



Análisis espacial de la dispersión del contaminante atmosférico dióxido de azufre emitido por la fabricación de ladrillos en la vereda de Patio Bonito, municipio de Nemocón, Cundinamarca - Colombia.

Robinson Puerto-Mora

11792129546

Universidad Antonio Nariño

Programa Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá D.C, Colombia

2022

**Análisis espacial de la dispersión del contaminante atmosférico dióxido de Azufre
emitido por la fabricación de ladrillos en la vereda de Patio Bonito, municipio de
Nemocón, Cundinamarca - Colombia.**

Robinson Puerto-Mora

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Especialista en Sistemas de Información Geográfica.

Director:

Ph.D., Andrés Felipe Carvajal Vanegas.

Universidad Antonio Nariño

Programa Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá D.C, Colombia

2022

Contenido

1.	Resumen	1
2.	Abstract.....	2
3.	Introducción.....	3
4.	Estado del conocimiento.....	5
5.	Objetivos.....	8
5.1	Objetivo general	8
5.2	Objetivos específicos.....	8
6.	Marco teórico.....	9
6.1	Contaminación atmosférica	9
6.1.1	Clasificación de contaminantes atmosféricos.....	9
6.1.2	Tipos de fuentes emisoras al medio ambiente.....	10
6.1.3	Principales contaminantes atmosféricos generados por la industria ladrillera	11
6.1.4	Producción de ladrillos en hormo semicontinuo	13
6.1.5	Formas de sedimentación o precipitación del dióxido de azufre.....	14
6.2	Modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos.....	15
7.	Metodología.....	18
7.1	Descripción del área de estudio	19
7.2	Ubicación y dimensiones de la chimenea.....	22
7.3	Condiciones en chimenea	23
7.4	Emisión de dióxido de azufre	24
7.5	Condiciones meteorológicas.....	25
7.5.1	Velocidad y dirección del viento.....	25
7.5.2	Temperatura ambiente	29
7.5.3	Presión atmosférica.....	31
7.6	Estabilidad atmosférica.....	32
7.7	Coeficientes de dispersión horizontal y vertical (σ_y , σ_z).....	33

7.8	Cálculo de la elevación de la pluma o columna de humo	35
7.9	Cálculo de la altura efectiva de la emisión	36
7.10	Velocidad del viento a la altura de la emisión.....	37
7.11	Descarga y procesamiento del Modelo Digital de Elevación (DEM)	39
7.12	Determinación de la altura de la chimenea al nivel del mar.....	41
7.13	Cálculo de la distancia Euclidiana.....	41
7.14	Modelo de dispersión Gaussiano con ArcGIS.....	42
8.	Resultados y análisis.....	44
9.	Conclusiones.....	56
10.	Recomendaciones	59
11.	Referencias Bibliográficas.....	60
12.	Anexos	62

Lista de Figuras

Figura 1 Esquema de un horno semicontinuo.....	13
Figura 2 Localización del área de estudio.....	21
Figura 3 Ubicación de la chimenea de la ladrillera La fe.	22
Figura 4 Dimensiones de la chimenea del horno semicontinuo de la ladrillera La Fe	23
Figura 5 Sobreposición del área de estudio con el atlas climatológico correspondiente a la velocidad media mensual del viento a 10 metros altura	27
Figura 6 Sobreposición del área de estudio con el atlas climatológico correspondiente a la dirección del viento.....	28
Figura 7 Proyección del vector representante de la dirección del viento sobre el área de estudio.....	29
Figura 8 Sobreposición del área de estudio con el atlas climatológico correspondiente a la distribución de la temperatura media mensual.....	30
Figura 9 Datos de presión atmosférica en unidades de hPa.....	31
Figura 10 Sistema de clasificación atmosférica de Pasquill	32
Figura 11 Valores de I, J, K para σ_y	34
Figura 12 Valores de I, J, K para σ_z	34
Figura 13 Valores constantes de n	38
Figura 14 DEM Alos Palsar seleccionado.	39
Figura 15 DEM desplegado y proyectado a coordenadas planas origen único en ArcGIS	40
Figura 16 Recorte del DEM al área de influencia.....	40
Figura 17 Ecuación del modelo Gaussiano de dispersión de contaminantes.....	42
Figura 18 Distancia euclidiana para la chimenea (X).....	47
Figura 19 Distancia euclidiana para la dirección del viento (Y)	47
Figura 20 Resultados de la concentración de SO ₂ para las estabilidades atmosféricas B y C	49
Figura 21 Comparación de las concentraciones dispersas de SO ₂ Vs los límites máximos permisibles, según las Resolución 0610 de 2010 del MAVDT y 2254 de 2017 MADS....	53

Lista de tablas

Tabla 1 Fuentes generadoras de la contaminación atmosférica.....	10
Tabla 2 Principales contaminantes atmosféricos generados por la industria ladrillera y sus efectos sobre la salud humana.....	11
Tabla 3 Tipos de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos.	15
Tabla 4 Límites del municipio de Nemocón.....	20
Tabla 5 Ocupación y distribución de Nemocón.....	20
Tabla 6 Condiciones de la chimenea	24
Tabla 7 Presión atmosférica según la estabilidad atmosférica para el municipio de Nemocón.....	32
Tabla 8 Valores de σ_y y σ_z para las estabilidades atmosféricas B y C.....	35
Tabla 9 Valores establecidos para el desarrollo de la ecuación de Holland, según la estabilidad atmosférica.....	36
Tabla 10 Valores establecidos para el desarrollo de la ecuación de la velocidad del viento a la altura de la emisión, según la estabilidad atmosférica.	38
Tabla 11 Elevación de la pluma (Δh) según la estabilidad atmosférica.	45
Tabla 12 Resultados de la altura efectiva de la emisión según la estabilidad atmosférica.	45
Tabla 13 Velocidad del viento a la altura de la emisión según la estabilidad atmosférica.	46
Tabla 14 Resultados obtenidos de los parámetros que intervienen directa o indirectamente en los modelos de dispersión.	48
Tabla 15 Concentración de SO ₂ Vs distancia.....	50

Dedicatoria

A Dios, a mis padres Edilma Mora Bedoya y Mauricio Puerto Moreno, a mi esposa Erika Bernal Vargas, a mi hermana Natalia Puerto Mora y a mis hijos, que han ayudado a construirme como persona y profesional.

