - k_2 \frac{\partial^2 C}{\partial x_2^2} - k_3 \frac{\partial^2 C}{\partial x_3^2} - R$$

Esta ecuación representa un modelo más completo, pero no es en modo alguno el modelo exhaustivo, total. Y aun así hay que realizar algunas simplificaciones. Se supone que no hay reacciones, por lo que $R = 0$, se supone que la velocidad del viento corresponde al eje x, de modo que las componentes y, z de la velocidad son nulas, y se asume que la difusión en la dirección del viento, coordenada x, es despreciable respecto a la advección. Con lo que la expresión queda:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = k_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

La solución exacta de esta ecuación, incluso con estas simplificaciones, no es posible analíticamente, de modo que hay que recurrir a métodos numéricos que son necesariamente aproximados. Los métodos de solución (en el sentido operativo y no analítico) son en general de orientación euleriana o lagrangiana, según el planteamiento de las ecuaciones en lo relativo al sistema de coordenadas respecto al que se referencian. El método euleriano utiliza un sistema de coordenadas fijo con respecto a la tierra, en tanto que el lagrangiano usa el sistema de coordenadas que acompaña el movimiento de la atmósfera.

Los modelos eulerianos representan la clase más sofisticada de modelos atmosféricos. El volumen de control a modelizar se divide en celdas, y la concentración en ellas se determina en todas y cada una de las celdas con carácter simultáneo a determinados intervalos de tiempo. En el modelo lagrangiano todos los sucesos (emisiones, reacciones, deposición y mezclado de los contaminantes) se describen en un volumen de aire que se desplaza con el viento (Sermanat, 2014).

4.1.4 Modelo Gaussiano:

La ecuación de difusión-advección admite tratamientos de aproximación numérica con los enfoques Euleriano y Lagrangiano. Dada la unicidad del suceso y el rigor matemático de ambos

enfoques, no hay una más válido que el otro. La aproximación Euleriana, para obtener concentraciones medias, suele ser denotada como K-teoría. Parte de la base de que la difusión molecular es despreciable ante la difusión turbulenta, y que la atmósfera incompresible facilita la linealización. Con este planteamiento, y supuesta la uniformidad de los coeficientes de dispersión, se llega a la solución:

$$\langle c(x,y,z,t) \rangle = \frac{S}{8(\pi t)^{3/2} \sqrt{K_{xx} K_{yy} K_{zz}}} \exp\left(-\frac{(x-\bar{u}t)^2}{4K_{xx}t} - \frac{y^2}{4K_{yy}t} - \frac{z^2}{4K_{zz}t}\right)$$

En tanto que la aproximación lagrangiana, es la teoría estadística, que supone que la velocidad es una variable estocástica gaussiana función sólo del tiempo. Y su solución es:

$$c(x,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x(t)} \exp\left(-\frac{(x-\bar{u}t)^2}{2\sigma_x^2(t)}\right)$$

Considerando una fuente puntual instantánea, se aprecia que las soluciones son superponibles igualando:

$$\sigma_x^2 = 2K_{xx}t \quad \sigma_y^2 = 2K_{yy}t \quad \sigma_z^2 = 2K_{zz}t$$

Aplicando a fuentes puntuales continuas, se observa igualmente la coincidencia, al igualar:

$$\sigma_y^2 = \frac{2K_{yy}x}{\bar{u}}, \quad \sigma_z^2 = \frac{2K_{zz}x}{\bar{u}}$$

Por lo que el punto crítico está en la determinación de los parámetros de dispersión, sin los cuales el algoritmo no significa nada. La ecuación base del modelo gaussiano de dispersión atmosférica, a la que se llega, por tanto, por el camino lagrangiano o por el camino euleriano es:

$$c(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

La formulación del modelo se completó con la determinación experimental de los parámetros de dispersión, tanto el de sentido vertical, como el de sentido horizontal; parámetros que se corresponden con las desviaciones estándar en dichas direcciones de la distribución de concentraciones.

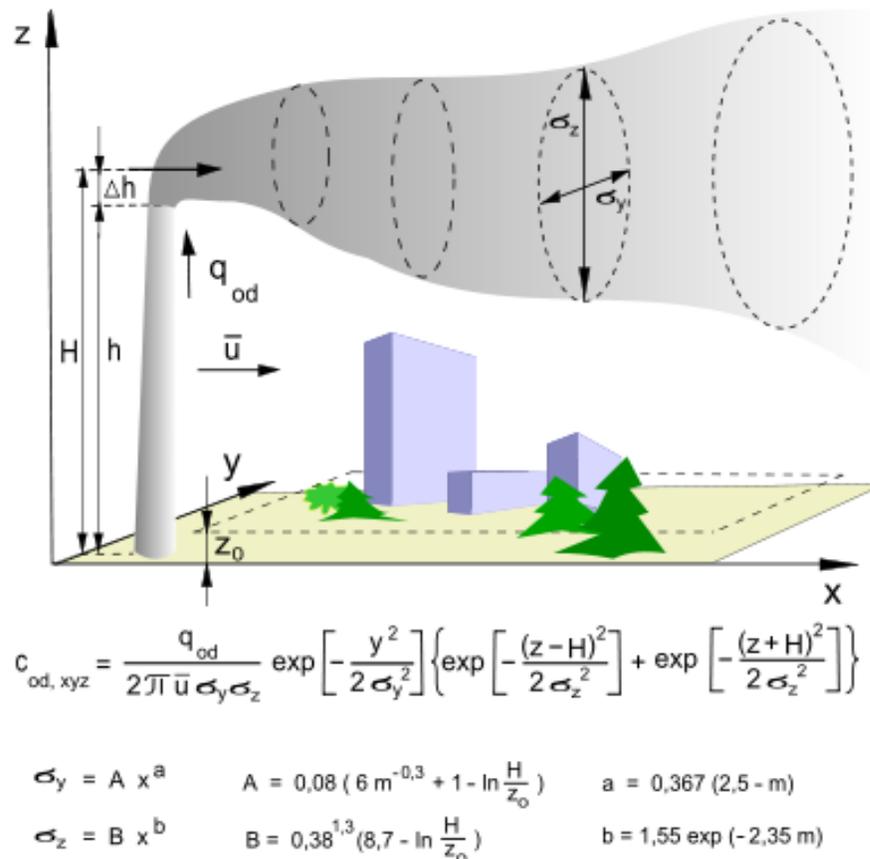


Figura 1. Modelo Matemático de Dispersión Gaussiano

La ecuación de penacho gaussiano asume que no hay interacción entre las plumas, que puede llegar a ser significativo dentro de los entornos urbanos.

4.1.5 Capacidad técnica y recursos disponibles

Para la ejecución de los modelos de dispersión planteados y necesarios para el desarrollo del actual documento se cuenta con formación específica en ejecución de modelos de dispersión AERMOD y CALPUFF en entornos *Lakes Environmental*, además de contar con más de 10 años de experiencia en ejecución de modelos de dispersión para diversas actividades y fases de proyectos mineros, de explotación de hidrocarburos y diseños de sistemas de vigilancia de la calidad del aire.

Para el desarrollo del actual proyecto se cuenta con los recursos necesarios como el software AERMOD VIEW 9.9.0, programas de análisis espaciales tipo GIS y para realización de análisis de datos y generación de informes y con hardware como computadores y servidores para ejecución de los modelos de dispersión en los tiempos requeridos.

5. PREPARACIÓN DE DATOS PARA EJECUCIÓN DEL MODELO

Para la correcta ejecución del modelo de dispersión AERMOD se requiere definir 2 componentes fundamentales: el terreno y la meteorología, esto se realiza mediante las herramientas AERMAP y AERMET respectivamente, en los siguientes apartados se presenta la configuración y los resultados obtenidos de la ejecución de estas 2 herramientas previas a la ejecución del modelo AERMOD VIEW.

5.1 Dominio De Modelización

Partiendo de la ubicación actual de las estaciones del SVCA de la CRA y de las fuentes fijas puntuales identificadas en la zona se estableció un dominio de modelización que permitiera conocer la dispersión de los contaminantes a lo largo de la jurisdicción de la CRA.



Figura 2. Dominio de Modelización

El dominio se estableció con una longitud de 15 km por 15 km para un total de 225 km², teniendo en cuenta 7,5 km a la redonda de la zona de desarrollo del proyecto. A continuación, se presentan las coordenadas del dominio de Modelización.

Tabla 1. Coordenadas dominio de Modelización

Punto	Coordenadas*	
1	N	2.752.951,033
	E	4.783.248,544
2	N	2.752.754,596
	E	4.813.250,913
3	N	2.782.754,499
	E	4.813.449,754
4	N	2.782.955,805
	E	4.783.447,447

*Sistema de coordenadas Magna Sirgas, Origen Nacional

5.2 Terreno – Curvas de nivel del área de modelización

A continuación, se presentan las curvas de nivel generadas por la herramienta AERMAP para el dominio de Modelización.

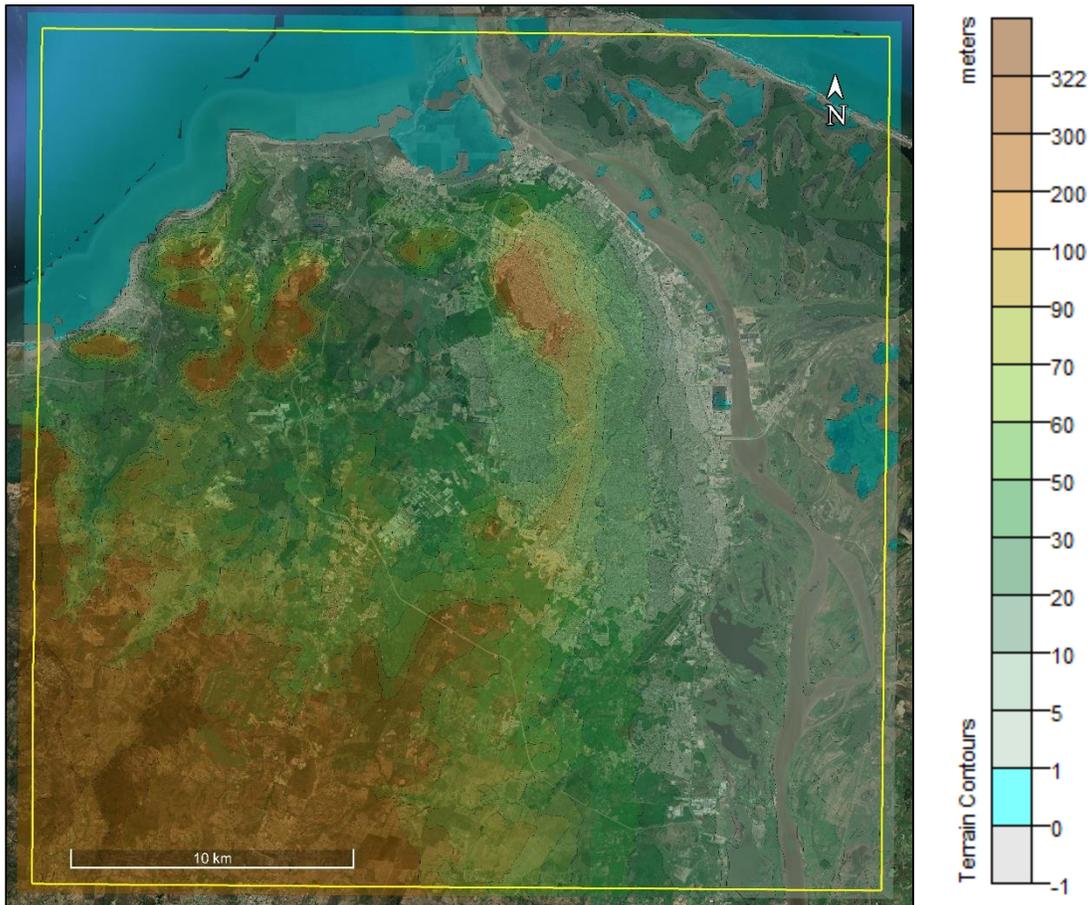


Figura 3. Curvas de nivel Terreno

Con la información del terreno procesada el modelo AERMOD puede asignar la altura sobre el nivel del mar y sobre el nivel de suelo a las fuentes fijas modelizadas y los receptores asignados.

5.3 Receptores

Con el área de Modelización definida se estableció la malla de receptores sobre la cual se realizará la estimación de las concentraciones de cada contaminante.

5.4 Malla de Receptores

La malla de receptores define la cantidad de puntos en los cuales se estimarán los niveles de inmisión, para el modelo actual se creó una malla de receptores de 15 Km por 15 Km para un total de 225 km², dividida en 101 puntos por 101 puntos separados 300 metros entre ellos, para un total de 10.201 receptores localizados a 0 metros de altura sobre el nivel del suelo.

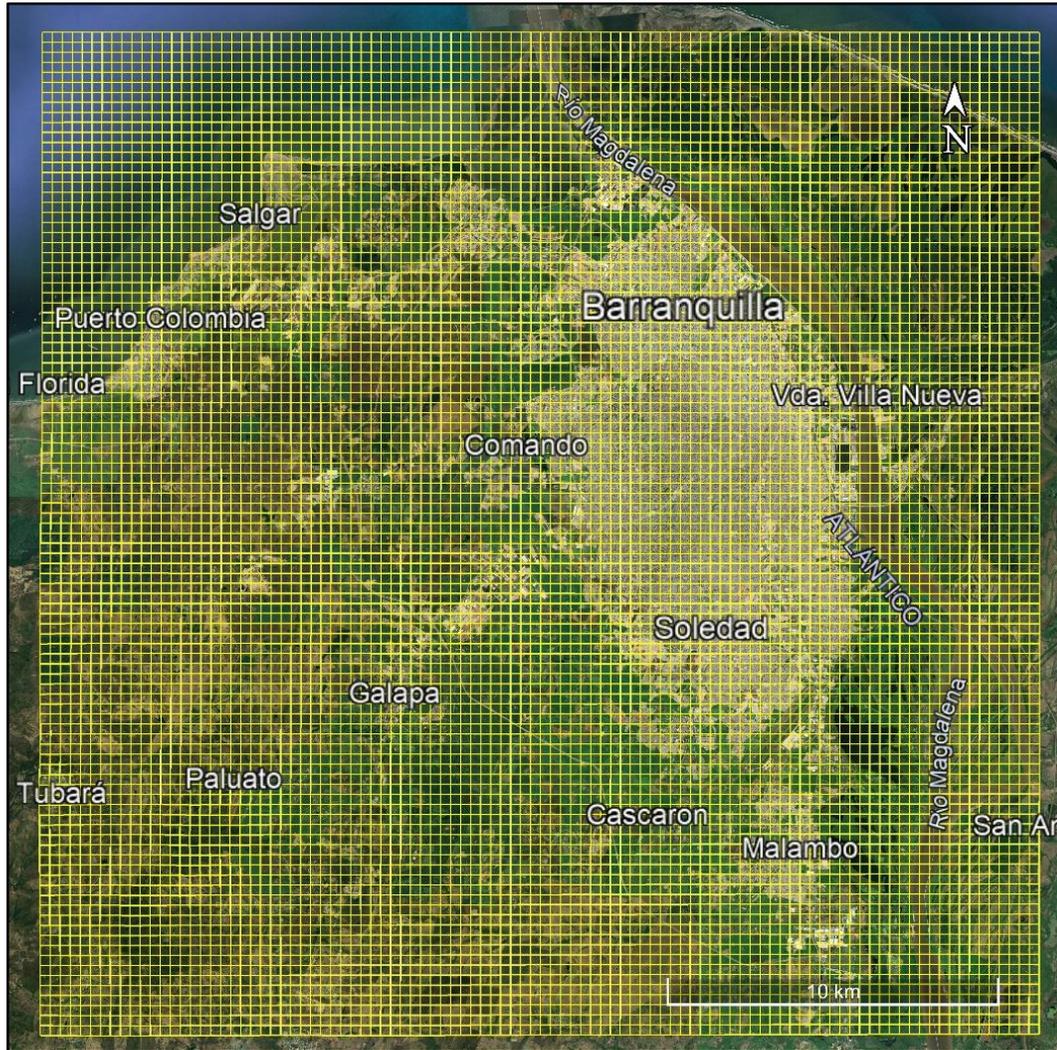


Figura 4. Malla de receptores

En la Figura 5 se muestra la configuración de la malla de receptores empleada para la Modelización.

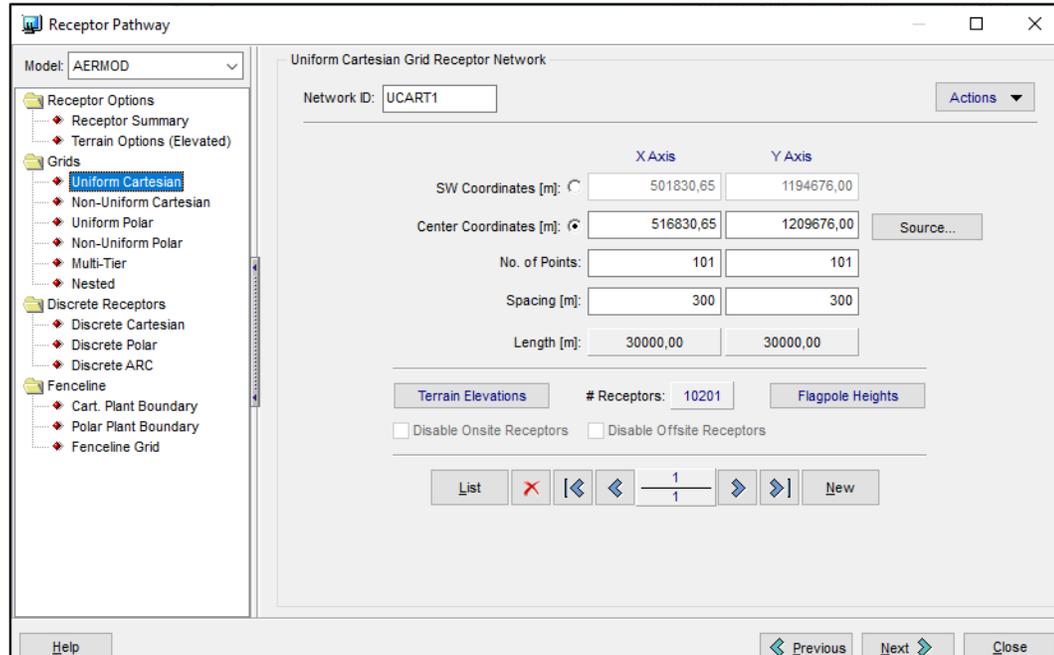


Figura 5. Configuración malla de receptores Coordenadas UTM 18N – predeterminadas del AERMOD VIEW 9.9.0

5.5 Receptores discretos - Estaciones del SVCA de la CRA

Como receptores discretos dentro del área de modelización se establecieron 7 estaciones del SVCA de la CRA, a continuación, se presentan las coordenadas de las estaciones, estas se encuentran distribuidas en los municipios de Malambo, Puerto Colombia y Soledad.