1. Resumen

Se desarrollaron dos estimaciones de la dispersión del contaminante atmosférico dióxido de azufre (SO_2) para la ladrillera La Fe, ubicada en la vereda de Patio Bonito del municipio de Nemocón, teniendo en cuenta las dos estabildades atmosféricas predominantes, según las condiciones climatológicas del área de interés, utilizando como insumo principal datos de referencia encontrados en diferentes proyectos de grado, internet y entidades públicas como el IDEAM, y asignando valores hipotéticos elevados a la estabilidad atmosférica más inestable, permitiendo así reunir los parámetros requeridos para el desarrollo del modelo Gaussiano de dispersión. Los modelos se realizaron con el uso del “Model Builder” el cual permitió obtener como resultado en formato ráster las concentraciones dispersas a lo largo y ancho de la fuente de emisión. El resultado para la estabilidad atmosférica de tipo C arrojó una concentración máxima del contaminante de interés de $2.59 \times 10^{-4} \text{ g/m}^3$, mientras que para la estabilidad atmosférica de tipo B fue de $1.59 \times 10^{-4} \text{ g/m}^3$. Los valores más bajos para cada estabilidad atmosférica estuvieron por debajo de $1 \times 10^{-6} \text{ g/m}^3$.

Palabras clave: Dispersión de contaminantes atmosféricos, Modelo Gaussiano, Dióxido de Azufre, ladrilleras y fuente puntual.

2. Abstract

Two estimates of the dispersion of the atmospheric pollutant sulfur dioxide (SO₂) were developed for the brick kiln La Fe, located in the village of Patio Bonito in the municipality of Nemocón, taking into account the two predominant atmospheric stabilities, according to the climatological conditions of the area of interest, using as main input reference data found in different degree projects, internet and public entities such as IDEAM, and assigning high hypothetical values to the most unstable atmospheric stability, thus allowing to gather the parameters required for the development of the Gaussian model of dispersion. The models were made with the use of the "Model Builder" which allowed to obtain as a result in raster format the concentrations dispersed throughout the emission source. The result for type C atmospheric stability yielded a maximum concentration of the pollutant of interest of $2.59 \times 10^{-4} \mu/m^3$, while for type B atmospheric stability it was $1.59 \times 10^{-4} \mu/m^3$. The lowest values for each atmospheric stability were below $1 \times 10^{-6} \mu/m^3$.

Keywords: Dispersion of air pollutants, Gaussian model, Sulfur dioxide, brickyards and point source.

3. Introducción

Es indispensable entender la dispersión de contaminantes atmosféricos para interpretar y predecir las concentraciones y mezclas de gases generados por fuentes principalmente fijas. La movilización de agentes químicos en el aire por acción de las características meteorológicas, no son completamente predecibles ni repetibles en ejercicios de laboratorio, razón por la cual los modelos de dispersión de contaminantes y los bancos de prueba son una alternativa reiterativa en los estudios ambientales. (Molano & Díaz, 2019).

El modelo Gaussiano de dispersión de contaminantes es conocido como una técnica matemática que permite determinar la concentración de una sustancia química emitida por una fuente puntual, que con el apoyo en los sistemas de información geográfica y sus diferentes herramientas, permite generar a su vez una salida gráfica que representa la columna de humo y su desplazamiento en un área de interés. Este tipo de modelos se usa principalmente para actividades industriales que cuenten con una salida puntual de tipo chimenea como lo son, por ejemplo, las ladrilleras.

La elaboración de ladrillos es el ejercicio económico predominante en la vereda de Patio Bonito, municipio de Nemocón, desarrollada como fuente de ingreso o de manutención, pues otras actividades remunerables relacionadas a la agricultura no se pueden ejercer, ya que las peculiaridades agrologicas de la zona, no permiten desarrollarla, lo anterior, sumado a la tradición familiar y costumbres de los habitantes de la zona; han generado una problemática que ha tenido una duración de aproximadamente 40 años (Arango & Rodríguez, 2017).

La vereda es reconocida a nivel nacional por su gran cantidad de fábricas relacionadas a la actividad mencionada en el párrafo anterior, aportando desde hace 4 décadas constantes problemas relacionados a la contaminación atmosférica, en especial a agentes químicos como el SO_2 .

Por lo anterior, este estudio se centró en el análisis espacial de las concentraciones de la pluma de contaminación de dióxido de azufre y la importancia que este contaminante representa como precursor de la lluvia ácida y sus efectos sobre el suelo, tal y como lo es la erosión, generada a partir de la fabricación de ladrillos en la vereda de Patio Bonito de Nemocón.

Con este trabajo se pretende dar un insumo que permita a estudiantes y profesionales la aplicación de un modelo de dispersión de contaminantes Gaussiano a partir de las herramientas que ofrece el software ArcGIS, con el cual finalmente se logra el análisis de un contaminante de interés y que además pueda ser utilizado como soporte para la toma de decisiones en los procesos relacionados.

4. Estado del conocimiento

En lo que respecta a los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos, relacionados con procesos industriales poco tecnificados, diversos profesionales y distintas instituciones forman parte del grupo que se han preocupado por abordar temas relacionados. Tales son los casos siguientes:

En el trabajo de grado realizado por Buitrago & Rojas (2017), titulado como “*Estimación de factores de emisión de una ladrillera en la localidad de Ciudad Bolívar en Bogotá D.C.*”, el cual tuvo como objetivo principal la estimación de los parámetros: black carbon, CO, CO₂ y PM_{2.5} en una ladrillera ubicada en la localidad de Ciudad Bolívar en la ciudad de Bogotá D.C. mediante el uso de la técnica de balance de carbono. Para lograr lo anterior, se utilizó el modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos con el objetivo de determinar un punto de muestreo y consecutivamente estimar si se presentan o no impactos negativos en la calidad del aire local. Los resultados de los parámetros de interés fueron: black carbon (0.94 ± 1.27), CO (53.6 ± 59.3), CO₂ (2122.3 ± 96.5) y PM_{2.5} (5.9 ± 9.8) en Kg de contaminante/Ton de carbón mineral quemado.

A nivel investigativo, se han realizado comparaciones entre el método de dispersión Gaussiano y métodos experimentales. Este es el caso del artículo encontrado en línea elaborado por Molano & Díaz (2019), bajo el título de “*Análisis y verificación del modelo gaussiano de dispersión: métodos teóricos y experimentales*”, en donde se confrontó la modelación teórica Gaussiana, con la Cámara de Interacción y Simulación de Contaminantes Atmosféricos de la universidad Central de Bogotá, con el objetivo de reconocer relaciones entre el modelo Gaussiano y su utilidad para estudios de calidad de

aire. Para el estudio se realizaron diversas marchas con CO₂ en la cámara de simulación en el software Screen View, y desarrollando el modelo matemático, es decir el Gaussiano, en hojas de cálculo de Excel. Como resultado, se demostró que la distribución Gaussiana es representativa para una dispersión de cota máxima de 1.5 km de altura, que generalmente equivale a la elevación de la mezcla. Así, fue posible confirmar que la realidad de la dispersión de contaminantes corresponde efectivamente a la tendencia Gaussiana.

Por otro lado, en otros proyectos de grado, se utilizan softwares especializados en la modelación de dispersión de contaminantes atmosféricos. Este es el caso del trabajo denominado como: *“Modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos influenciado por la actividad minera a través del software de AERMOD en el distrito de Tinyahuarco”*, elaborado por Matías (2021), en donde su objetivo principal fue establecer la dispersión de contaminantes atmosféricos causado por el ejercicio minero a través del software de AERMOD en el distrito de Tinyahuarco. El trabajo se realizó haciendo un modelamiento de la estimación de la calidad del aire mediante el software AERMOD de la tasa de difusión y cargas de PM₁₀ y PM_{2.5}, en donde se tuvo como resultado que las tasas de difusión y cargas no superan el Estándar de Calidad Ambiental Aire (ECA Aire) para el parámetro de PM₁₀ 24 horas 100 µg/m³, anual 50 µg/m³ y PM_{2.5}, 24 horas 50 µg/m³, anual 25 µg/m³.

Un claro ejemplo de la aplicación de los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos del método Gaussiano, es el trabajo nombrado como: *“Concentración de material particulado, monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en la planta de producción de óxido de calcio Puylucana, Cajamarca”* realizado por Alva (2019) en donde su objetivo fue hallar la concentración (µg/m³) de PM₁₀ y PM_{2.5}, así

como de (CO_2), (NO_2) y (SO_2), los cuales son causados por la planta de producción de óxido de calcio Puylucana, para consecutivamente comparar con el uso del estándar de calidad ambiental del aire (ECA), si las concentraciones de dichos elementos químicos sobrepasan o no los estándares allí propuestos. Para ello se desarrolló una modelación de la dispersión de emisiones por el método Gaussiano. Esta tesis de posgrado tuvo como resultado que a 0.5 y a 1 km de longitud de la fuente de emisión, las concentraciones de los parámetros evaluados estuvieron muy por debajo del ECA a causa principalmente del efecto dispersante del viento.

5. Objetivos

5.1 Objetivo general

Realizar el análisis espacial de la dispersión de dióxido de azufre emitido por la fabricación de ladrillos en la vereda de Patio Bonito, municipio de Nemocón, mediante el modelo Gaussiano de dispersión de contaminantes.

5.2 Objetivos específicos

- Identificar las variables que intervienen en el desarrollo del modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos.
- Modelar dos dispersiones del contaminante dióxido de azufre teniendo en cuenta las dos estabilidades atmosféricas predominantes, según las condiciones meteorológicas de Nemocón.
- Determinar la distribución espacial de dióxido de azufre según los modelos utilizados para el análisis.

6. Marco teórico

6.1 Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica es definida por Wark & Warner (2002) como: *“la aparición en la atmosfera de uno o varios contaminantes o sus mezclas, en proporciones tales y con tal permanencia, que puedan perjudicar la vida humana o que puedan ser nocivos para la vida vegetal, animal o el ambiente, de modo que interfieran con la vida, la propiedad o el ejercicio de las actividades”*.

6.1.1 Clasificación de contaminantes atmosféricos

Según su origen se puede clasificar en antropogénica o natural. La antropogénica, que se refiere a contaminación atmosférica causada a raíz de la actividad realizada por el hombre, y la natural que es el resultado de, por ejemplo, una erupción volcánica.

El estado físico también puede definir una clasificación. Según Arango & Rodríguez (2017) la clasificación física se divide en contaminantes primarios y secundarios, y los define como: *“Los contaminantes primarios son los expulsados directamente a la atmósfera, como por ejemplo el SO₂, que afecta tanto a la cobertura vegetal como al ser humano. Por otro lado, los contaminantes secundarios son aquellos que, mediante reacciones químicas que se producen en la atmosfera y que inciden en los contaminantes primarios, originan al ácido sulfúrico, ozono, entre otros”*.

Se debe tener en cuenta que dentro de la clasificación primaria entran diversos tipos de contaminantes atmosféricos como: óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de

carbono (CO), los hidrocarburos y el ozono troposférico (O₃) o en partículas como polvo y aerosoles. (Buitrago & Rojas, 2017).

Otro tipo de clasificación es según el tamaño de las partículas, considerando pequeñas partículas las que son inhalables que corresponden a las que tienen un diámetro menor o igual a 10 µm, referente al parámetro PM10, estas se encuentran en suspensión en el aire y pueden ser transportadas por acción del viento o sedimentables en caso de lluvias.

Por otro lado, se encuentran las partículas más finas cuyo diámetro corresponden a 2.5 µm (PM2.5), estas son definidas por Buitrago & Rojas (2017) como: *“las partículas que pueden alcanzar fácilmente los bronquiolos terminales y los alvéolos para ser transportadas a otros órganos del cuerpo humano por la circulación sanguínea”*.

6.1.2 Tipos de fuentes emisoras al medio ambiente

Las emisiones al medio ambiente son realizadas por fuentes generadoras que pueden ser fijas, móviles y de área (**Tabla 1**), las cuales se describen a continuación de forma detallada:

Tabla 1 Fuentes generadoras de la contaminación atmosférica.

Fuentes generadoras	Descripción
Fija o puntual	Corresponde a una fuente identificada y localizada en un lugar específico, el cual es el origen de la contaminación. Dentro de los elementos relacionados existen las chimeneas, calderas y ductos similares por los cuales se emiten o expulsan ciertas cantidades de contaminantes, dependiendo del proceso productivo que las realice, así como el tipo de combustible que es utilizado.
Móvil	Son agentes móviles dentro de los que se encuentran los vehículos o transportes que utilizan motores de combustión.
Área	Es generada por el desarrollo de diferentes actividades en conjunto que presentan varios puntos de emisión, los cuales se encuentran distribuidos en un área en particular, produciendo afectación directa o indirecta de la calidad del aire.

Nota. Fuente: (Marín & Otalvora, 2020) ajustada por el autor.

6.1.3 Principales contaminantes atmosféricos generados por la industria ladrillera

La industria ladrillera en la vereda de Patio Bonito, municipio de Nemocón, genera una contaminación atmosférica acumulable, atribuido a la gran cantidad de este tipo de industrias que funcionan de forma casi simultánea, lo anterior, teniendo en cuenta que en muchos de los casos la tecnificación es precaria o nula, aumentando aún más, junto con el uso de combustibles no amigables con el medio ambiente, la contaminación atmosférica.

Buitrago & Rojas (2017) clasificaron los principales contaminantes atmosféricos generados por la industria ladrillera, así como describieron los principales efectos sobre la salud humana que ellos acarrearán (**Tabla 2**), los cuales se pueden evidenciar a continuación

Tabla 2 Principales contaminantes atmosféricos generados por la industria ladrillera y sus efectos sobre la salud humana.