Tabla 2. Coordenadas estaciones SVCA-CRA

Estaciones SVCA-CRA	Geográficas		*Magna Sirgas	
	Norte	Oeste	Norte	Este
Malambo - PIMSA	10° 49' 53,17" N	74° 46' 11,84" W	2.755.473,292	4.806.582,859
Malambo – Secretaría tránsito	10° 51' 42,16" N	74° 46' 25,97" W	2.758.823,434	4.806.173,324
Soledad – Policía Hipódromo	10° 55' 38,88" N	74° 46' 17,81" W	2.766.092,901	4.806.463,576
Soledad - EDUMAS	10° 55' 15,75" N	74° 48' 49,04" W	2.765.409,677	4.801.868,780
Puerto Colombia - Alcaldía	10° 59' 16,79" N	74° 57' 34,01" W	2.772.913,492	4.785.980,511
Puerto Colombia - Bomberos	11° 0' 43,27" N	74° 56' 23,97" W	2.775.556,206	4.788.123,464

En la Figura 6 se presenta la distribución geográfica de las estaciones del SVCA de la CRA abarcando gran parte de la jurisdicción.



Figura 6. Receptores Discretos – SVCA - CRA

5.6 Meteorología de área de modelización

Las concentraciones a nivel del suelo como resultado de una descarga de contaminantes cambian según las condiciones (en particular las de viento) del clima. La información meteorológica es fundamental para Modelizar la dispersión de contaminantes, ya que es el factor principal que determina el efecto de dilución de la atmósfera. Para la ejecución del modelo, se utilizó como insumo la información secundaria obtenida mediante el Modelo Regional de Simulación Atmosférica (*Weather Research and Forecast – WRF*), desarrollado por el *National Center of Atmospheric Research* (NCAR) de Estados Unidos, para Colombia se tienen las siguientes características del modelo WRF:

- Resolución espacial de 6 km (distancia horizontal entre puntos de grilla) para todo el territorio nacional.

- Simulación explícita de las nubes con 5 tipos de hidrometeoros (vapor, agua líquida, nieve)
- Simulación de la radiación de onda corta y larga separada por once y dieciséis bandas respectivamente

En cuanto al uso de información meteorológica obtenida de modelos meteorológicos, la USEPA avala el uso de estas fuentes de información, lo cual puede ser verificado en la lista de programas de soporte relacionados con modelos publicada por la misma entidad; específicamente con el Programa de Interface del Modelo de Mesoescala (MMIF), el cual convierte datos meteorológicos pronosticados a formatos directos para el uso en modelos de dispersión, concretamente datos geofísicamente procesados por el Modelo de Mesoescala de 5 generación (MM5) y del modelo Weather Research and Forecasting (WRF).

Adicionalmente, se tiene el documento publicado por la USEPA Guía de implementación del AERMOD, el cual establece en el capítulo 3.4 Uso de información meteorológica pronosticada como entrada al AERMOD lo siguiente:

In recent years, interest has grown in the use of prognostic meteorological data, such as the Weather Research and Forecasting (WRF) model to create inputs for dispersion modeling with AERMOD. This is especially true in locations where it can be difficult to find an adequately representative NWS station or cost-prohibitive or infeasible to set up a site-specific meteorological monitoring tower. As part of the recent update to the Guideline on Air Quality Models (EPA,2017), the use of prognostic data is allowed for regulatory applications of AERMOD where it is cost-prohibitive or not feasible to collect site-specific data and there is no representative NWS or comparable station nearby. EPA developed the Mesoscale Model Interface Program, or MMIF for processing prognostic meteorological data for AERMOD (Environ, 2014).

Para el anterior párrafo se tiene la siguiente traducción.

En años recientes, el interés en el uso de información meteorológica pronosticada ha crecido, como el uso de la información del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) para crear entradas para modelos de dispersión con AERMOD. Eso es especialmente cierto en ubicaciones donde, puede ser difícil encontrar información adecuadamente representativa de una estación (NWS – equivalente al IDEAM) ó, sea costo-prohibitiva o inviable la ubicación de una torre de monitoreo en un sitio específico. Como parte de la reciente actualización de la guía de modelos de calidad del aire (EPA,2017), el uso de información pronosticada es permitida para aplicaciones regulatorias del AERMOD donde es costo-prohibitivo o no viable coleccionar información de campo y no existan estaciones representativas cerca. La USEPA desarrolló el Modelo de Programa de Interface del Modelo de Mesoescala (MMIF) para procesamiento de datos meteorológicos para el AERMOD (Environ, 2014).

Al revisar la información local disponible en la zona del proyecto, no se encontró información meteorológica representativa ni temporalmente ni espacialmente disponible en el IDEAM que permitiera una comparación entre las mediciones de campo y los datos WRF; con base en lo anteriormente expuesto y atendiendo a las recomendaciones y estándares internacionales, ante la ausencia de una directriz regulatoria nacional en la materia, se decide emplear la información meteorológica del modelo WRF para la ejecución del modelo de dispersión.

Finalmente, es de aclarar que, la herramienta AERMET VIEW permite realizar un análisis de calidad a la información meteorológica empleada para las modelizaciones, los reportes de estos análisis de calidad se presentan en el **Anexo 4 – Meteorología**.

Los datos aportados por el modelo WRF para el modelo de dispersión son:

Columna	Variable
1	Radiación horizontal extraterrestre
2	Radiación normal directa extraterrestre
3	Radiación horizontal global
4	Radiación normal directa
5	Radiación horizontal difusa
6	Cobertura de nubes total
7	Cobertura de nubes opacas
8	Temperatura bulbo seco
9	Temperatura punto rocío
10	Humedad relativa
11	Presión barométrica
12	Dirección del viento
13	Velocidad del viento
14	Visibilidad
15	Altura techo
16	Clima presente
17	Agua precipitable
18	Profundidad óptica de aerosol de banda ancha
19	Profundidad de nieve
20	Días desde la última nevada
21	Lluvia horaria acumulada y bandera

5.6.1 Superficie

De acuerdo con la Figura 2 dominio de Modelización, se observa que la superficie de este es homogénea, de una misma condición, predominantemente rural. Debido a lo anterior, se configura la superficie en el procesador AERMET con dos sectores, como se muestra a continuación.

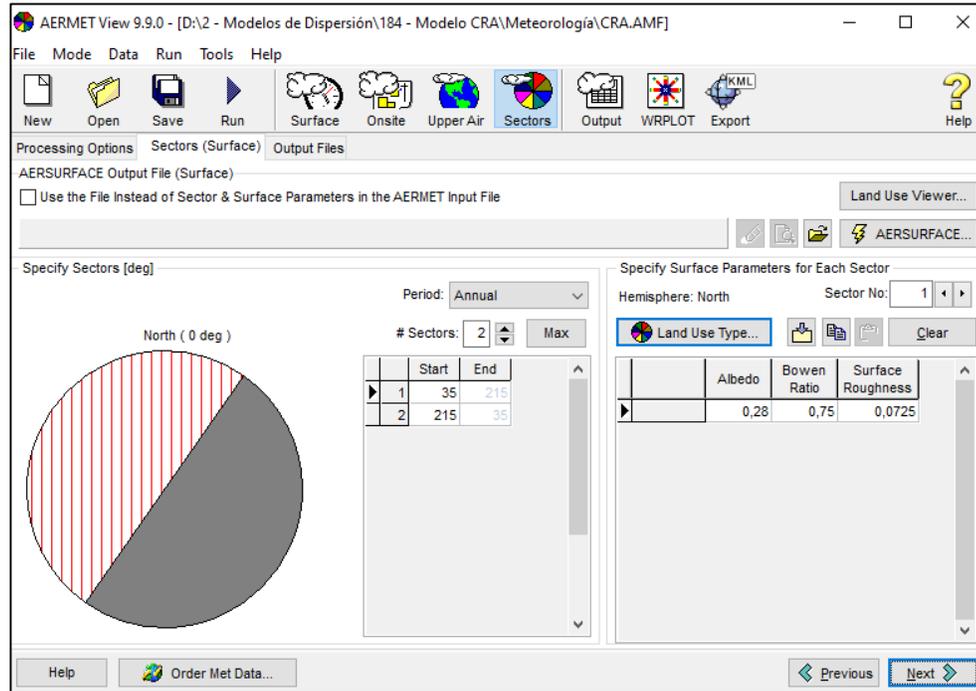


Figura 7. Sectores de Superficie Aermet View

Debido a esta configuración, se presentan valores específicos para las condiciones de Albedo, Bowen y Rugosidad, las cuales se describen a continuación.

5.6.2 Albedo

El albedo se define como el porcentaje de radiación solar que cualquier superficie refleja respecto de la radiación que incide sobre ella. Las superficies claras presentan valores de albedo superiores a las superficies oscuras. Así mismo las superficies brillantes presentan valores más altos que las que presentan tonos mate.

5.6.3 Bowen

Bowen se define como el radio utilizado para describir el tipo de transferencia de calor para una superficie que contiene características específicas de humedad.

5.6.4 Rugosidad

La rugosidad de una superficie se define como el conjunto de irregularidades que posee una superficie. La longitud de la rugosidad de una superficie se encuentra relacionada con la altura de los obstáculos presentes en el flujo del viento y es, en principio, la altura a la cual la media de la componente horizontal de la velocidad del viento es cero con base en un perfil logarítmico. La longitud de rugosidad influencia la tensión de corte superficial y es un factor importante para determinar la magnitud de la turbulencia mecánica la estabilidad de la capa de mezcla.

Para el dominio de Modelización establecido, se presentan a continuación los parámetros de superficie considerados para cada uno de los sectores configurados.

Tabla 3. Parámetros de Superficie

Sector	Albedo	Bowen	Rugosidad	Uso suelo
1	0,28	0,75	0,0725	Suelo cultivado
2	0,2075	1,625	1	Urbano

5.6.5 Upper Air (Capa Superior)

El software de Modelización AERMET realiza una estimación de las condiciones de la capa superior de vientos, para ello se configura la corrección horaria aplicable en el sector continental correspondiente al dominio de Modelización. Para el proyecto en desarrollo, se configuró la corrección de 5 horas oeste.

5.6.6 Condiciones meteorológicas 2020 - 2022

A continuación, se presentan las rosas de vientos correspondientes al periodo 2020 a 2022, en el **Anexo 10 – Meteorología** se presentan los análisis de las variables meteorológicas de forma anual y mensual.

5.6.7 Rosas del viento Año 2020 - 2022

A continuación, se presenta la rosa de viento generada con los datos obtenidos del modelo WRF para la zona de estudio en el periodo de tiempo del 1 de enero del 2020 al 31 de diciembre de 2022 para la zona de jurisdicción de la CRA.

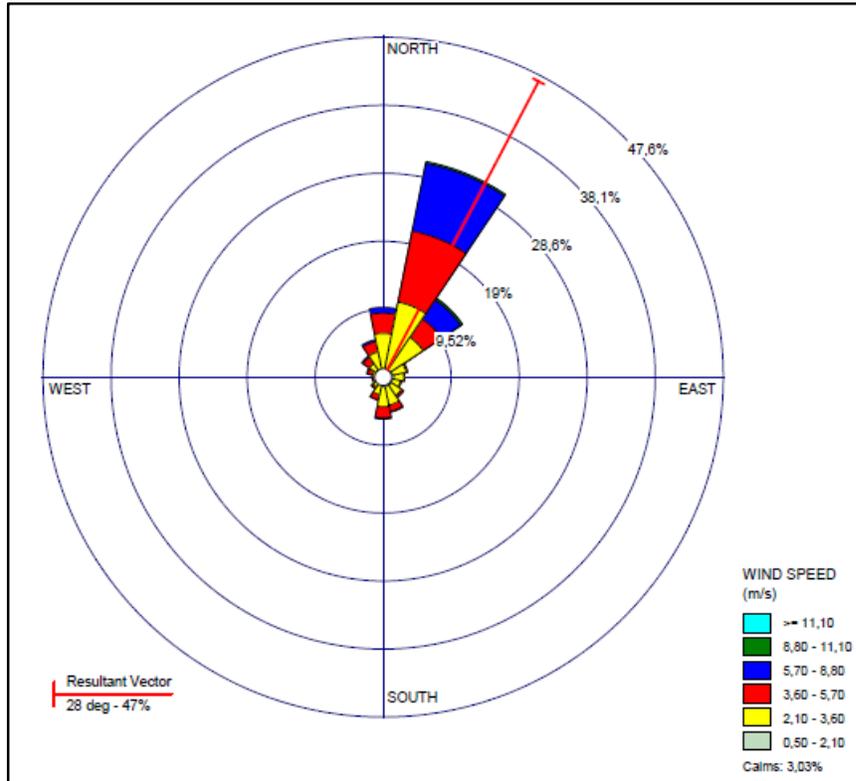


Figura 8. Rosa de Vientos años 2020 -2022

Se observa que la dirección predominante proveniente del nor-este, el vector resultante tiene una dirección 28 grados sobre el sentido nor-este.

A continuación, se presenta la figura de frecuencias de velocidad del viento.

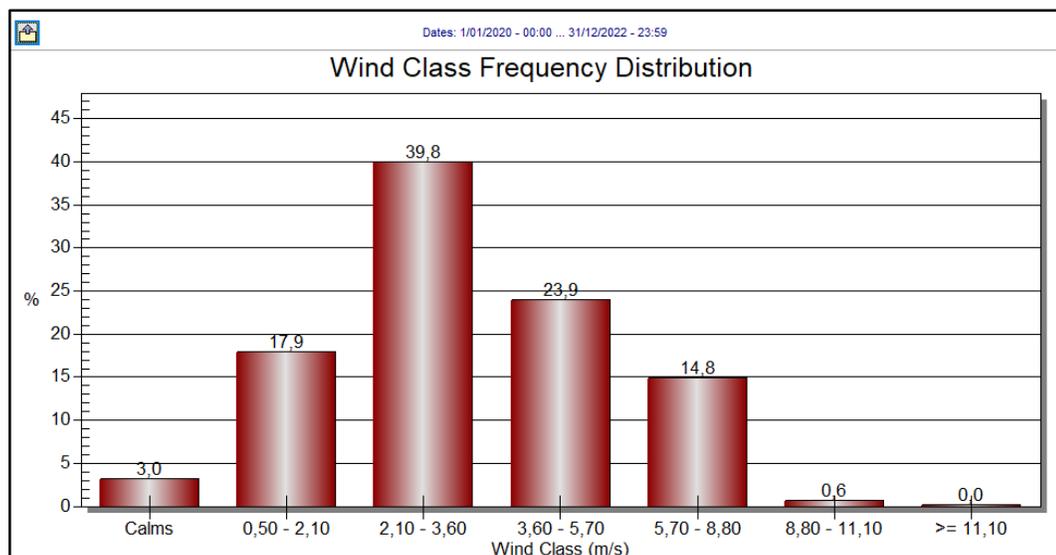


Figura 9. Frecuencias de velocidad del viento 2020 - 2022

Del análisis de esta información, se obtuvo que el 39,8% del tiempo se presentó una velocidad del viento entre 2,1 m/s y 3,6 m/s; 23,9% del tiempo se presentaron vientos entre 3,6 m/s y 5,7 m/s; 17,9% se presentaron vientos entre 0,5 m/s y 2,1 m/s finalmente se presentaron vientos calmos un 3,0%.

Se destaca el hecho que aproximadamente el 70% del tiempo se presentan vientos entre 2,1 m/s y 8,8 m/s situación que favorece la dispersión de los contaminantes generando menores concentraciones de estos en la atmosfera.

5.6.7.1 Rosa de viento Diurna

A continuación, se presenta la rosa de viento generada con los datos obtenidos del modelo WRF para la zona de estudio en el periodo de tiempo del 1 de enero del 2020 al 31 de diciembre de 2022, en el horario de 6:00 a 18:00, para la zona de jurisdicción de la CRA.