Contaminante	Característica general	Efectos en la salud humana
Dióxido de carbono (CO ₂)	Es un gas inoloro, incoloro e insipiente que está presente en la atmósfera de forma natural. Es emitido de forma antrópica, por la quema de combustibles fósiles.	Este no es tóxico para la salud humana, pero es un elemento generador del efecto invernadero.
Monóxido de Carbono (CO)	Es un gas inoloro, incoloro e insipiente. Es clasificado como un contaminante primario. Cerca del 90% se encuentra en la atmósfera de forma natural, al oxidarse con el metano (CH ₄) en reacciones fotoquímicas, el CO se transforma en CO ₂ . Es generado en grandes cantidades a causa de la combustión incompleta de combustibles fósiles, después del CO ₂ , este es el gas contaminante más emitido a la atmósfera por causas no naturales.	Este es un gas tóxico, el cual se mezcla fuertemente con la hemoglobina en la sangre, lo que causa la reducción de la cantidad de oxígeno que es transportado. Así mismo puede llegar a producir cambios morfológicos en el corazón y cerebro de la fauna, además de impedir el funcionamiento normal psicomotoras de los mismos.

Contaminante	Característica general	Efectos en la salud humana
Dióxido de azufre (SO ₂)	<p>Es un gas incoloro y se caracteriza por presentar un olor irritante y fuerte. Es el tercer gas más emitido por causas no naturales.</p> <p>Su tiempo de transcurso en la atmósfera es corto, aproximadamente entre 2 a 4 días.</p> <p>Este gas es producto de actividades humanas como la metalurgia y la fabricación de ladrillos, que a causa de la combustión de combustibles no renovables y la reacción que tiene con el medio ambiente, el azufre contenido es emitido a la atmosfera. Su procedencia natural es gracias a la actividad volcánica.</p> <p>Por último, se debe tener en cuenta que otra fuente importante de emisión es la oxidación del H₂S.</p>	<p>Aproximadamente el 50% de este gas que llega a la atmósfera, regresa a depositarse en la superficie y el restante se convierte en iones de sulfato (SO₄⁻²). Por lo anterior, es un precursor importante de la lluvia ácida, acidificando cuerpos de agua superficiales y suelos, además de producir la corrosión de estructuras metálicas.</p>
Óxidos de nitrógeno	<p>Es producido por las combustiones ejecutadas a altas temperaturas, debido a la reacción del nitrógeno y el oxígeno del ambiente natural, y el combustible. Es reconocido por ser predecesor del smog fotoquímico.</p>	<p>Este es causante de enfermedades respiratorias como: fibrosis pulmonar crónica, bronquitis, entre otros. Además, produce la irritación y reducción del desarrollo de las plantas.</p>
Material particulado (PM)	<p>Está compuesto por polvo u hollín principalmente. Es constituido especialmente por compuestos inorgánicos como los silicatos y los metales pesados, y compuestos orgánicos asociados a partículas de carbono.</p> <p>Los metales pesados asociados al material particulado son: el arsénico, cadmio, cobre, mercurio, plomo, entre otros, y los cuales son de interés toxicológico</p>	<p>Es causante de tos, dificultad para respirar, empeoramiento del asma, aumento de enfermedades coronarias, daño al pulmón, modificaciones en la coagulación de la sangre y muerte prematura en personas con enfermedades cardiacas y pulmonares.</p>

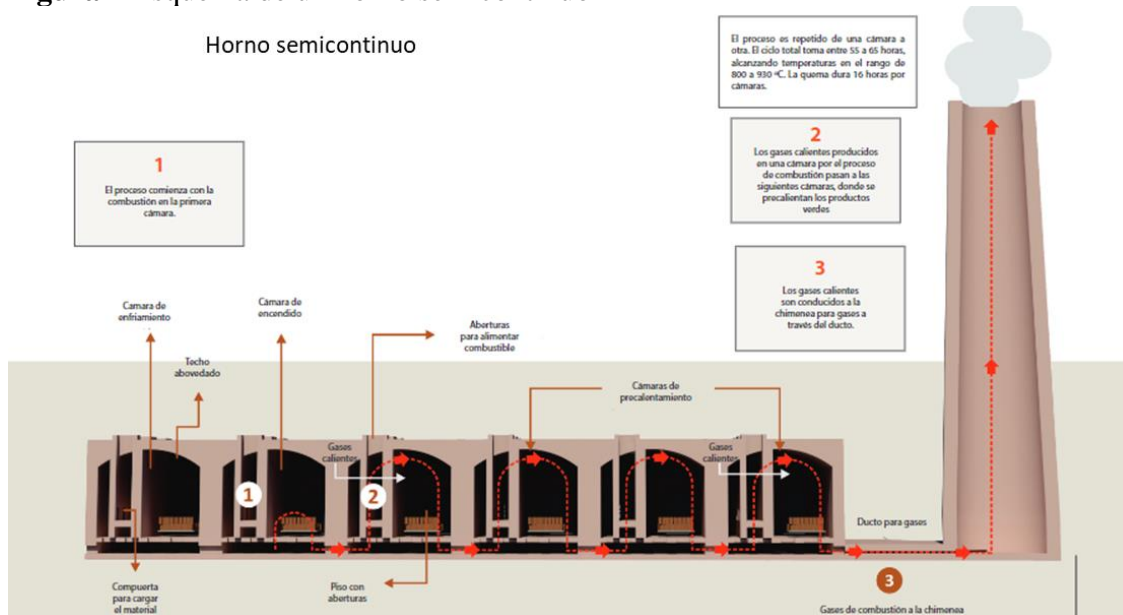
Nota. Fuente: (Buitrago & Rojas, 2017) ajustada por el autor.

6.1.4 Producción de ladrillos en hormo semicontinuo

La producción de ladrillos requiere de un combustible y tiempo de cocción que dependen de la capacidad del horno. Para una producción tecnificada son necesarias grandes cantidades de combustible y tiempo de cocción.

A continuación, se muestra una representación de un esquema de un hormo semi continuo (**Figura 1**), el cual sirve para ejemplificar el orden y la función que tiene un hormo de esta clase.

Figura 1 Esquema de un hormo semicontinuo



Nota. Adaptado de *horno CEDAN (semicontinuo)*, por el autor, 2022. Enlace: https://documen.site/download/horno-cedan-semi-continuo_pdf

Según Arango & Rodríguez (2017), el horno semicontinuo de la ladrillera La Fe, cuenta con 10 cámaras, cada una de ellas funciona 8 horas diarias para generar una producción de ladrillo de 2500 unidades en el día, su combustible primario es el carbón vegetal, lo que supone 500 kilogramos de dicho combustible en condiciones ideales. Se debe tener en cuenta que, las características de producción descritas anteriormente serán asociadas a una estabilidad atmosférica.

6.1.5 Formas de sedimentación o precipitación del dióxido de azufre.

La combustión generada a partir del uso de combustibles fósiles como el carbón generan subproductos como el dióxido de azufre, comúnmente emitidos por actividades humanas, debido a la reacción que ocurre entre el aire de la combustión y el azufre contenido por el combustible (Buitrago & Rojas, 2017).