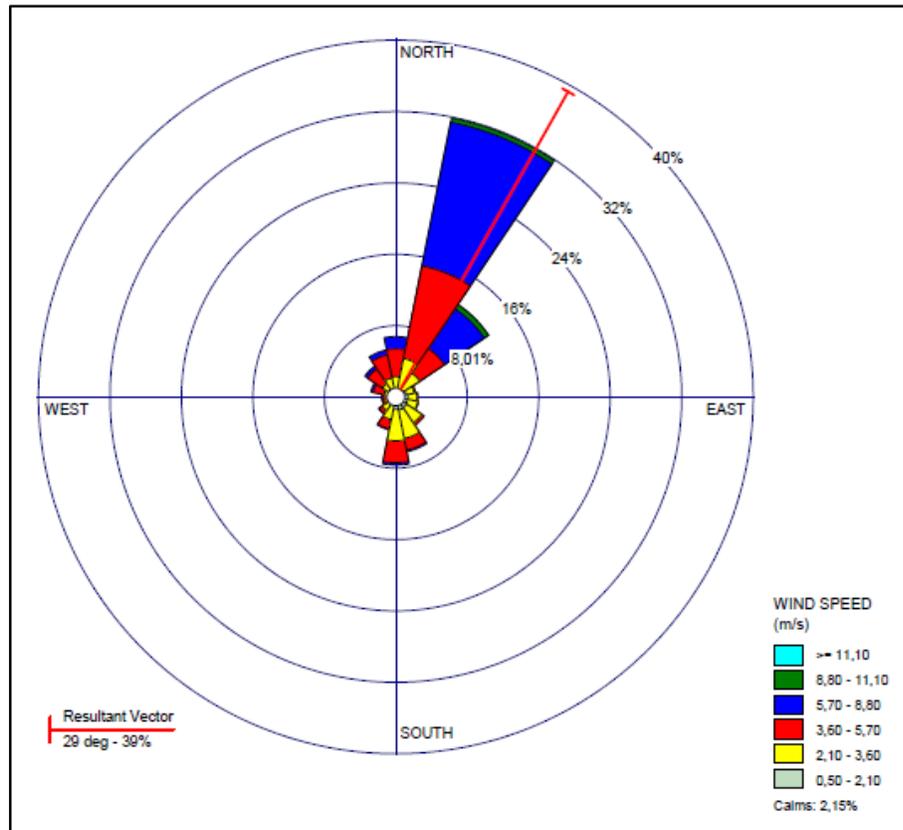


Figura 10. Rosa de Vientos año 2020 -2022 – Diurna

Se observa que la dirección predominante proveniente del nor-nor-este, el vector resultante tiene una dirección 29 grados sobre el sentido nor-este.

A continuación, se presenta la figura de frecuencias de velocidad del viento.

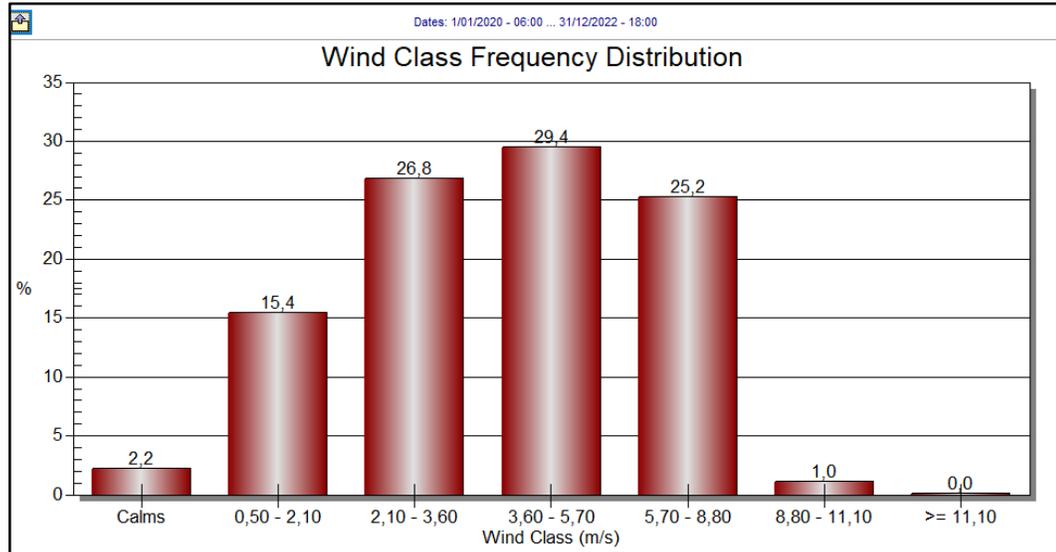


Figura 11. Frecuencias de velocidad del viento Diurno 2020 -2022

Del análisis de esta información, se obtuvo que el 26,8% del tiempo se presentó una velocidad del viento entre 2,1 m/s y 3,6 m/s; 29,4% del tiempo se presentaron vientos entre 3,6 m/s y 5,7 m/s; 15,4% se presentaron vientos entre 0,5 m/s y 2,1 m/s finalmente se presentaron vientos calmos un 2,2%.

Se destaca el hecho que aproximadamente el 70% del tiempo se presentan vientos entre 2,1 m/s y 8,8 m/s situación que favorece la dispersión de los contaminantes generando menores concentraciones de estos en la atmosfera.

5.6.7.2 Rosa de viento Nocturna

A continuación, se presenta la rosa de viento generada con los datos obtenidos del modelo WRF para la zona de estudio en el periodo de tiempo del 1 de enero del 2020 al 31 de diciembre de 2022, en el horario de 18:00 a 6:00 para la zona de jurisdicción de la CRA.

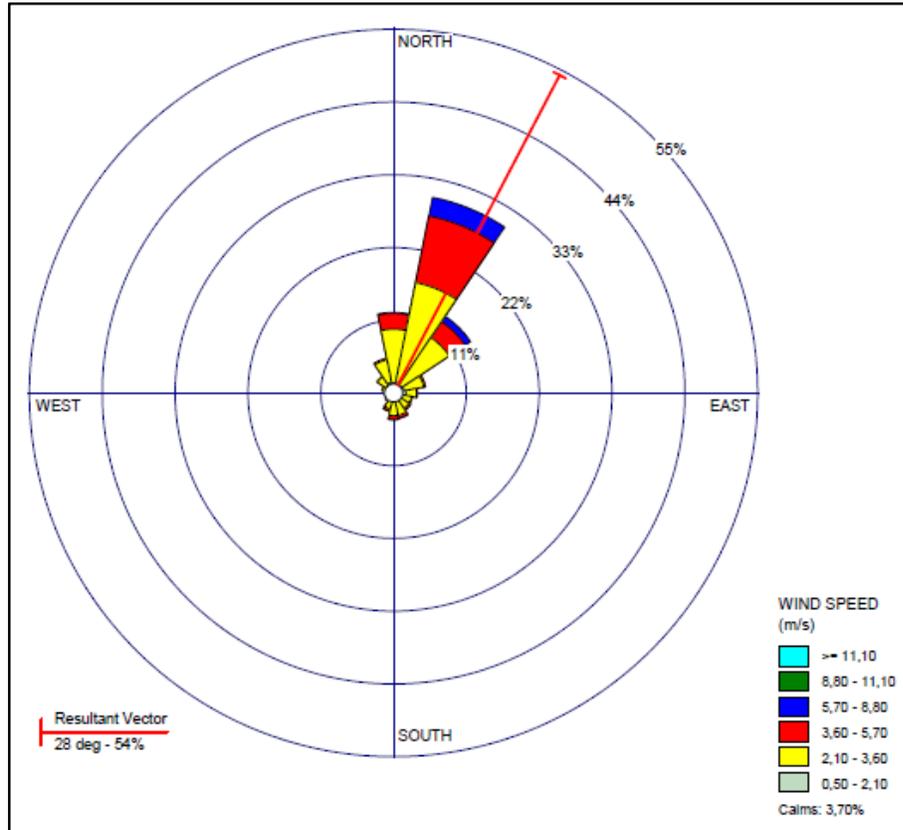


Figura 12. Rosa de Vientos año 2020 -2022 – Nocturna

Se observa que la dirección predominante proveniente del nor-este, el vector resultante tiene una dirección 28 grados sobre el sentido nor-este.

A continuación, se presenta la figura de frecuencias de velocidad del viento.

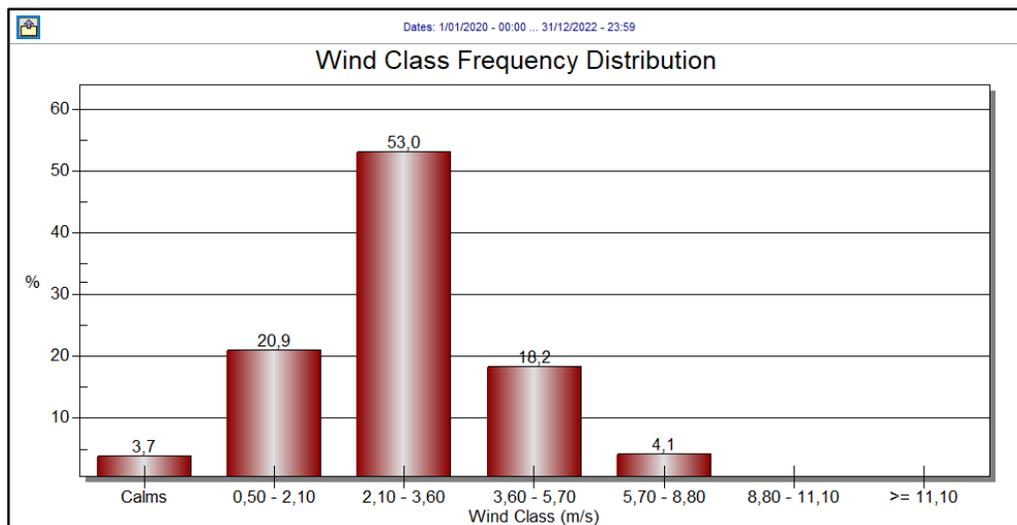


Figura 13. Frecuencias de velocidad del viento Nocturno 2020 -2022

Del análisis de esta información, se obtuvo que el 53% del tiempo se presentó una velocidad del viento entre 2,1 m/s y 3,6 m/s; 18,2% del tiempo se presentaron vientos entre 3,6 m/s y 5,7 m/s; 20,9% se presentaron vientos entre 0,5 m/s y 2,1 m/s finalmente se presentaron vientos calmos un 3,7%.

Se destaca el hecho que aproximadamente el 70% del tiempo se presentan vientos entre 2,1 m/s y 8,8 m/s situación que favorece la dispersión de los contaminantes generando menores concentraciones de estos en la atmosfera.

5.6.8 Variables Meteorológicas - Estadística Descriptiva

A continuación, se presenta una tabla resumen de las variables meteorológicas tenidas en cuenta en la Modelización en promedio del año 2020 al 2022, en el **Anexo 10 – Meteorología** se presentan los análisis realizados mensual y multianual.

Tabla 4. Variables meteorológicas promedios mensuales 2020 - 2022

ANÁLISIS MENSUAL									
Mes		Temperatura bulbo seco (°C)	Temperatura bulbo humedo (°C)	Humedad relativa (%)	Presion Barométrica (mmHg)	Dirección del viento (°)	velocidad del viento (m/s)	Radiación (w/m2)	Nubosidad (Decimas cielo Cubierto)
Enero	Mínima	19,50	17,20	42,00	745,50	0,00	0,20	0,00	0
	Media	26,09	21,33	76,37	749,35	47,43	4,31	263,63	0
	Máxima	33,40	24,50	100,00	753,75	359,00	10,60	965,00	10
Febrero	Mínima	19,80	16,20	35,00	744,75	0,00	0,10	0,00	0
	Media	26,58	21,19	73,77	749,02	41,18	4,76	293,49	0
	Máxima	34,90	24,60	100,00	753,00	359,00	11,30	1038,00	10
Marzo	Mínima	19,30	14,70	33,00	745,50	0,00	0,20	0,00	0
	Media	26,67	21,39	74,23	749,33	38,43	4,80	306,93	0
	Máxima	33,80	24,20	100,00	759,75	359,00	10,30	1078,00	10
Abril	Mínima	20,40	18,70	42,00	744,75	0,00	0,00	0,00	0
	Media	27,24	22,90	78,36	749,09	82,12	3,81	275,59	1
	Máxima	35,00	25,40	100,00	753,00	359,00	9,50	1064,00	10
Mayo	Mínima	21,90	18,30	38,00	746,25	0,00	0,00	0,00	0
	Media	27,65	23,68	80,19	749,44	126,76	3,15	268,96	1
	Máxima	36,30	26,50	100,00	753,75	359,00	8,40	1036,00	10
Junio	Mínima	21,40	18,60	44,00	746,25	0,00	0,00	0,00	0
	Media	26,81	23,51	82,90	749,83	158,57	2,81	244,54	2
	Máxima	35,20	26,40	100,00	753,00	359,00	8,50	1003,00	10
Julio	Mínima	20,80	19,50	41,00	746,25	0,00	0,10	0,00	0
	Media	26,90	23,56	82,86	749,44	126,06	2,96	269,77	1

ANÁLISIS MENSUAL									
Mes		Temperatura bulbo seco (°C)	Temperatura bulbo humedo (°C)	Humedad relativa (%)	Presion Barométrica (mmHg)	Dirección del viento (°)	velocidad del viento (m/s)	Radiación (w/m2)	Nubosidad (Decimas cielo Cubierto)
	Máxima	34,20	25,80	100,00	752,25	359,00	9,70	1020,00	10
Agosto	Mínima	20,80	17,50	42,00	744,75	0,00	0,10	0,00	0
	Media	26,78	23,56	83,36	749,54	162,04	2,84	257,06	2
	Máxima	35,00	26,40	100,00	753,00	359,00	7,80	1040,00	10
Septiembre	Mínima	20,70	20,10	50,00	745,50	0,00	0,10	0,00	0
	Media	26,60	23,68	84,57	749,54	195,82	2,68	252,95	2
	Máxima	33,90	26,80	100,00	753,00	359,00	8,60	1034,00	10
Octubre	Mínima	19,70	19,50	49,00	745,50	0,00	0,00	0,00	0
	Media	26,32	23,41	84,62	749,30	193,03	2,71	249,81	1
	Máxima	33,50	26,20	100,00	753,00	359,00	7,10	1012,00	10
Noviembre	Mínima	20,80	19,40	55,00	746,25	0,00	0,10	0,00	0
	Media	25,76	23,23	86,41	749,43	152,77	2,74	220,58	2
	Máxima	32,50	26,20	100,00	753,75	359,00	7,50	951,00	10
Diciembre	Mínima	18,50	17,20	47,00	746,25	0,00	0,10	0,00	0
	Media	25,79	22,11	81,01	749,27	61,35	3,42	248,93	0
	Máxima	32,40	25,70	100,00	753,00	359,00	8,60	915,00	10

A continuación, se presenta el resumen gráfico de la información contenida en las tablas, respecto de los promedios mensuales