Cerca de la mitad de las emisiones producidas por actividades antrópicas que llegan a la atmósfera vuelve a depositarse en la superficie terrestre y el resto se convierte en iones de sulfato (SO_4^{-1}) (Wark & Warner, 2002).

Lo anterior es importante ya que el dióxido de azufre es uno de los principales precursores de la lluvia ácida junto con los óxidos de nitrógeno, compuestos generados por actividades antrópicas. Se debe tener en cuenta que la lluvia se convierte en ácida cuando los precursores, intervienen en las concentraciones normales de la atmósfera causando que el pH de la lluvia disminuya por debajo de 5.6 en la escala de pH (IDEAM, 2022).

Según Manahan (2006) la deposición ácida en la superficie de la tierra hace referencia a la sedimentación de gases secos como el dióxido de azufre y sales ácidas. Por lo anterior, la deposición en forma de solución es la lluvia ácida y la deposición de los gases secos y compuestos son deposición seca. Esta última consiste en el retorno de los gases, como por ejemplo los óxidos de azufre, al medio en forma de partículas o aerosoles siendo depositados de forma seca.

La deposición seca se da generalmente a pocos kilómetros de la fuente de emisión, mientras que la precipitación húmeda que es la composición de vapor de agua, el oxígeno

y los gases contaminantes pueden viajar varios kilómetros, precipitándose al medio en forma de lluvia ácida (IDEAM, 2022).

6.2 Modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos

Un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos es una expresión matemática que define la relación entre un gas emitido por una actividad antropogénica o natural con el medio ambiente, en donde también interactúan diversas características meteorológicas, con lo cual pretende estimar la concentración de un contaminante de una fuente fija (Arzate, 2004)

Es necesario describir de una manera corta los diferentes tipos de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos que se pueden llegar a encontrar (**Tabla 3**)

Tabla 3 Tipos de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos.

Tipo de modelo	Descripción
Modelos gaussianos	Es un modelo utilizado comúnmente para contaminantes no reactivos. Este suministra un gran acercamiento matemático a la dispersión de contaminantes. Se debe resaltar que los modelos predictivos realizados por este método han sido satisfactorios. Este modelo está basado en la distribución Gaussiana (o normal) de la estadística, en donde se asume que el material derivado de una fuente puntual permanentemente es movilizado en la dirección predominante del viento, encontrándose las concentraciones más elevadas cerca de la fuente de emisión y que estas disminuyen a medida que se alejan de la misma.
Modelos numéricos	Son utilizados cuando los contaminantes evaluados se encuentran en estado de reacción y forman contaminantes secundarios. Estos modelos son más adecuados que los modelos Gaussianos para el estudio de una fuente de un área urbana y cuando son explícitamente contaminantes reactivos. Una de las desventajas que tiene este modelo, es el requerimiento de bases de datos amplias y dificultosas, motivo por el cual no son empleados de forma común. La aplicación más habitual se realiza en la formación del ozono y el análisis del cambio que se presenta en el SO ₂ y el NO _x , para formar sulfatos y nitratos respectivamente, los cuales son precursores de la lluvia ácida.
Modelos estadísticos	Son frecuentemente empleados cuando los procesos fisicoquímicos no resultan ser lo suficientemente claros, o de ocasiones en que las bases de

Tipo de modelo	Descripción
	<p>datos no son totalmente confiables. Estos modelos están fundamentados en metodologías estadísticas para estudiar la tendencia, relaciones con la calidad del aire, datos atmosféricos y para pronosticar el cambio de una situación de contaminación en un plazo corto. Lo descrito anteriormente se desarrolla utilizando una comparación de distribución de frecuencias, evaluación de series de tiempo y diversos métodos estadísticos. La principal desventaja de estos modelos es que no es posible establecer la correspondencia entre la causa-efecto; no obstante, son eficientes para realizar predicciones en un breve tiempo, en donde es primordial la información de concentraciones y sus respectivas tendencias.</p>
Modelos de caja	<p>La principal característica de este tipo de modelos es que este asume que los contaminantes emitidos se combinan o mezclan de forma homogénea en un volumen o caja de aire de extensiones finitas. Este requiere de algunos parámetros como: la dirección del viento, viento de costado y las dimensiones verticales de la caja. Además, se debe fijar el tiempo de emisión del contaminante. Estos modelos asumen que los gases contaminantes emitidos se mezclan en su totalidad de una forma rápida con el aire disponible para la dilución. También, supone que dichos gases son químicamente estables y persisten suspendidos en el aire.</p> <p>Son utilizados para evaluar y analizar la calidad del aire, normalmente en aeropuertos.</p>
Modelos físicos	<p>Implica emplear túneles de viento, conductos de agua u medios similares que permitan la modelación de fluidos. Son útiles para modelar escenarios de flujo complejo, con terrenos particularmente irregulares, en donde se presenten obstrucciones por edificaciones (downwash) o sobre elevaciones de terreno sobresalientes. El estudio de la pluma de contaminación se realiza en áreas urbanas.</p> <p>Este modelo se caracteriza por ser el que más se aproxima a la realidad, sin embargo, no es muy utilizado por los elevados costos que este requiere.</p>
Modelos Eulerianos	<p>Este permite realizar aproximaciones matemáticas sobre la dispersión de contaminantes a las ecuaciones Eulerianas (conservación de la masa del contaminante). Son utilizados en simulaciones de pronósticos meteorológicos.</p> <p>En ciertos casos puntuales, estos modelos contienen submodelos para la simulación de la turbulencia, en donde se tienen presentes las ecuaciones básicas de la hidrodinámica, balance del momentum, balance de calor y humedad, leyes de los gases, balances de masa de aire por debajo de la capa de mezcla y el balance de los contaminantes de interés.</p>
Modelos Lagrange (PUFF)	<p>Contiene todos los modelos en donde las plumas de contaminación se encuentran fraccionadas, emisiones PUFF o partículas, es decir, cuando trata de emisiones fugaces no continuas.</p> <p>Dichos modelos utilizan un número de partículas hipotéticas para modelar la dinámica de un parámetro físico determinado, sin embargo, debe cumplir con las siguientes condiciones: las partículas no deben tener volumen, se desprecia la flotación de estas y el trayecto de todas las partículas es igual a la pluma emitida por la fuente.</p>

Tipo de modelo	Descripción
Modelos de receptor	Este modelo parte de las concentraciones percibidas en un receptor y busca distribuir equitativamente las concentraciones observadas en un punto de muestreo entre diversos tipos de fuente. Estos modelos se encuentran fundamentados en los balances de masa.
Modelos semi empíricos	En estos modelos se encuentran diferentes modelos empleados para aplicaciones prácticas específicas. Son especializados para las radicales reducciones y un alto grado de parametrización empírica.

Nota. Fuente: (Buitrago & Rojas, 2017) ajustada por el autor.

7. Metodología

En esta sección del documento se desarrollaron los tres pasos que comprendieron en primera instancia la búsqueda de información correspondiente a los insumos requeridos para la obtención de la dispersión del contaminante de interés, como los son: especificaciones de la fuente de emisión, condiciones climatológicas del área de estudio como lo fueron: la dirección y velocidad del viento, temperatura ambiente y presión atmosférica.

Los parámetros de velocidad y dirección del viento, y temperatura ambiente, fueron tomados del atlas climatológico producido por el IDEAM, realizando una sobreposición con el área de estudio que permitió establecer los valores de los parámetros de interés, mientras que, para la presión atmosférica, se consultó el sitio web “*Windy*”. Así mismo se descargó el DEM 12.5 m del satélite Alos Palsar, correspondiente al área de estudio, el cual fue procesado (proyectado y cortado) al área de estudio de interés.

El primer paso fue determinar características meteorológicas del área de estudio, en donde se logró establecer que existen dos estabilidades atmosféricas predominantes, por lo cual se realizaron dos simulaciones de la dispersión, modelando ambas estabilidades y utilizando valores hipotéticos elevados en el caso de la estabilidad atmosférica más inestable.

El segundo paso desarrollado fue resolver las ecuaciones propuestas en el modelo de dispersión de contaminantes Gaussiano, obteniendo así los valores numéricos y constantes correspondientes para cada parámetro, que, junto con el DEM, fueron utilizados como insumos dentro del Model Builder. En este paso, también se calcularon las distancias

euclidianas para X y Y. Allí finalmente se procedió a resolver las ecuaciones por medio de la calculadora ráster para obtener como resultado la pluma de contaminación emitida por la ladrillera.

Por último, se analizaron las concentraciones dispersas a lo largo y ancho de la fuente de emisión, de las dos modelaciones relacionadas a las estabilidades atmosféricas, con el objetivo de establecer los comportamientos de las plumas de contaminación y su relación con su entorno, así como sus similitudes y diferencias entre sí.

Para llevar a cabo lo planteado anteriormente, fue necesario realizar una búsqueda bibliográfica exhaustiva en proyectos de grado disponibles de los repositorios de universidades a nivel nacional, con el objetivo de reunir las diversas variables que son requeridas como insumo del modelamiento atmosférico.

La búsqueda de información trajo consigo la tesis de grado de Arango & Rodríguez (2017), en donde además de contar con las dimensiones y condiciones de la chimenea, se incluyeron los resultados diarios medidos por el Subsistema de Información de Calidad del Aire (SISARE) para las concentraciones de dióxido de azufre en la vereda de Patio Bonito, lo cual permitió establecer un escenario real con el cual se pueden comparar las concentraciones arrojadas por las dos modelaciones realizadas.

7.1 Descripción del área de estudio

Geográficamente el relieve de Nemocón se encuentra dentro de la sabana de la ciudad de Bogotá, en donde su inclinación en general es leve, con algunos puntos específicos moderadamente inclinados. Su centro urbano principal se encuentra localizado

a los 5° 04' 09" de latitud norte y 73° 52' 48" de longitud oeste. (Arango & Rodríguez, 2017).

En el perímetro del municipio de Nemocón prevalece el clima frío, mientras que la precipitación anual es de 629.7 milímetros, siendo la época más lluviosa la que va desde septiembre hasta diciembre y la más seca desde diciembre hasta marzo. (Alcaldía de Nemocón - Cundinamarca, 2022)

Los límites político-administrativos del municipio de interés se distribuyen de la siguiente forma (**Tabla 4**). Allí se reúnen los municipios colindantes con el municipio de Nemocón en las principales orientaciones cardinales.

Tabla 4 Límites del municipio de Nemocón.

Puntos cardinales	Límites
Norte	Municipio de Tausa
Sur	Municipios de Gachancipá y Zipaquirá
Oriente	Municipio de Suesca
Occidente	Municipio de Cogua, ríos Neusa y Checua

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la ocupación y distribución del territorio (**Tabla 5**), muestra el área utilizada para la zona rural y urbana, así como los datos de altitud y temperatura media del mismo.

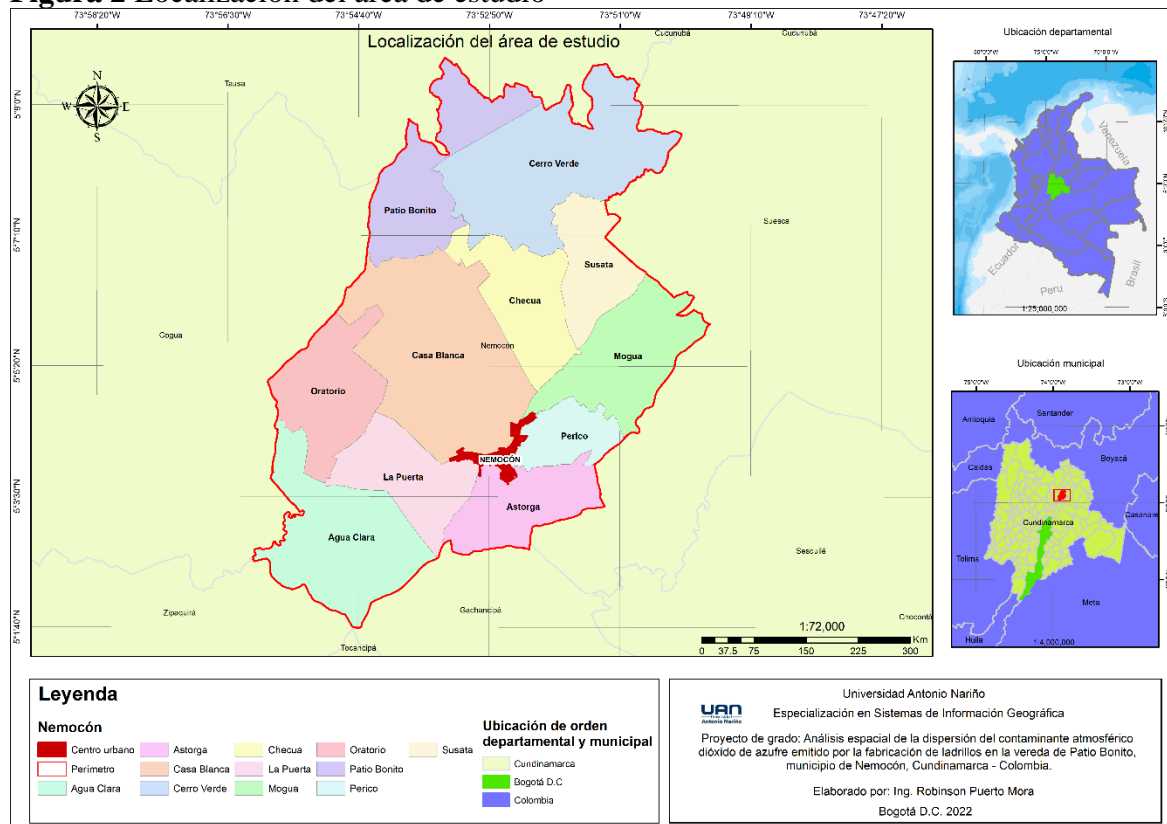
Tabla 5 Ocupación y distribución de Nemocón.