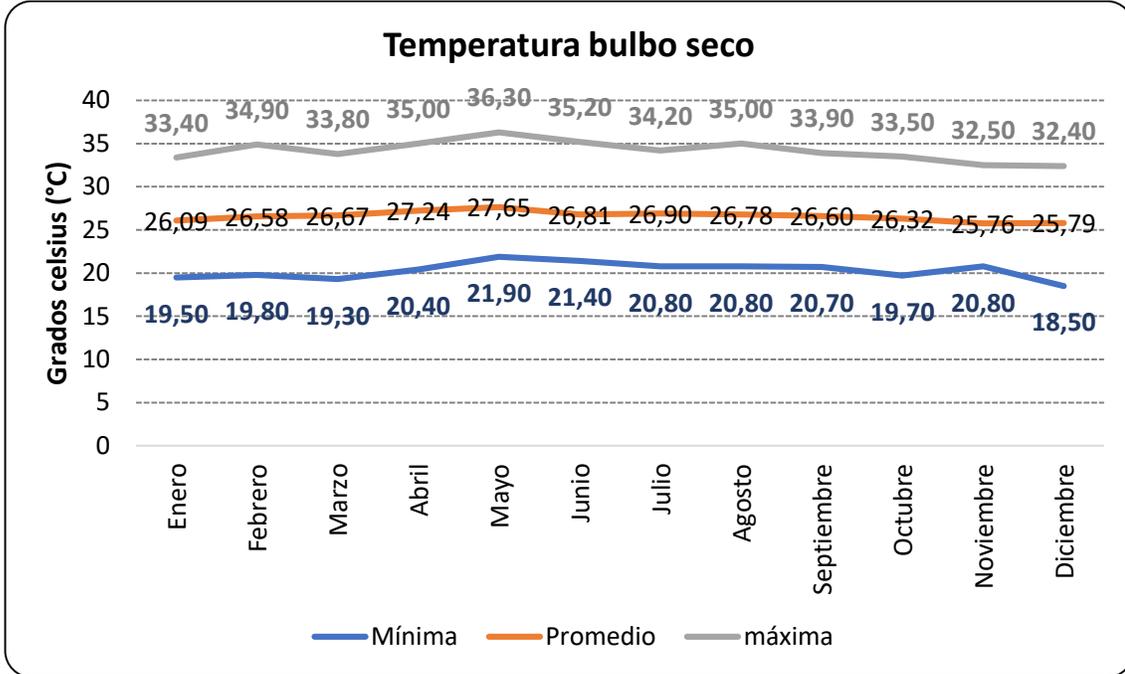


Figura 14. Temperatura Bulbo Seco promedio mensual 2020 – 2022

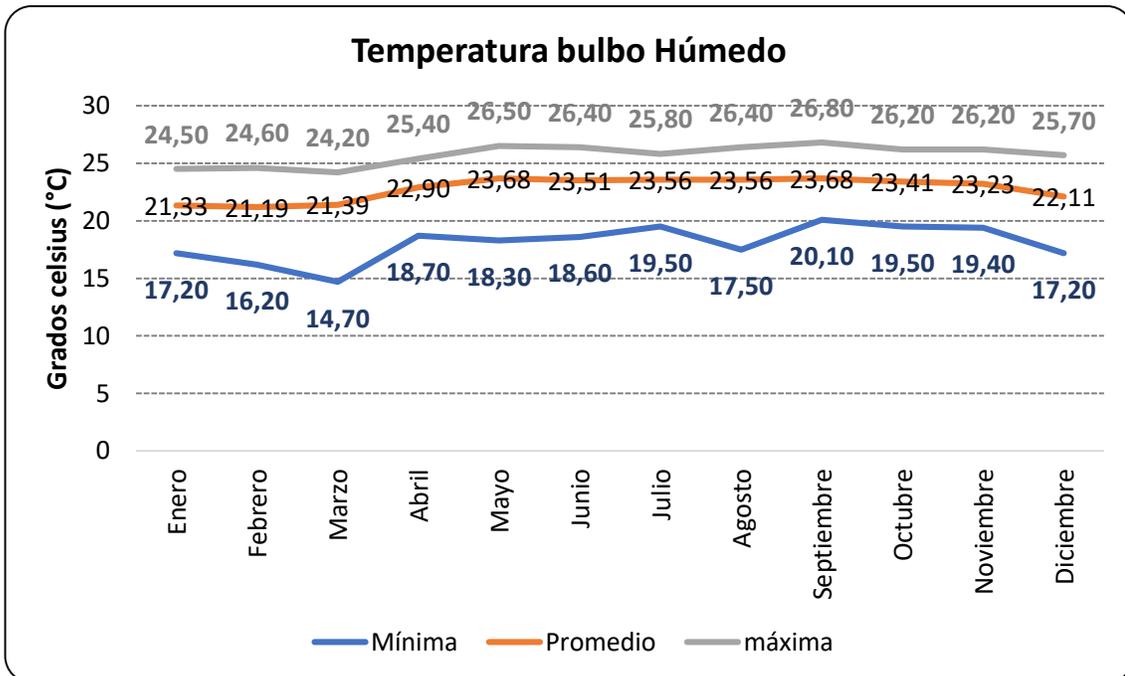


Figura 15. Temperatura Bulbo Húmedo promedio mensual 2020 - 2022

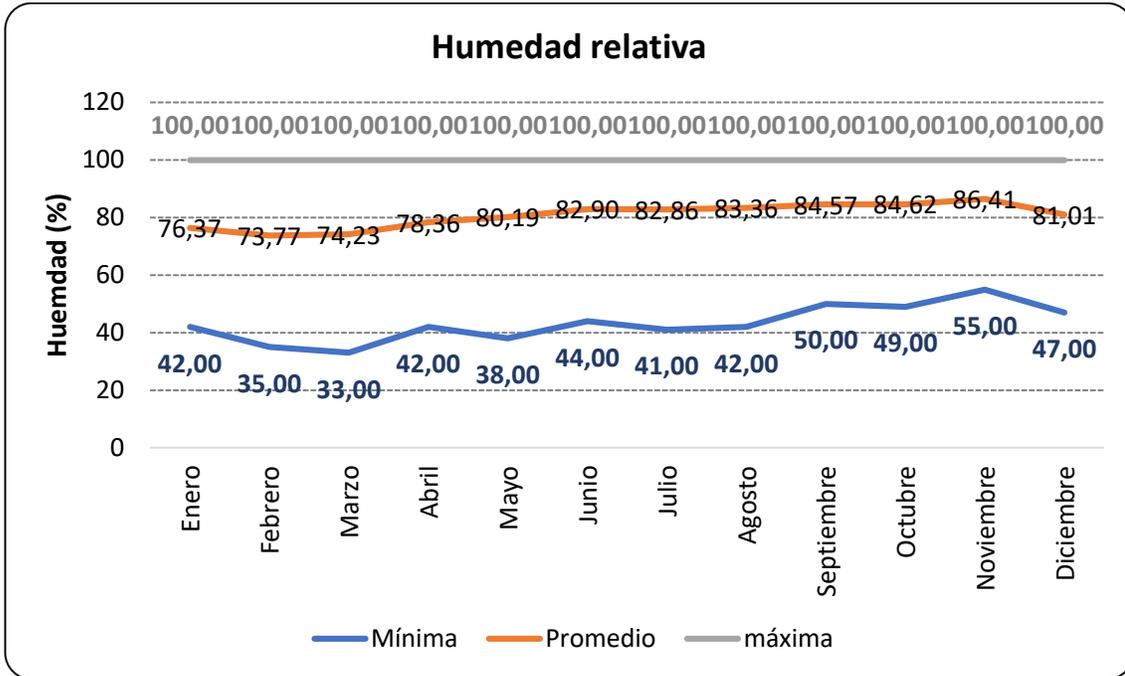


Figura 16. Humedad Relativa promedio mensual 2020 - 2022

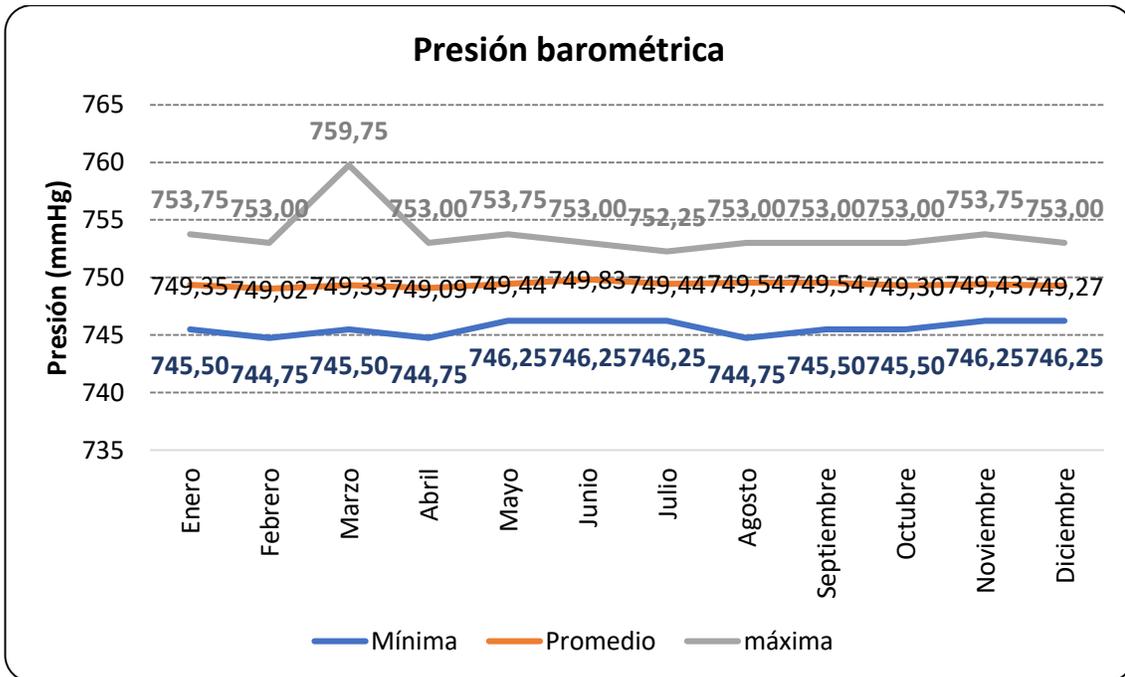


Figura 17. Presión Barométrica promedio mensual 2020 - 2022

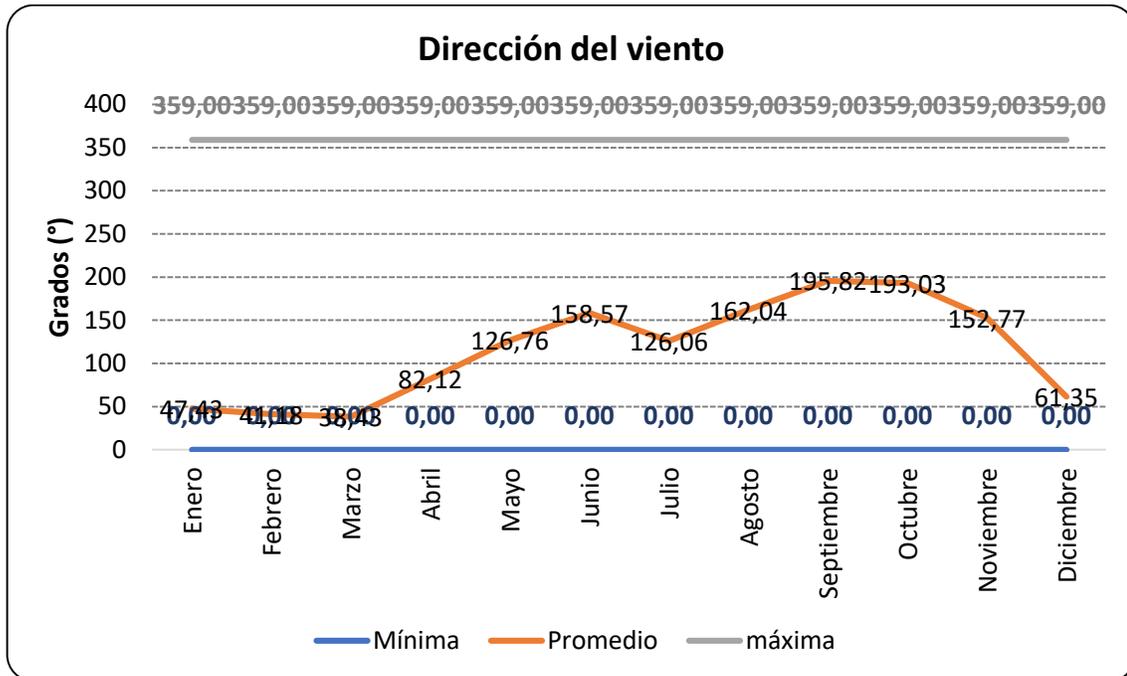


Figura 18. Dirección del Viento promedio mensual 2020 - 2022

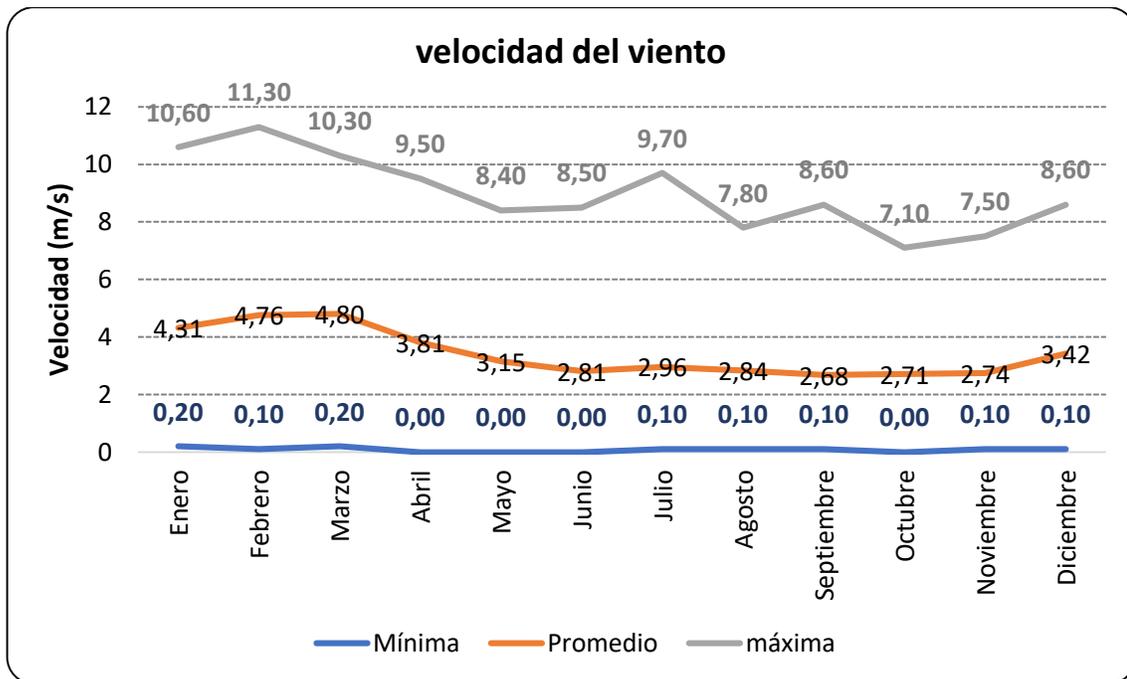


Figura 19. Velocidad del Viento promedio mensual 2020 - 2022

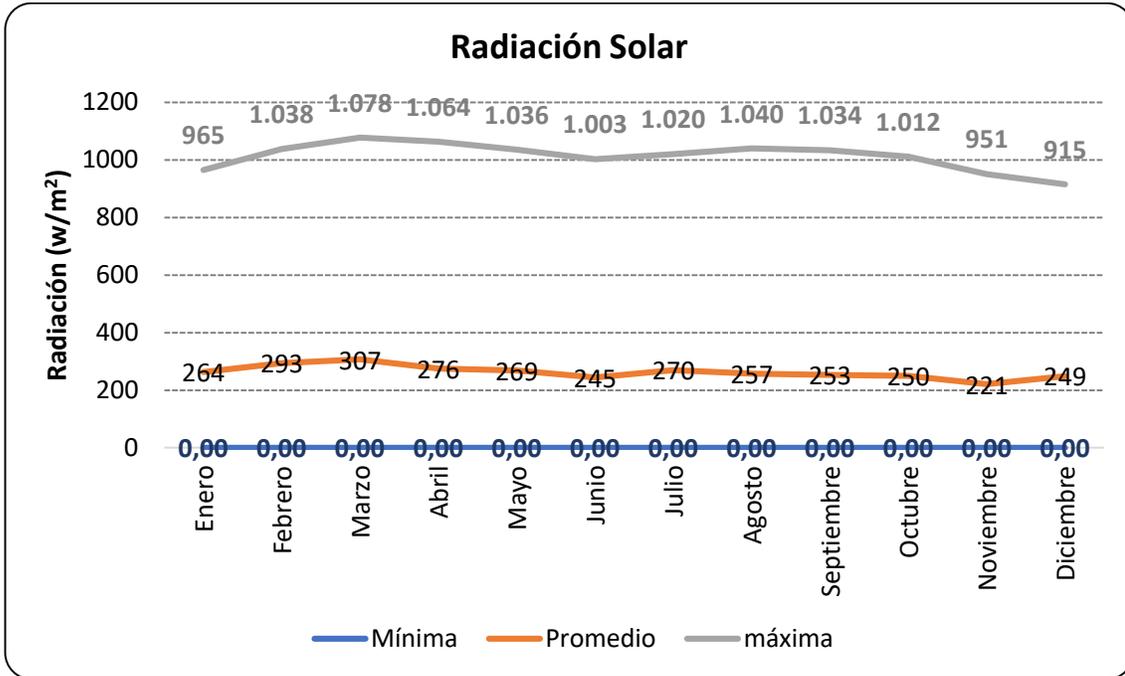


Figura 20. Radiación promedio mensual 2020 - 2022

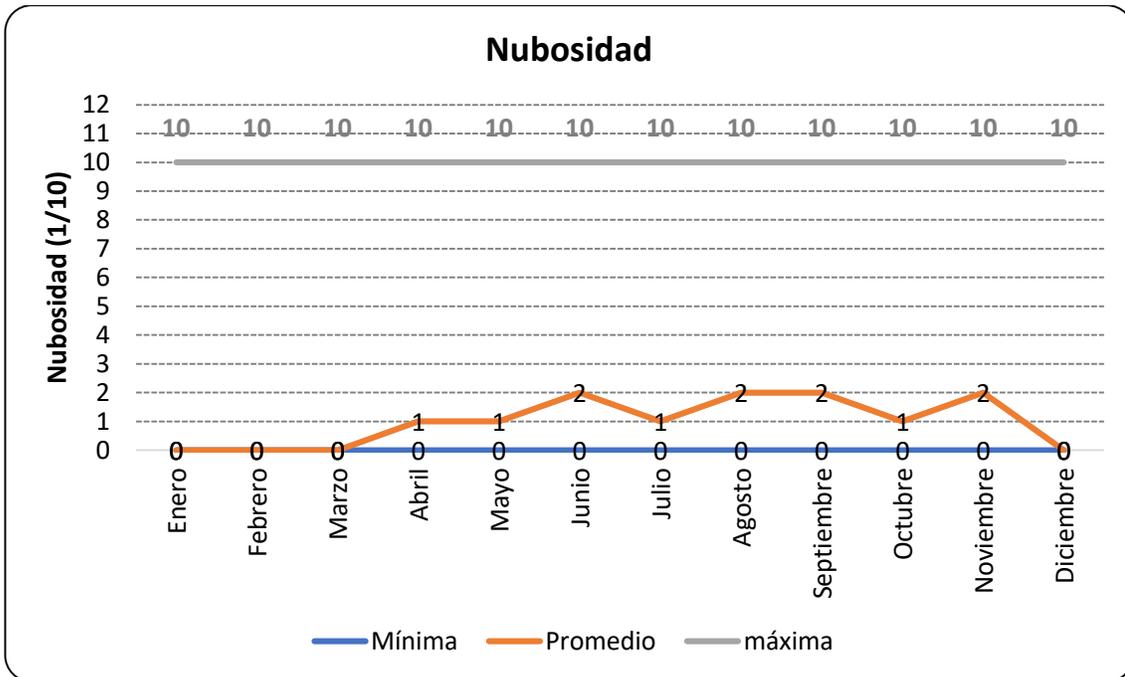


Figura 21. Nubosidad promedio mensual 2020 - 2022

Para los promedios horarios, se realiza el siguiente análisis de la información disponible:

Tabla 5. Variables meteorológicas promedios horarios 2020 - 2022

ANÁLISIS HORARIO									
Hora		Temperatura bulbo seco (°C)	Temperatura bulbo húmedo (°C)	Humedad relativa (%)	Presión Barométrica (mmHg)	Dirección del viento (°)	velocidad del viento (m/s)	Radiación (w/m2)	Nubosidad (Decimas cielo Cubierto)
1	Mínima	19,20	17,50	67,00	745,50	0,00	0,00	0,00	0,00
	Media	24,34	22,79	90,79	749,37	125,82	2,47	0,00	0,79
	Máxima	27,60	26,20	100,00	758,25	359,00	7,40	0,00	10,00
2	Mínima	18,50	17,60	70,00	745,50	0,00	0,10	0,00	0,00
	Media	24,00	22,67	92,03	748,87	121,70	2,40	0,00	0,89
	Máxima	27,50	26,40	100,00	758,25	359,00	7,10	0,00	10,00
3	Mínima	18,80	17,80	71,00	745,50	0,00	0,10	0,00	0,00
	Media	23,64	22,54	93,26	748,96	121,60	2,31	0,00	0,89
	Máxima	26,70	26,20	100,00	758,25	359,00	6,80	0,00	10,00
4	Mínima	18,70	18,10	73,00	745,50	0,00	0,20	0,00	0,00
	Media	23,37	22,41	94,03	749,18	117,74	2,23	0,00	0,89
	Máxima	26,50	25,90	100,00	758,25	358,00	6,70	0,00	10,00
5	Mínima	18,90	17,90	76,00	745,50	0,00	0,00	0,00	0,00
	Media	23,10	22,24	94,58	749,41	118,62	2,17	0,00	0,97
	Máxima	26,50	26,00	100,00	758,25	359,00	5,90	0,00	10,00
6	Mínima	19,20	17,60	71,00	746,25	0,00	0,10	0,00	0,00
	Media	23,24	22,36	94,50	749,71	118,59	2,12	10,77	1,01
	Máxima	27,20	26,40	100,00	758,25	359,00	6,60	57,00	10,00
7	Mínima	20,20	18,20	56,00	746,25	0,00	0,00	9,00	0,00
	Media	25,28	22,92	86,72	750,29	114,40	2,69	174,31	0,89
	Máxima	28,90	26,40	100,00	759,00	357,00	7,80	283,00	10,00
8	Mínima	22,10	17,10	46,00	747,00	1,00	0,20	24,00	0,00
	Media	27,00	22,83	78,05	750,80	116,55	3,11	410,93	0,71
	Máxima	30,80	26,30	99,00	759,75	359,00	9,20	521,00	10,00
9	Mínima	22,70	16,60	46,00	747,00	1,00	0,10	32,00	0,00
	Media	28,51	22,50	70,11	750,71	116,23	3,22	622,90	0,55
	Máxima	33,30	26,10	98,00	759,75	359,00	9,60	740,00	10,00
10	Mínima	23,30	15,90	41,00	747,00	0,00	0,00	17,00	0,00
	Media	29,73	22,19	64,13	750,65	122,13	3,19	781,02	0,60
	Máxima	34,50	25,90	97,00	759,75	359,00	9,70	912,00	10,00
11	Mínima	21,80	14,70	34,00	747,00	0,00	0,20	39,00	0,00
	Media	30,63	22,04	60,37	750,34	131,75	3,36	864,12	0,79
	Máxima	35,40	26,40	99,00	759,75	359,00	9,40	1025,00	10,00
12	Mínima	22,30	15,40	33,00	746,25	0,00	0,20	47,00	0,00

ANÁLISIS HORARIO									
Hora		Temperatura bulbo seco (°C)	Temperatura bulbo húmedo (°C)	Humedad relativa (%)	Presión Barométrica (mmHg)	Dirección del viento (°)	velocidad del viento (m/s)	Radiación (w/m ²)	Nubosidad (Decimas cielo Cubierto)
	Media	31,01	22,17	59,53	749,80	139,84	3,81	863,14	1,16
	Máxima	36,30	26,60	98,00	759,00	359,00	9,50	1078,00	10,00
13	Mínima	23,80	16,40	40,00	745,50	0,00	0,10	0,00	0,00
	Media	30,83	22,54	61,63	749,08	138,24	4,46	793,37	1,99
	Máxima	36,10	26,50	99,00	758,25	359,00	9,60	1048,00	10,00
14	Mínima	23,30	16,60	39,00	745,50	0,00	0,20	18,00	0,00
	Media	30,26	22,88	65,19	748,34	127,28	5,30	678,02	2,57
	Máxima	35,00	26,80	99,00	757,50	359,00	11,00	939,00	10,00
15	Mínima	22,80	16,40	37,00	744,75	0,00	0,30	12,00	0,00
	Media	29,73	23,07	67,83	748,15	124,00	5,69	549,30	2,55
	Máxima	34,20	26,50	99,00	757,50	359,00	11,20	760,00	10,00
16	Mínima	23,10	17,70	46,00	744,75	0,00	0,30	6,00	0,00
	Media	29,02	23,20	71,03	748,04	114,67	5,95	369,89	1,82
	Máxima	33,00	26,20	99,00	757,50	359,00	11,30	524,00	10,00
17	Mínima	22,20	19,10	50,00	744,75	0,00	0,70	3,00	0,00
	Media	27,96	23,39	76,16	748,05	108,07	5,63	172,06	1,39
	Máxima	31,50	26,40	99,00	756,75	359,00	11,00	290,00	10,00
18	Mínima	22,00	19,80	55,00	744,75	0,00	0,20	0,00	0,00
	Media	26,40	23,54	84,04	748,26	103,05	4,22	13,21	0,94
	Máxima	30,10	26,30	100,00	756,75	359,00	9,00	64,00	10,00
19	Mínima	21,70	19,00	62,00	745,50	0,00	0,50	0,00	0,00
	Media	25,62	23,08	85,63	748,90	82,25	3,38	0,00	0,50
	Máxima	29,50	25,70	99,00	756,75	359,00	8,30	0,00	10,00
20	Mínima	21,50	19,00	60,00	746,25	0,00	0,20	0,00	0,00
	Media	25,24	23,18	88,05	749,39	85,67	3,07	0,00	0,57
	Máxima	28,70	26,10	99,00	758,25	359,00	8,10	0,00	10,00
21	Mínima	21,30	18,40	61,00	746,25	0,00	0,40	0,00	0,00
	Media	25,09	23,33	89,68	749,58	87,66	2,96	0,00	0,65
	Máxima	28,00	26,30	100,00	759,00	359,00	8,10	0,00	10,00
22	Mínima	21,20	18,40	60,00	746,25	0,00	0,20	0,00	0,00
	Media	24,95	23,29	90,25	749,80	102,41	2,79	0,00	0,72
	Máxima	28,00	26,30	100,00	758,25	359,00	7,70	0,00	10,00
23	Mínima	20,80	17,50	63,00	746,25	0,00	0,20	0,00	0,00
	Media	24,81	23,12	90,11	749,84	115,55	2,77	0,00	0,81

ANÁLISIS HORARIO									
Hora		Temperatura bulbo seco (°C)	Temperatura bulbo húmedo (°C)	Humedad relativa (%)	Presión Barométrica (mmHg)	Dirección del viento (°)	velocidad del viento (m/s)	Radiación (w/m2)	Nubosidad (Decimas cielo Cubierto)
	Máxima	28,30	26,30	100,00	758,25	359,00	7,20	0,00	10,00
24	Mínima	20,60	16,90	66,00	746,25	0,00	0,10	0,00	0,00
	Media	24,61	22,93	90,19	749,66	121,84	2,58	0,00	0,82
	Máxima	27,80	26,30	100,00	759,00	359,00	7,70	0,00	10,00

A continuación, se presenta el resumen gráfico de la información contenida en las tablas