Característica	Descripción
Extensión total	Nemocón ocupa una extensión de 9811.19 ha
Extensión del área urbana	El área urbana tiene una extensión de 61.19 ha
Extensión del área rural	El área rural tiene un total de 9750 ha
Altitud de la cabecera municipal	La cabecera municipal se encuentra a 2587 m.s.n.m
Temperatura media	12.8 °C
Distancia de referencia	Se encuentra a 65 Km de Bogotá D.C

Nota. Fuente: Datos tomados de (Alcaldía de Nemocón - Cundinamarca, 2022) ajustada por el autor.

La ubicación del área de estudio deja en evidencia a su vez que el municipio de Nemocón está conformado por 11 veredas y su cabecera municipal (**Figura 2**).

Figura 2 Localización del área de estudio



Nota. Fuente: elaboración propia, con insumos del IGAC cartografía 1:100000.

Las principales zonas de amortiguación y reserva de recursos naturales son los cerros que se encuentran rodeando la sabana del municipio, siendo el lado oriental del mismo el que presenta una gran capacidad para el desarrollo de ecoturismo, lo cual significaría ingresos a las comunidades de dicho sector (Alcaldía municipal de Nemocón, 2020).

La economía del área de estudio se encuentra estrechamente relacionada a la producción de Colín, el cual es un material directo usado en la elaboración de cerámicas y

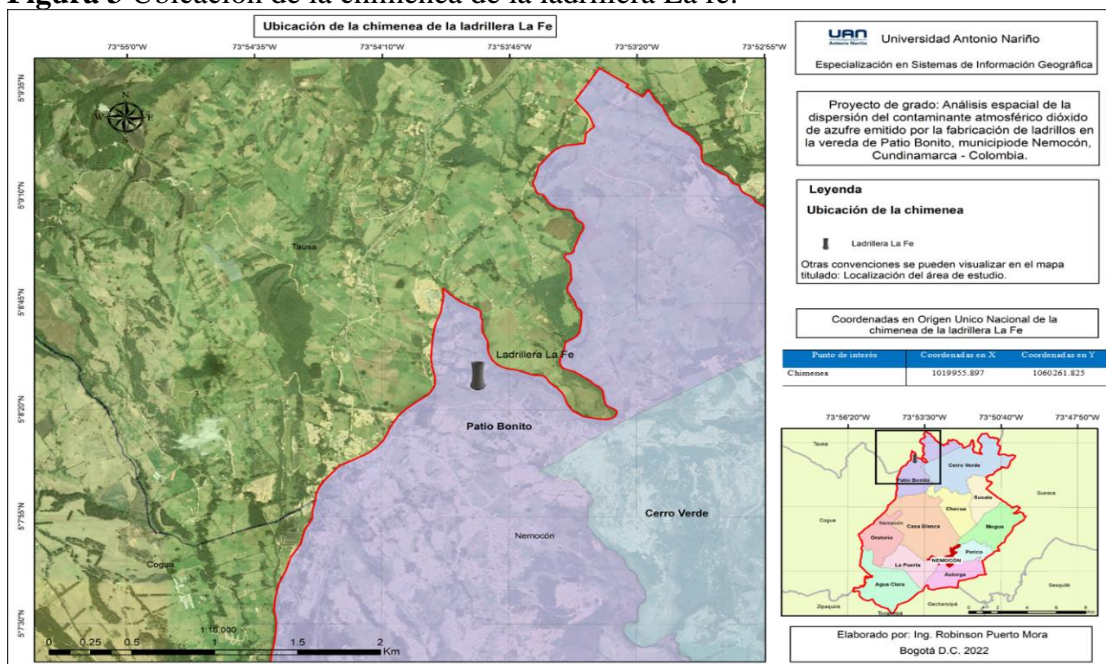
vajillas entre otros. Así mismo es productor de procedentes de la arcilla, tales como ladrillos, adoquines y bloques.

Los cultivos de flores son apreciados a sí mismos como industrias empresariales y ocupan gran porción de la mano de obra del Municipio. (Alcaldía de Nemocón - Cundinamarca, 2022)

7.2 Ubicación y dimensiones de la chimenea

Para determinar la ubicación de la chimenea de la ladrillera La Fe, se empleó la búsqueda por medio de Google Earth, buscando directamente con el nombre de la ladrillera, lo cual mostró la entrada principal. Por lo anterior, fue necesario utilizar un zoom que permitió identificar la fuente puntual de emisión. El punto que representa la chimenea fue guardado como un KML para posteriormente ser exportado al software ArcGIS, en donde se calcularon las coordenadas en origen único nacional (**Figura 3**).

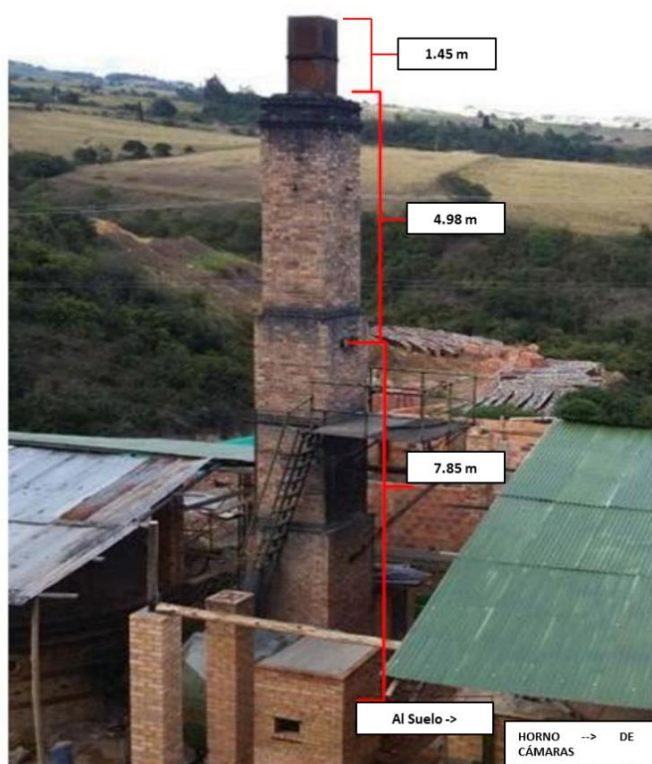
Figura 3 Ubicación de la chimenea de la ladrillera La fe.



Nota. Fuente: elaboración propia con insumos del IGAC cartografía 1:100000.