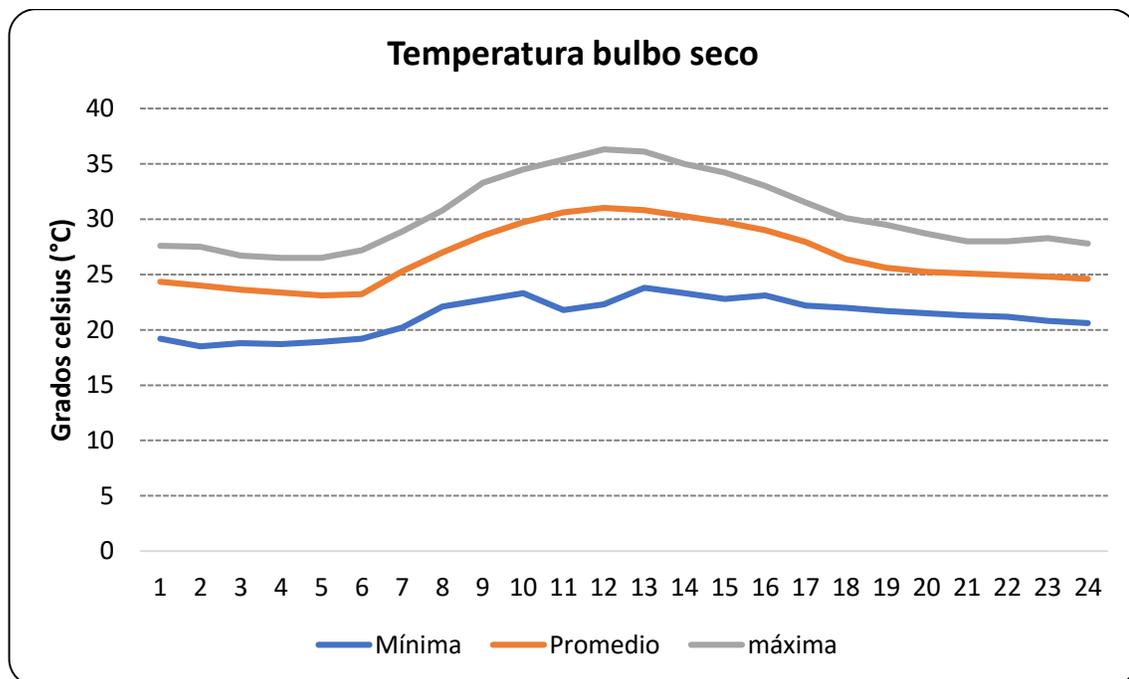


Figura 22. Temperatura Bulbo Seco promedio horaria 2020 – 2022

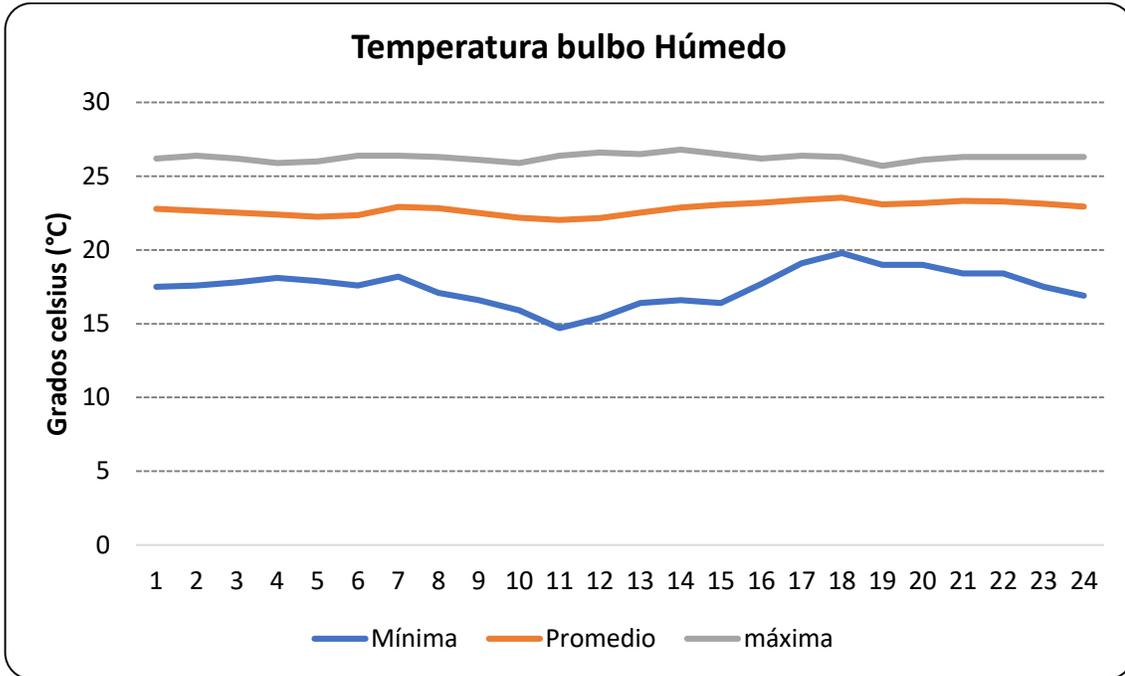


Figura 23. Temperatura Bulbo Húmedo promedio horaria 2020 – 2022

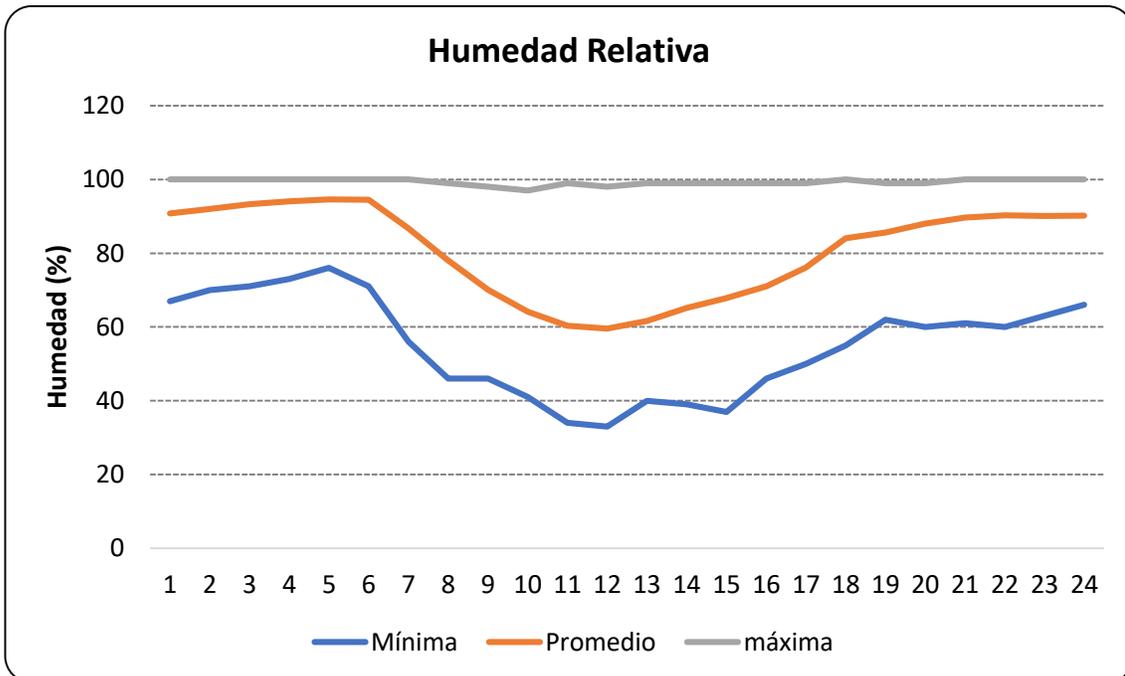


Figura 24. Humedad Relativa promedio horaria 2020 - 2022

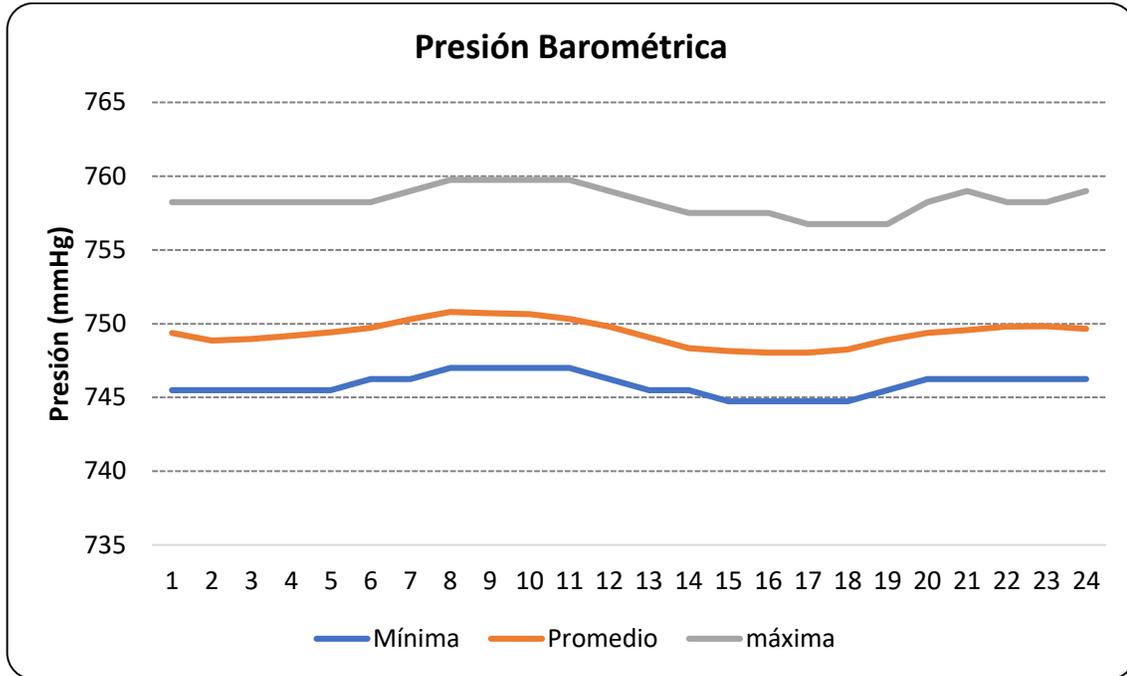


Figura 25. Presión Barométrica promedio horaria 2020 - 2022

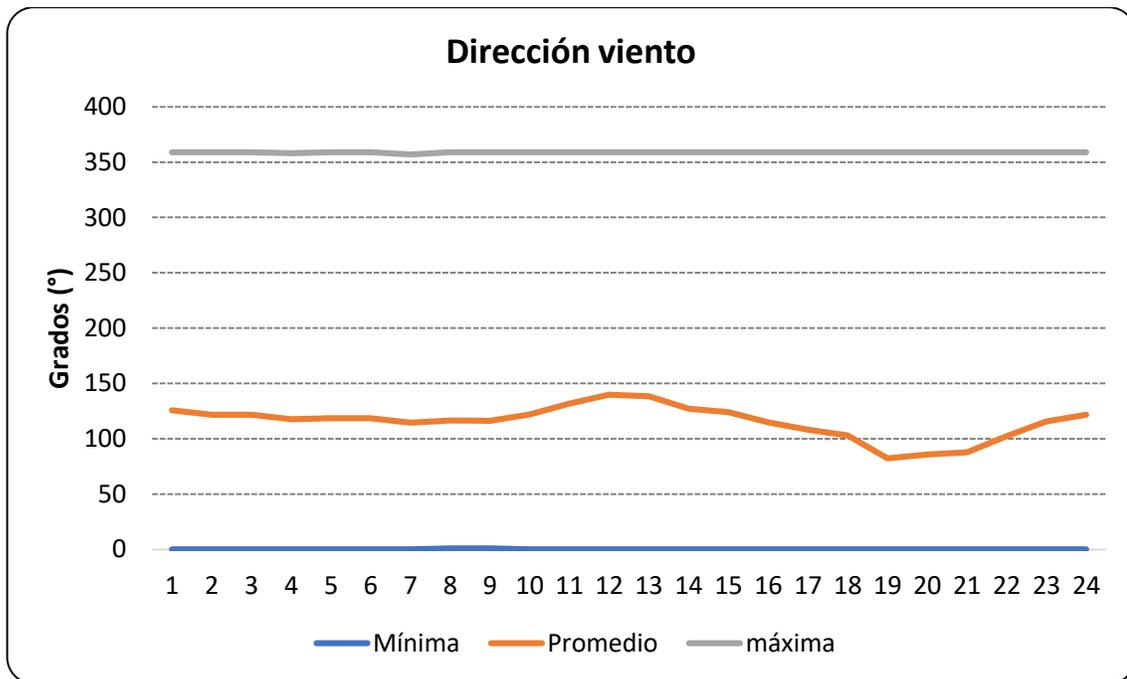


Figura 26. Dirección del Viento promedio horaria 2020 - 2022

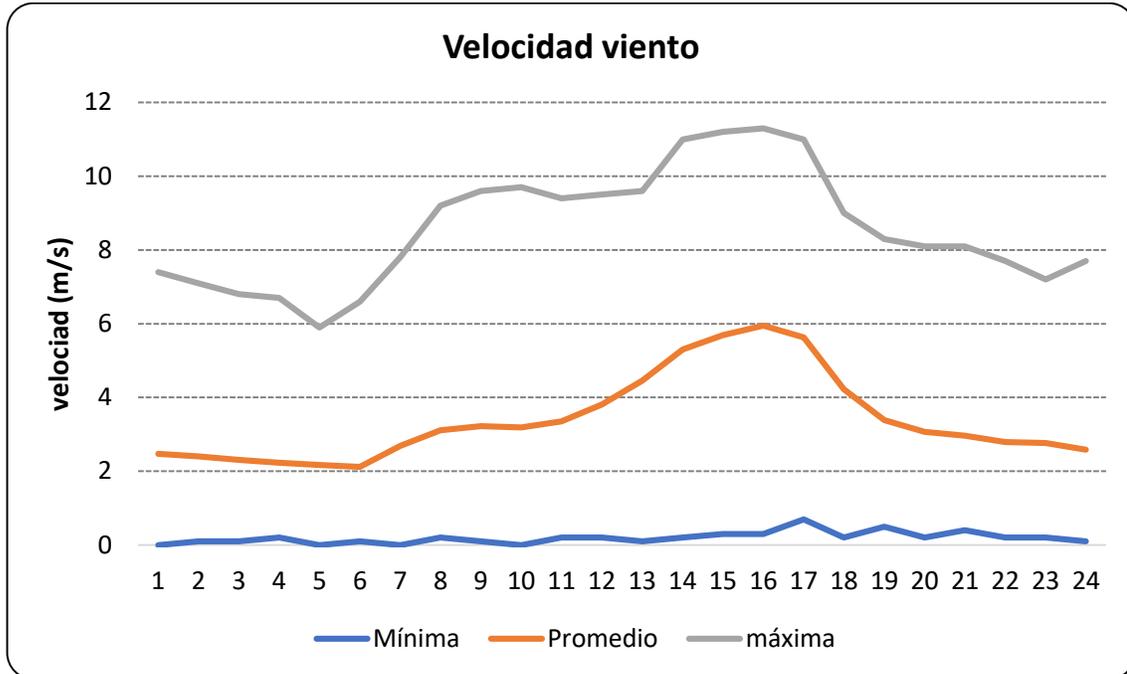


Figura 27. Velocidad del Viento promedio horaria 2020 - 2022

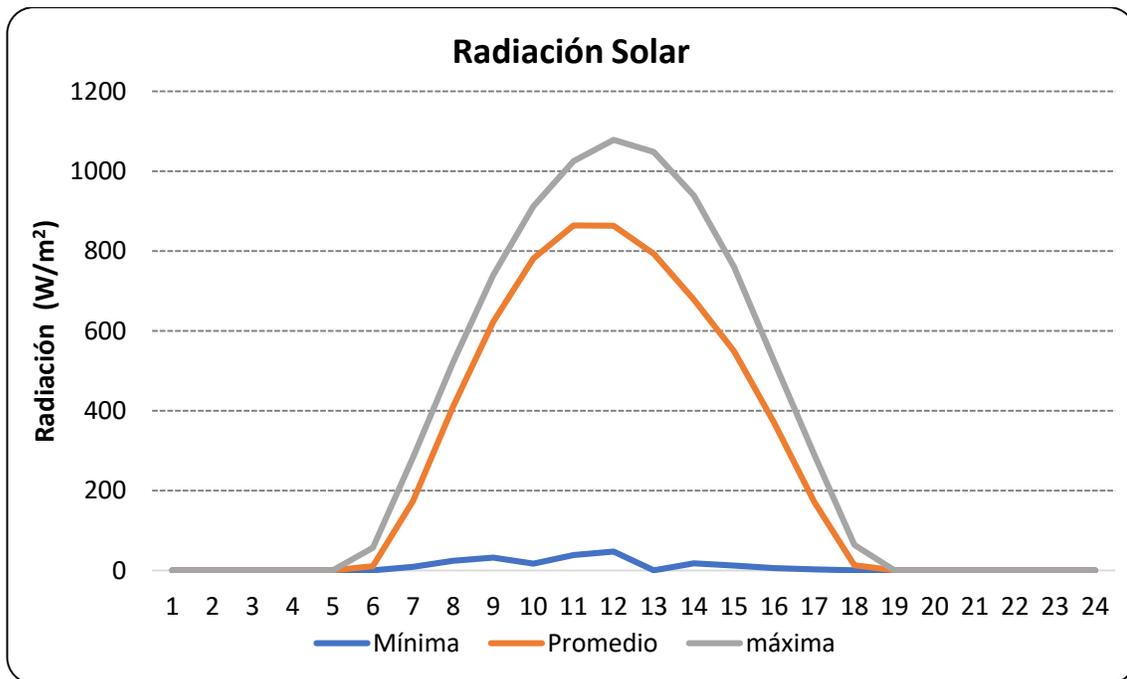


Figura 28. Radiación promedio horaria 2020 - 2022

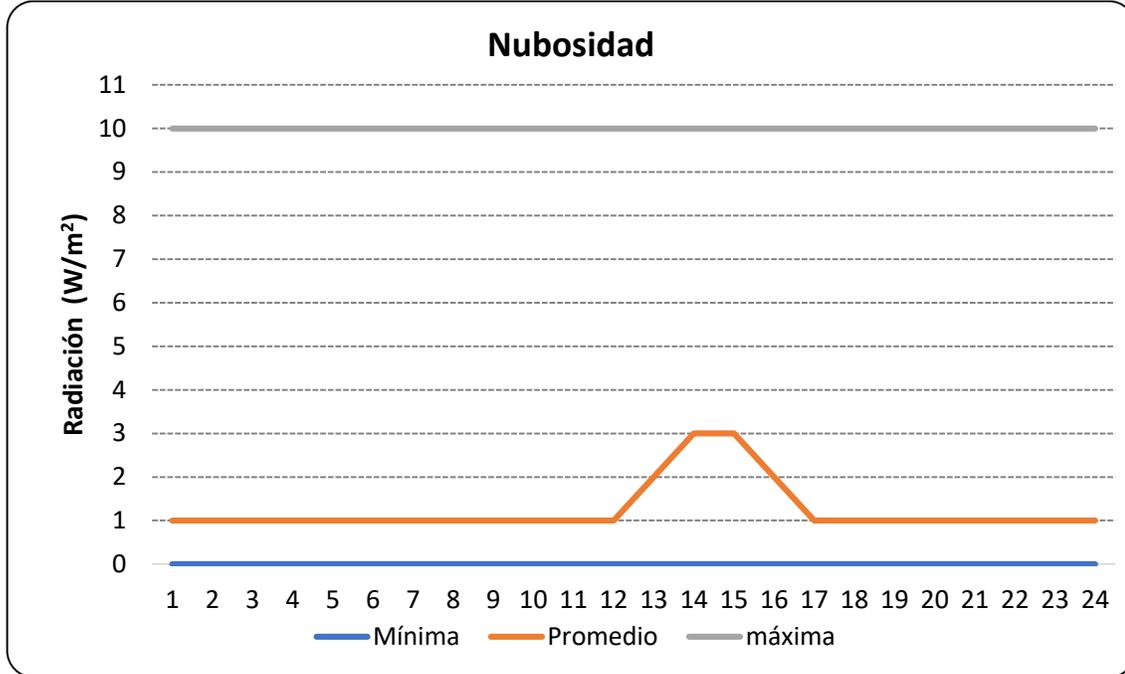


Figura 29. Nubosidad promedio horaria 2020 - 2022

5.6.9 Altura de Capa de Mezcla

Una vez generados los archivos de superficie y perfil mediante la herramienta AERMET, se obtuvieron alturas de mezcla mecánicas y convectivas que dieron como resultado el siguiente comportamiento de la altura de capa de mezcla.

La altura de mezcla en horas diurnas depende tanto del calentamiento ocasionado por la radiación solar recibida en un sitio (altura convectiva) como del movimiento turbulento generado por los desplazamientos del aire (viento horizontal y vertical) altura mecánica. La Figura 30 presenta el comportamiento promedio de la altura de mezcla en función de las alturas convectiva y mecánicas calculadas para cada hora del día por Aermet para la zona de influencia.

El valor máximo de altura convectiva de mezcla calculado fue de 1770,54 m mientras que, para la altura de mezcla mecánica, se obtuvo un valor máximo de 2189,30,35 m; Las relaciones matemáticas diferenciales aplicadas para el cálculo de las alturas de mezcla se describen en el documento (*Aermod: Description of Model Formulation*) disponible en el enlace http://www.epa.gov/ttn/scram/7thconf/aermod/aermod_mfd.pdf. La función bajo la cual se obtienen los valores de altura de mezcla para cada hora del período anual evaluado se presenta a continuación:

$$H_{mix} = \text{Max} (h_{conv}, h_{mec})$$

Donde:

- H_{mix} : Altura de Mezcla
- h_{conv} : Altura Convectiva
- h_{mec} : Altura Mecánica

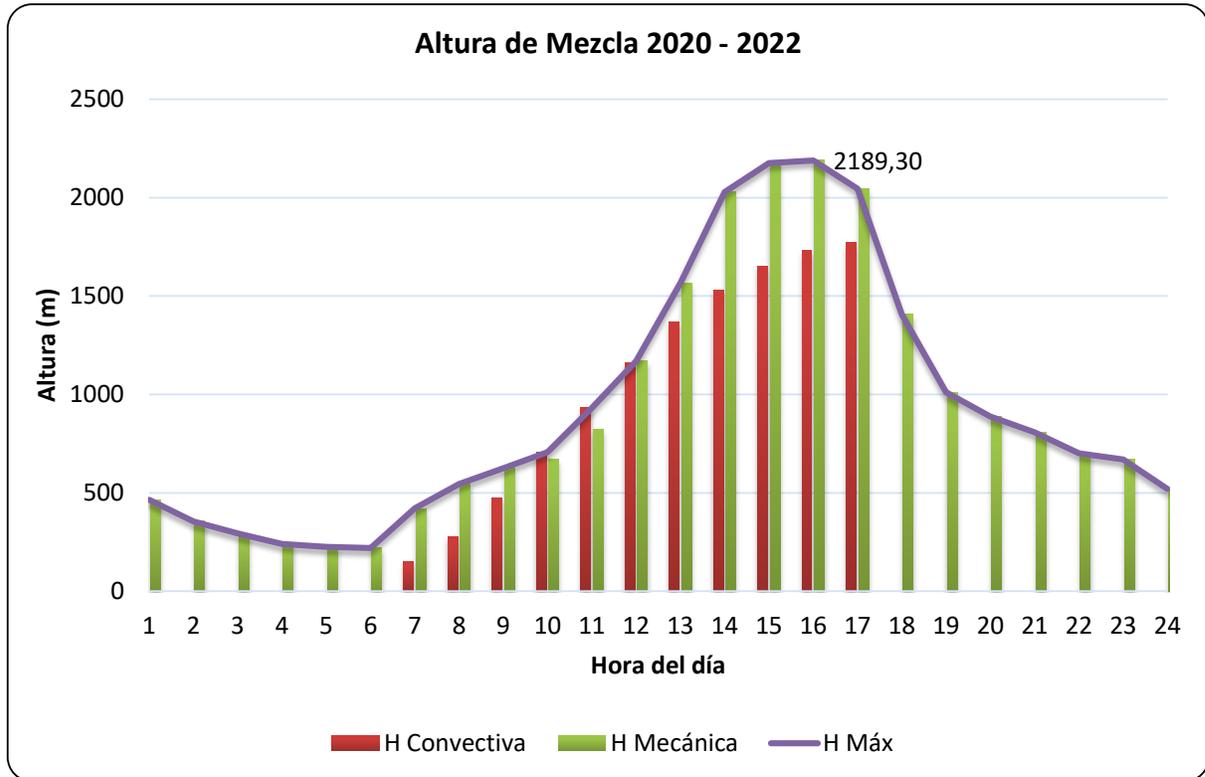


Figura 30 Altura de Mezcla 2020 - 2022

Como se puede observar en la figura la altura de mezcla convectiva solo se presenta entre las 8:00 y las 18:00; presentándose la mayor altura de mezcla promedio a las 16:00 con 2189,30 metros.

5.7 Determinación De Emisiones

En cuanto a las fuentes de emisión a tener en cuenta para el rediseño del SVCA de la CRA se tomaron los datos de las mediciones directas realizadas a las fuentes fijas puntuales que se encontraron disponibles en la CRA, a continuación, se presentan las características principales de las fuentes modelizadas.

Tabla 6. Características fuentes fijas puntuales modelizadas

Fuente	Altura descarga (m)	Diámetro chimenea (m)	Área chimenea (m ²)	Velocidad salida gases (m/s)	Temperatura salida de los gases (K)	Caudal (m ³ /s)
1	14,47	1,06	0,88	8,03	340,05	7,09
2	20,58	0,75	0,44	8,03	340,05	3,55
3	5,10	1,20	1,13	8,03	340,05	9,08
4	14,77	0,57	0,26	5,73	316,78	1,46
5	18,00	0,48	0,18	4,82	499,48	0,87

6	22,70	0,46	0,17	6,86	463,65	1,14
7	15,10	0,45	0,16	6,20	384,90	0,99
8	19,50	0,93	0,68	6,23	409,32	4,23
9	21,30	0,57	0,26	7,02	471,53	1,79
10	7,73	0,80	0,50	9,12	308,15	4,58
11	7,14	0,80	0,50	19,99	327,15	10,05
12	7,14	0,80	0,50	19,64	309,15	9,87
13	8,75	0,90	0,64	11,09	302,15	7,06
14	14,41	0,94	0,69	4,64	326,83	3,22
15	12,68	0,56	0,24	4,68	474,26	1,14
16	18,11	1,09	0,93	12,75	563,48	11,90
17	18,11	1,09	0,93	12,62	562,32	11,78
18	21,41	0,49	0,19	13,83	307,15	2,61

Para el caso del actual modelo de dispersión con fines de rediseño no se tienen en cuenta evaluaciones de cumplimiento normativo respecto a las emisiones, por lo cual no se detalla en las sociedades propietarias de las fuentes fijas puntuales.

A continuación, se muestra la ubicación de las fuentes fijas puntuales modelizadas.

Tabla 7. Ubicación de Fuentes de emisión

Fuentes Fijas		
Fuente	Coordenada Norte*	Coordenada Oeste*
1	2.763.197,917	4.793.107,138
2	2.763.186,049	4.793.532,113
3	2.763.201,421	4.793.529,174
4	2.757.401,892	4.791.546,642
5	2.775.986,078	4.795.769,204
6	2.776.037,482	4.795.786,130
7	2.753.159,720	4.807.384,480
8	2.762.715,846	4.806.796,263
9	2.762.712,706	4.806.808,383
10	2.764.904,979	4.805.907,465
11	2.764.849,878	4.805.876,788
12	2.764.849,878	4.805.876,788
13	2.765.347,080	4.794.913,843
14	2.767.597,223	4.807.225,478
15	2.767.668,715	4.807.343,670

Fuentes Fijas		
Fuente	Coordenada Norte*	Coordenada Oeste*
16	2.778.055,328	4.806.843,878
17	2.778.055,328	4.806.843,878
18	2.755.937,619	4.806.653,568

* Sistema de coordenadas Magna Sirgas Origen Nacional

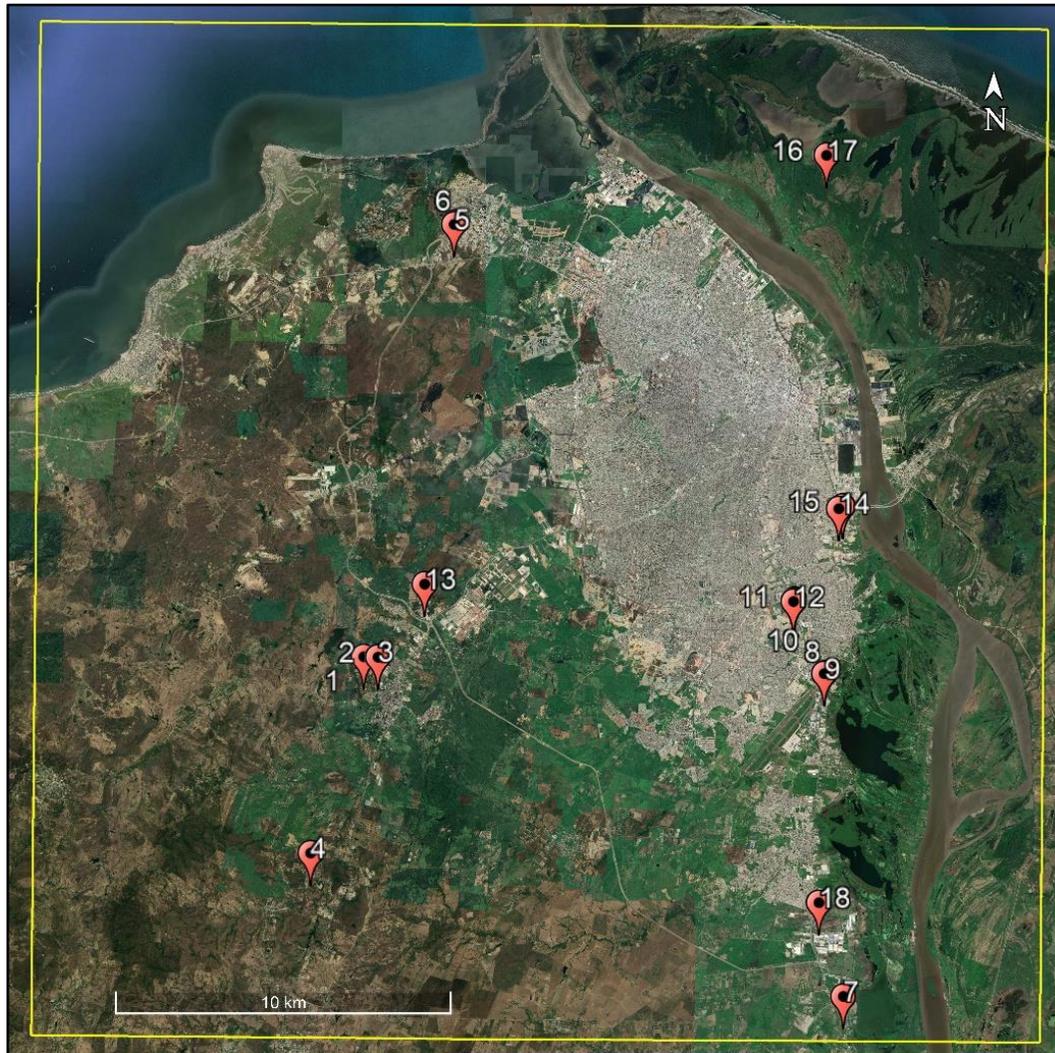


Figura 31. Fuentes de Emisión consideradas para la Modelización

Como se puede observar las fuentes fijas puntuales se ubican en la extensión del dominio de modelización a lo largo de la jurisdicción de la CRA. En la siguiente tabla se muestran las coordenadas de las fuentes fijas puntuales.

Finalmente, con la información asociada a cada fuente fija puntual se calculan las emisiones en gramos por segundo (g/s) para poder ser incluidas en el software de modelización.

Tabla 8. Emisiones de fuentes fijas puntuales

Fuente	Emisión MP (g/s)	SO ₂ (g/s)	NO ₂ (g/s)
1	0,338	0,000	0,000
2	0,169	0,116	0,000
3	0,433	0,178	0,000
4	0,005	0,000	0,000
5	0,041	0,000	0,000
6	0,021	0,000	0,000
7	0,000	0,032	0,000
8	0,797	1,234	1,421
9	0,000	0,080	0,000
10	0,015	0,000	0,000
11	0,013	0,000	0,000
12	0,071	0,000	0,000
13	0,000	0,346	0,029
14	0,436	0,022	0,017
15	0,000	0,018	0,000
16	0,064	0,709	0,000
17	0,046	0,340	0,000
18	0,003	0,000	0,000

Estos datos de terreno, meteorología, características de las fuentes y sus emisiones constituyen la información de entrada para el modelo de dispersión, con esta se procedió a modelizar cada la calidad del aire desde el año 2020 al año 2022. En los posteriores análisis se asocian las emisiones de Material Particulado (MP) a las de PM10 con el fin de determinar las posibles afectaciones por fracciones menores.

6. EJECUCIÓN DEL MODELO DE DISPERSIÓN

Con la información de entrada establecida, las herramientas AERMAP y AERMET ejecutadas se procede a ejecutar el software AERMOMD VIEW para obtener los resultados respectivos, los resultados de la modelización se tienen los mapas de concentración (isopletas) para cada contaminante evaluado, los cuales se evalúan en función del tiempo de exposición de interés de acuerdo con la normatividad ambiental vigente y la cual se presenta en la siguiente tabla.

6.1 Años 2020 – 2022

En la siguiente tabla se presentan los resultados de concentraciones máximas estimadas para los años 2020 a 2022 junto con la coordenada de esta máxima concentración.

Tabla 9. Localización Máximos de Concentración Años 2020 - 2022

Contaminante	Tiempo de exposición	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Coordenada*	
PM10	24 horas	19,86	N	2.763.085,304
			E	4.793.517,516
	Anual	6,19	N	2.763.085,304
			E	4.793.517,516
SO ₂	1 hora	43,13	N	2.766.632,035
			E	4.801.642,046
	24 horas	13,98	N	2.762.398,124
			E	4.806.714,443
NO ₂	1 hora	73,35	N	2.765.177,585
			E	4.794.731,559
	Anual	4,27	N	2.762.398,124
			E	4.806.714,443

* Sistema de Coordenadas Magna – Sirgas Origen Nacional

A continuación, se presentan concentraciones obtenidas mediante Modelización:

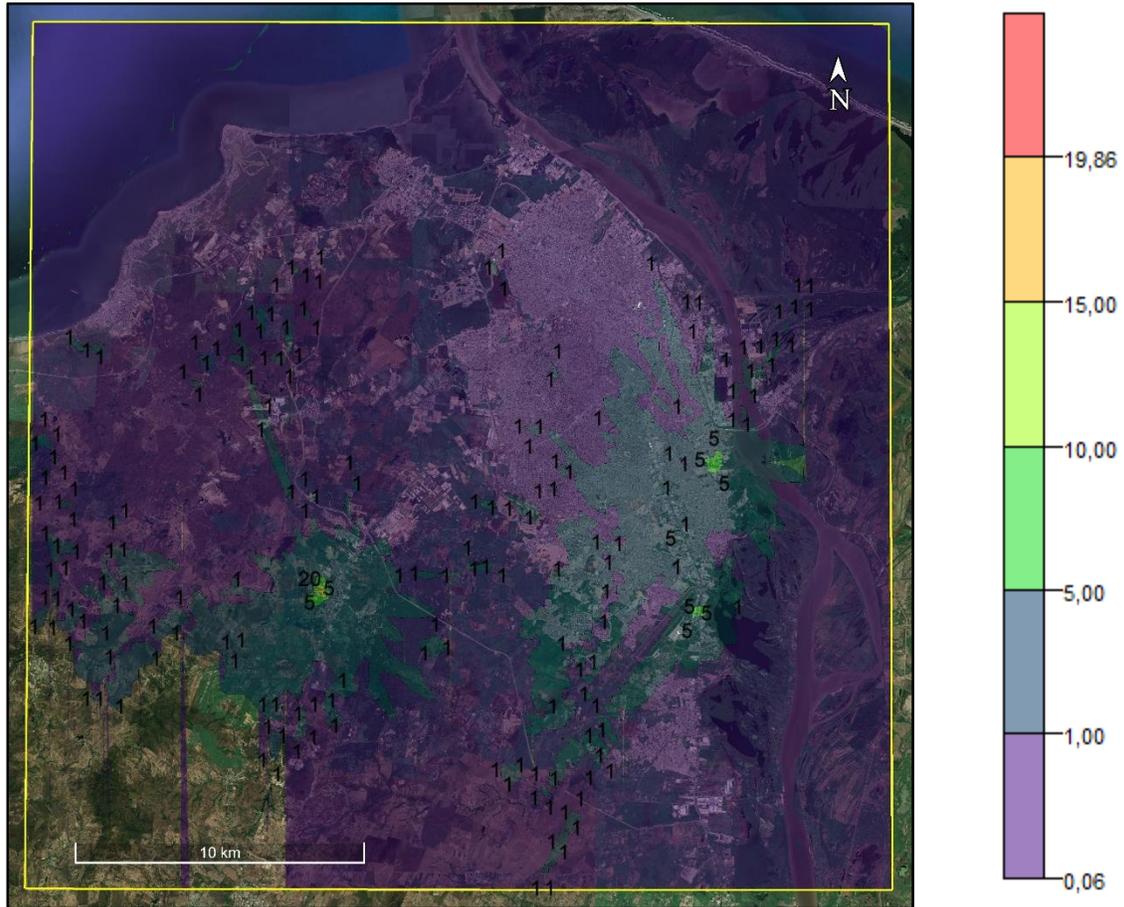


Figura 32. PM10 24 Horas $\mu\text{g}/\text{m}^3$ – 2020 a 2022

Para el contaminante PM10 24 horas la concentración máxima estimada en el dominio de modelización es de $19,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Figura 33. PM10 Anual $\mu\text{g}/\text{m}^3$ – 2020 a 2022

En cuanto al PM10 anual, la máxima concentración estimada es de $6,19 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se destaca el hecho que las concentraciones anuales representan el comportamiento de los contaminantes a largo plazo.

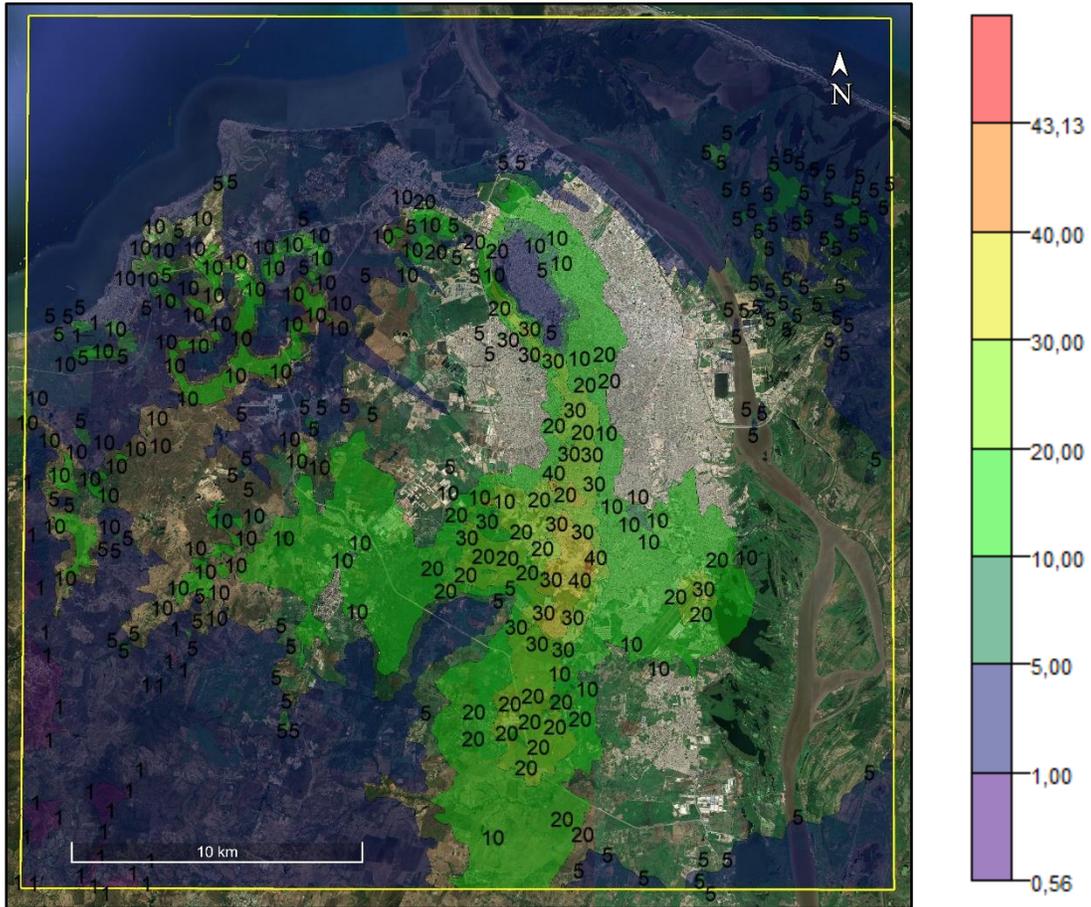


Figura 34. SO₂ 1 Hora µg/m³ – 2020 a 2022

Para el contaminante SO₂ 1 hora la concentración máxima estimada en el dominio de modelización es de 43,13 µg/m³.

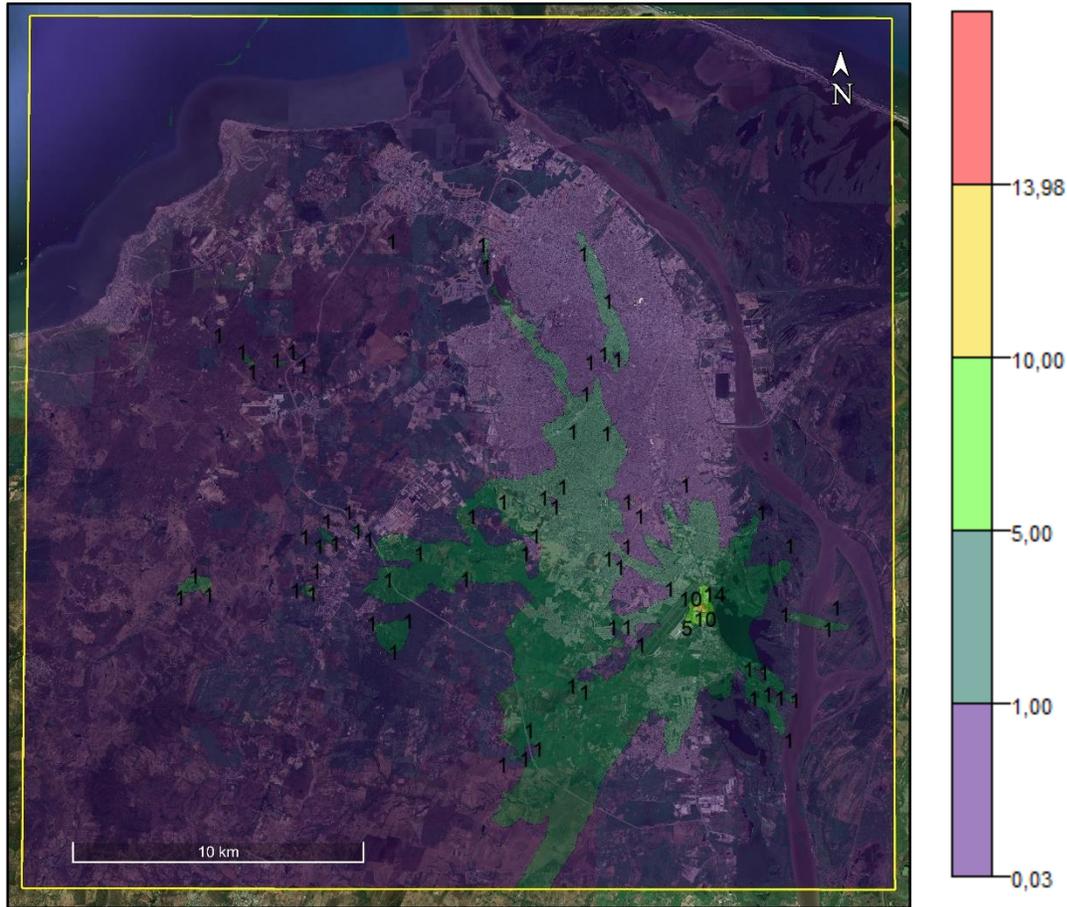


Figura 35. SO₂ 24 Horas µg/m³ – 2020 a 2022

En cuanto al SO₂ 24 horas, la máxima concentración estimada es de 13,98 µg/m³, se destaca el hecho que las concentraciones anuales representan el comportamiento de los contaminantes a largo plazo.

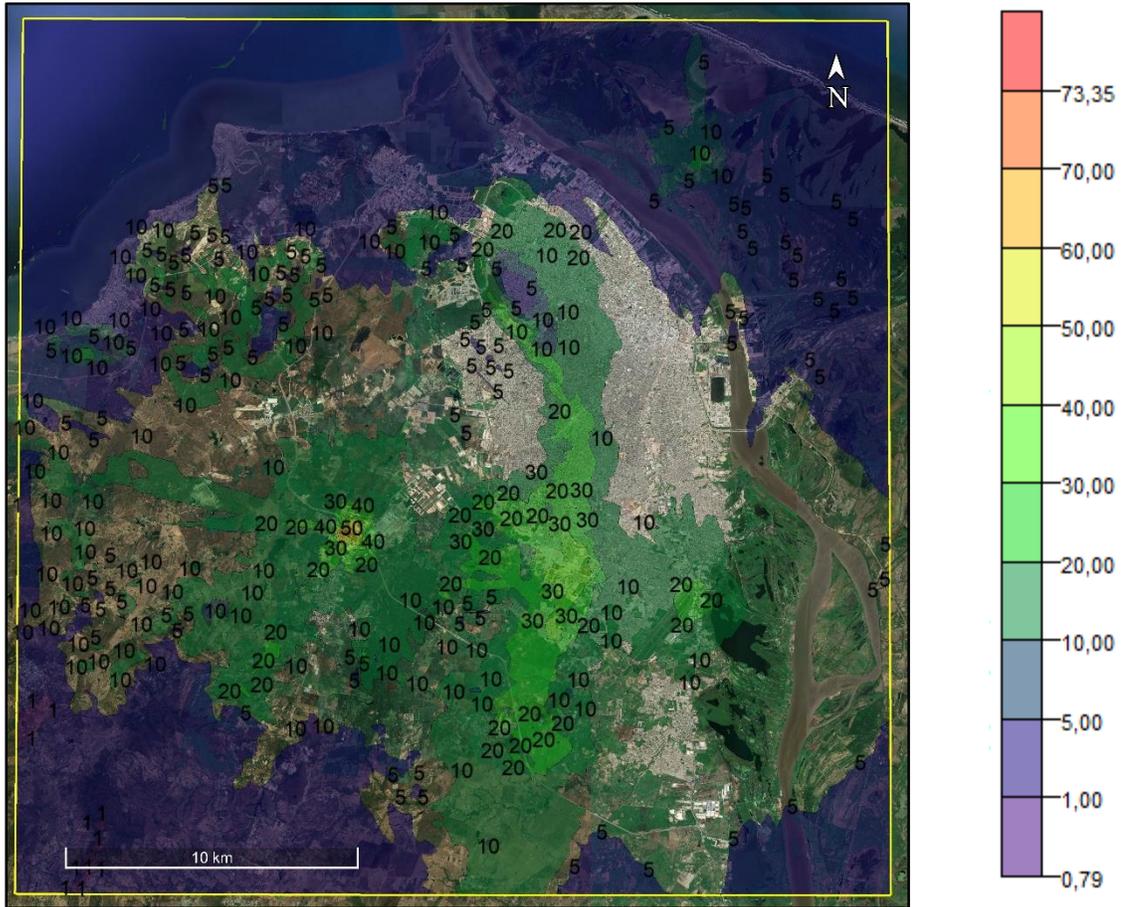


Figura 36. NO₂ 1 Hora µg/m³ – 2020 a 2022

Para el contaminante NO₂ 1 hora la concentración máxima estimada en el dominio de modelización es de 73,35 µg/m³.

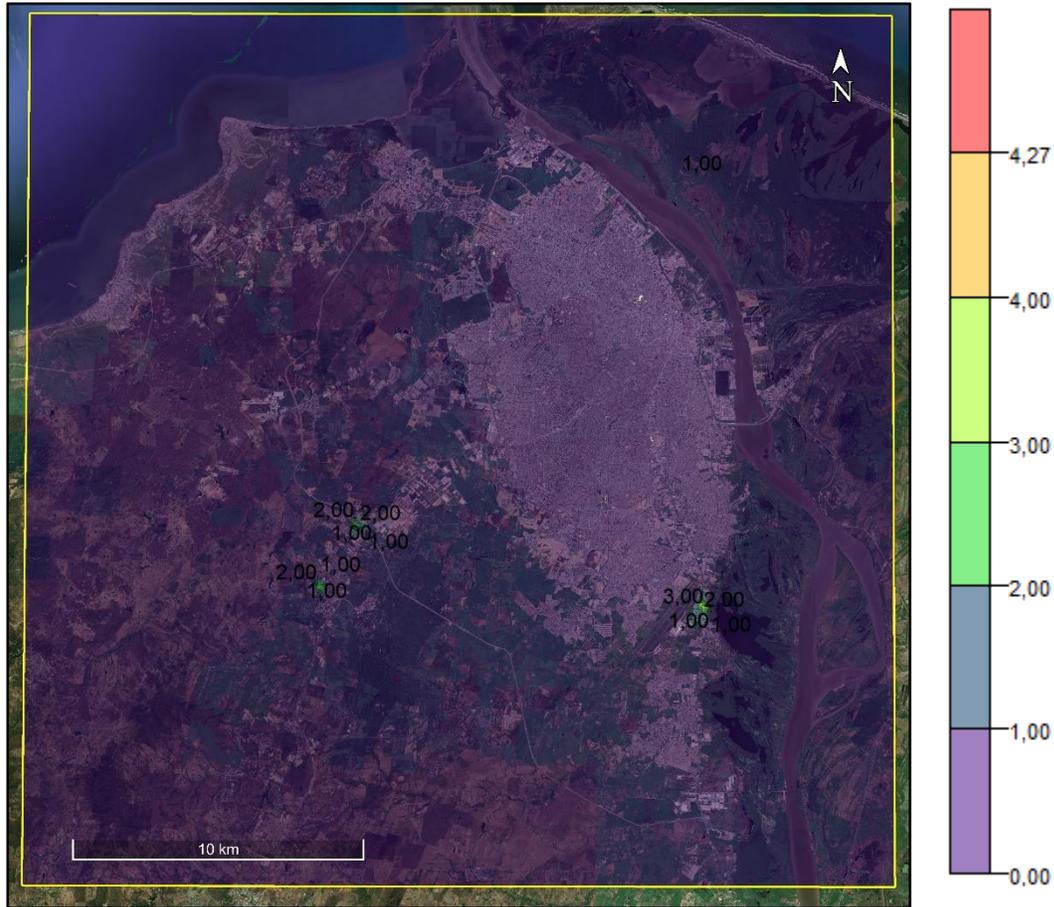


Figura 37. NO₂ Anual µg/m³ – 2020 a 2022

En cuanto al NO₂ Anual, la máxima concentración estimada es de 4,27 µg/m³, se destaca el hecho que las concentraciones anuales representan el comportamiento de los contaminantes a largo plazo.

7. RESULTADOS DEL MODELO EN LOS PUNTOS SELECCIONADOS (SVCA-CRA)

A continuación, se presentan las concentraciones máximas estimadas en el dominio de modelización para los contaminantes PM₁₀, SO₂ y NO₂, junto con la coordenada donde se estima esta concentración.

Tabla 10. Concentraciones máximas – Años 2020 - 2022

Contaminante	Tiempo de exposición	Concentración (µg/m³)	Coordenada*	
PM ₁₀	24 horas	19,86	N	2.763.085,304
			E	4.793.517,516
	Anual	6,19	N	2.763.085,304
			E	4.793.517,516
SO ₂	1 hora	43,13	N	2.766.632,035
			E	4.801.642,046
	24 horas	13,98	N	2.762.398,124
			E	4.806.714,443
NO ₂	1 hora	73,35	N	2.765.177,585
			E	4.794.731,559
	Anual	4,27	N	2.762.398,124
			E	4.806.714,443

Por otra parte, se presentan las concentraciones estimadas en los puntos (estaciones) del SVCA-CRA.

Tabla 11. Aportes al SVCA-CRA – Años 2020 - 2022

Receptores	PM ₁₀ (µg/m³)		SO ₂ (µg/m³)		NO ₂ (µg/m³)	
	24 Horas	Anual	1 Hora	24 Horas	1 Hora	Anual
Malambo - PIMSA	0,492	0,058	6,44	0,56	7,20	0,068
Malambo – Secretaría tránsito	0,791	0,133	9,31	1,13	8,90	0,183
Soledad – Policía Hipódromo	1,375	0,366	11,54	1,02	10,99	0,109
Soledad - EDUMAS	1,048	0,053	32,48	1,86	30,16	0,085
Puerto Colombia - Alcaldía	0,504	0,035	3,21	0,22	3,59	0,032
Puerto Colombia - Bomberos	0,482	0,043	12,20	0,57	11,32	0,057

Como se puede observar en la Tabla 11 la estación que más recibe aportes de PM₁₀ 24 horas es Soledad – Policía-Hipódromo, seguida de Soledad – EDUMAS, en cuanto a los gases SO₂ y NO₂ las mayores concentraciones 1 hora se estiman en la estación Soledad – EDUMAS.

7.1 Evaluación De Los Resultados (Comparación normativa)

La tabla 1 del Artículo Segundo de la Resolución 2254 de 2017 "Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones" del Ministerio De Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) ahora Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), establece los niveles máximos de inmisión.

Tabla 12. Normatividad vigente de calidad del aire

Contaminante	Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición
PM10	75	24 Horas
	50	Anual
SO ₂	100	1 Hora
	50	24 Horas
NO ₂	200	1 Hora
	60	Anual

En la Tabla 13 se presenta la comparación normativa con base en las concentraciones máximas estimadas.

Tabla 13. Comparación normativa calidad del aire año 2020 a 2022

Contaminante	Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición	Resultados Modelización Años 2020-2022 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cumplimiento Años 2020-2022	Porcentaje norma (%)
PM10	75	24 horas	19,86	Cumple	26,48%
	50	Anual	6,19	Cumple	12,38%
SO ₂	100	1 Hora	43,13	Cumple	43,13%
	50	24 Horas	13,98	Cumple	27,96%
NO ₂	200	1 Hora	73,35	Cumple	36,68%
	60	Anual	4,27	Cumple	7,12%

Como se puede observar en la Tabla 13 las concentraciones máximas estimadas en el dominio de modelización no exceden los límites máximos permisibles establecidos, siendo SO₂ 1 hora el contaminante con mayor porcentaje de cercanía al límite permisible (43,13%) seguido del NO₂ 1 hora con 36,68%.

A continuación, se presenta la comparación normativa de las concentraciones estimadas en las estaciones del SVA-CRA.

Tabla 14. Aportes PM10 al SVCA-CRA – Años 2020 - 2022

Receptores	PM10 (µg/m³)		Porcentaje de norma	PM10 (µg/m³)		Porcentaje de norma
	24 Horas	Norma	(%)	Anual	Norma	(%)
Malambo - PIMSA	0,492	75	0,66%	0,058	50	0,12%
Malambo – Secretaría tránsito	0,791		1,05%	0,133		0,27%
Soledad – Policía Hipódromo	1,375		1,83%	0,366		0,73%
Soledad - EDUMAS	1,048		1,40%	0,053		0,11%
Puerto Colombia - Alcaldía	0,504		0,67%	0,035		0,07%
Puerto Colombia - Bomberos	0,482		0,64%	0,043		0,09%

Teniendo en cuenta los resultados presentados en la Tabla 14 se evidencia que la estación que más aportes recibe de material particulado evaluado como PM10 es la estación Soledad – Policía-Hipódromo seguida de la estación Soledad - EDUMAS, sin embargo, estas concentraciones no generan excedencia normativa en esta ni en ninguna de las otras estaciones.

Tabla 15. Aportes SO₂ al SVCA-CRA – Años 2020 - 2022

Receptores	SO ₂ (µg/m³)		Porcentaje de norma	SO ₂ (µg/m³)		Porcentaje de norma
	1 Hora	Norma	(%)	24 horas	Norma	(%)
Malambo - PIMSA	6,44	100	6,44%	0,56	50	1,12%
Malambo – Secretaría tránsito	9,31		9,31%	1,13		2,26%
Soledad – Policía Hipódromo	11,54		11,54%	1,02		2,04%
Soledad - EDUMAS	32,48		32,48%	1,86		3,72%
Puerto Colombia - Alcaldía	3,21		3,21%	0,22		0,44%
Puerto Colombia - Bomberos	12,20		12,20%	0,57		1,14%

En cuanto al SO₂ se resalta la estación Soledad – EDUMAS como la estación que posiblemente reciba mayores aportes en tiempos de exposición 1 hora y 24 horas, se aclara que de estas concentraciones no se esperan excedencias normativas.

Tabla 16. Aportes NO₂ al SVCA-CRA – Años 2020 - 2022

Receptores	NO ₂ (µg/m³)		Porcentaje de norma	NO ₂ (µg/m³)		Porcentaje de norma
	1 Hora	Norma	(%)	Anual	Norma	(%)
Malambo - PIMSA	7,20	200	3,60%	0,068	60	0,11%
Malambo – Secretaría tránsito	8,90		4,45%	0,183		0,31%
Soledad – Policía Hipódromo	10,99		5,50%	0,109		0,18%
Soledad - EDUMAS	30,16		15,08%	0,085		0,14%
Puerto Colombia - Alcaldía	3,59		1,80%	0,032		0,05%
Puerto Colombia - Bomberos	11,32		5,66%	0,057		0,10%

Finalmente, al evaluar las concentraciones estimadas de NO₂ en las estaciones del SVCA-CRA se destaca la estación Soledad – EDUMAS como la estación con posibles mayores aportes de NO₂ 1 hora, estando por debajo del límite máximo permisible.

7.2 Evaluación De Los Resultados (Comparación modelo - Mediciones)

A continuación, se presenta una comparación entre los datos modelizados y las concentraciones medidas por el SVCA-CRA, es de aclarar que este ejercicio se realiza de manera indicativa, toda vez que los datos medidos en campo son de los años 2017 a 2018 y la meteorología empleada es de los años 2020 a 2022 generando diferencia en los tiempos de análisis, sin embargo, permite conocer la diferencia entre las 2 fuentes de información e identificar falta de posibles fuentes de emisión.

La información empleada fue obtenida de la herramienta Web SISAIRE para el SVCA-CRA entre los años 2017 y 2018.

Tabla 17. Aportes PM10 24 horas – Mediciones

Receptores	PM10 Modelo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10 SVCA-CRA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)*	Porcentaje (%)
	24 Horas	24 Horas	(%)
Malambo - PIMSA	0,492	81,10	0,60
Malambo – Secretaría tránsito	0,791	71,51	1,10
Soledad – Policía Hipódromo	1,375	105,74	1,30
Soledad - EDUMAS	1,048	89,74	1,16
Puerto Colombia - Alcaldía	0,504	117,93	0,42
Puerto Colombia - Bomberos	0,482	117,93	0,40

* Valor máximo registrado desde 2017-80-01 a 2018-05-31

Como se puede observar en la anterior tabla las fuentes modelizadas aportan el 1% en promedio a las concentraciones medidas por el SVCA-CRA, esto sugiere la inclusión de mayor cantidad de fuentes fijas y móviles con el fin de obtener resultados representativos de la zona de estudio.

Tabla 18. Aportes PM10 Anual – Mediciones

Receptores	PM10 Modelo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10 SVCA-CRA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Anual		Porcentaje (%)	
	Anual	2017	2018	2017	2018
Malambo - PIMSA	0,058	41,45	37,16	0,14	0,16
Malambo – Secretaría tránsito	0,133	41,48	SR	0,32	SR
Soledad – Policía Hipódromo	0,366	46,17	60,08	0,79	0,61
Soledad - EDUMAS	0,053	42,62	49,09	0,12	0,11
Puerto Colombia - Alcaldía	0,035	38,26	50,34	0,09	0,07
Puerto Colombia - Bomberos	0,043	25,22	41,08	0,17	0,10

Finalmente, en la anterior tabla se observa que las fuentes modelizadas aportan el 0,5% en promedio a las concentraciones medidas por el SVCA-CRA, esto sugiere la inclusión de mayor cantidad de fuentes fijas y móviles con el fin de obtener resultados representativos de la zona de estudio, esto teniendo en cuenta el asincronismo de las mediciones y el modelo de dispersión.

8. CONCLUSIONES

- Con base en los resultados máximos obtenidos mediante modelización (Tabla 13) se puede determinar que las emisiones de las fuentes fijas modelizadas no generan excedencias normativas para el contaminante PM₁₀, en los periodos de exposición 24 horas y anual, obteniendo una concentración máxima de 19,86 µg/m³ y 6,19 µg/m³ respectivamente, concentraciones que se encuentran por debajo del límite permisible establecido en la Resolución 2254 de 2017.
- En cuanto al contaminante SO₂ en los tiempos de exposición 1 hora y 24 horas no se esperan excedencias normativas de los límites fijados en la Resolución 2254 de 2017, con concentraciones máximas de 43,13 µg/m³ y 13,98 µg/m³ respectivamente. Se destaca el SO₂ 1 hora como el contaminante con mayor porcentaje de cercanía a su límite permisible con 43,13%.
- Por otra parte, para el contaminante NO₂ en los tiempos de exposición establecidos en la Resolución 2254 de 2017 1 hora y anual no se esperan superaciones del límite permisible, con concentraciones máximas de 73,35 µg/m³ y 4,27 µg/m³.
- Adicionalmente, se puede concluir que los aportes de las fuentes modelizadas no generan excedencias normativas en las estaciones pertenecientes al SVCA-CRA (Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16) para los contaminantes PM₁₀, SO₂ y NO₂, se resalta el hecho que la estación Soledad – EDUMAS es la estación con mayor probabilidad de recibir aportes de PM₁₀ SO₂ y NO₂.
- Finalmente, se puede concluir que cuanta más información se tenga respecto de fuentes de emisión se podrán generar resultados más representativos, sin que esto afecte la representatividad del actual estudio de dispersión ya que este abarca los contaminantes criterio de interés para la protección de la salud humana.