Por otro lado, las dimensiones de la chimenea del horno semicontinuo de la ladrillera La Fe (**Figura 4**), que es un insumo indispensable para la elaboración del modelo, se encontraron en el proyecto de grado de Arango & Rodríguez (2017), en donde se lograron visualizar los segmentos que conforman la estructura completa del ducto de la chimenea para obtener una altura total de 14.28 metros.

Figura 4 Dimensiones de la chimenea del horno semicontinuo de la ladrillera La Fe



Nota. (Arango & Rodríguez, 2017) ajustada por el autor.

7.3 Condiciones en chimenea

Las condiciones de la chimenea (**Tabla 6**) se relacionan en su totalidad con los datos obtenidos por la empresa Proicsa Ingeniería Ltd. y los cuales fueron utilizados como uno de los insumos requeridos para llevar a cabo el modelo de dispersión del contaminante atmosférico dióxido de azufre.

Tabla 6 Condiciones de la chimenea

Parámetro	Abrev.	Horno de cámaras	Unidad
Diámetro equivalente	(De)	0.66	m
Velocidad del gas	(Vs)	9.7	m/s
Temperatura del gas	(ts)	22.67	°C
Presión estática	(Ps)	6.99	mm H ₂ O
Peso molecular Seco	(Md)	28.98	g/g-mol

Nota. Fuente: (Arango & Rodríguez, 2017) ajustada por el autor.

7.4 Emisión de dióxido de azufre

Para este proyecto se contemplaron dos escenarios de emisión. El primero descrito y definido en el marco teórico del actual documento, el cual, fue establecido en el trabajo de grado de Arango & Rodríguez (2017), en donde con el uso de 500 kilogramos de carbón vegetal se obtienen 2500 unidades de ladrillos en el día y el segundo escenario, el cual es hipotético, el cual plantea una producción de 1500 ladrillos, con el uso de 300 kg de combustible en 40 horas (es decir el uso de 10 cámaras durante 4 horas).

Lo anterior, con el objetivo de asignar el resultado de mayor valor a la estabilidad atmosférica más inestable y de esa forma generar dos modelos de dispersión que permitan la comparación de las concentraciones emitidas.

Las condiciones de los escenarios descritos anteriormente fueron reemplazados a la ecuación utilizada para determinar la emisión del gas en g/s.

Es necesario realizar una conversión de unidades utilizando la siguiente fórmula

$$Q = \left(\frac{nKg}{Tc} \right) * \left(\frac{1 h}{3600 s} \right) * \left(\frac{1000g}{1kg} \right)$$

Donde:

Q: Emisión de gas (g/s)

nKg: cantidad de combustible utilizado (kg).

T_c: tiempo de cocción (horas).

7.5 Condiciones meteorológicas

Las condiciones meteorológicas son utilizadas como variables dentro del modelo de dispersión de contaminantes. Algunas de las variables que intervienen son: la velocidad y dirección del viento, la radiación solar y la cobertura de nubes.

7.5.1 Velocidad y dirección del viento

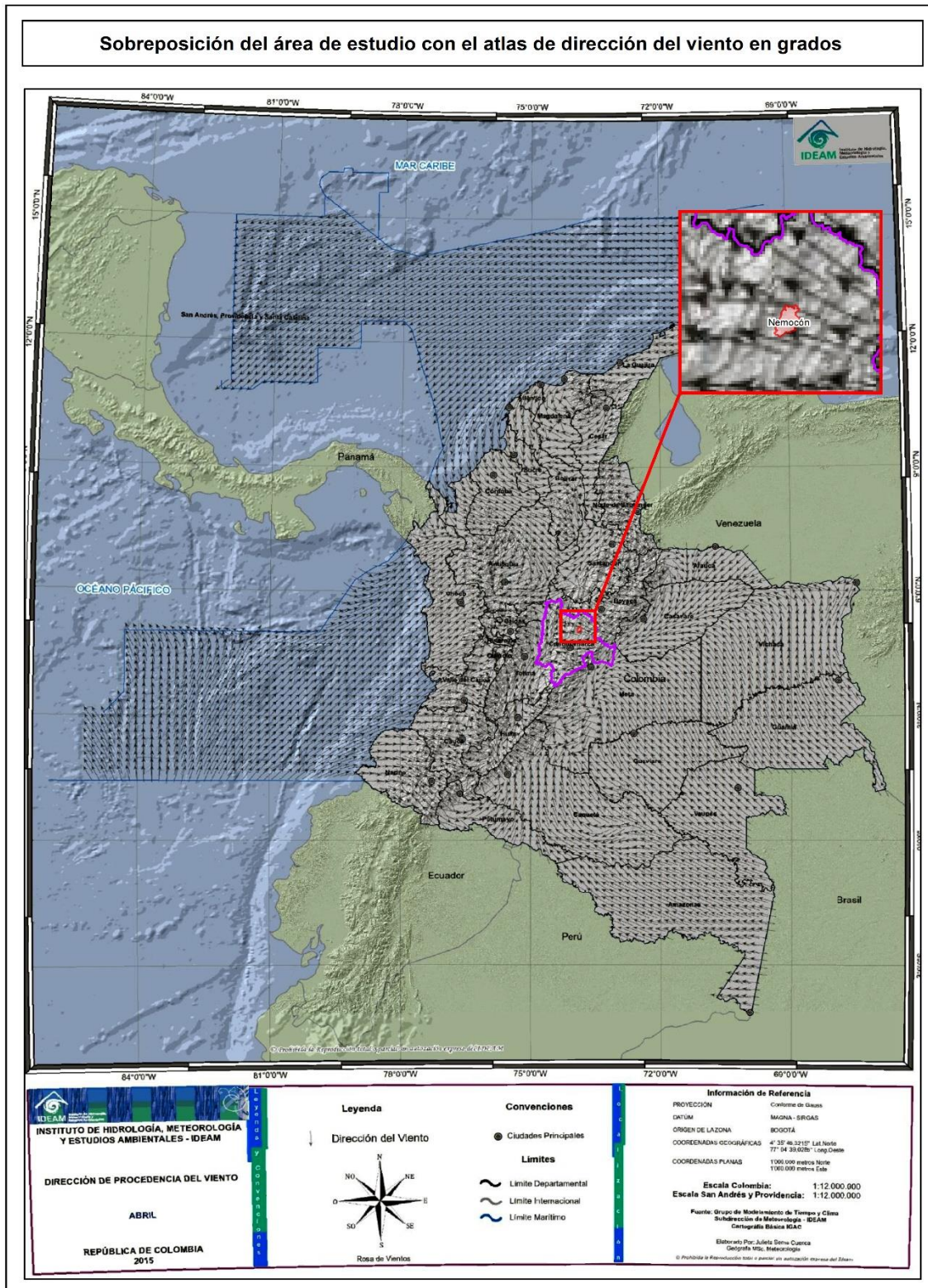
Para establecer la velocidad y dirección del viento, se utilizaron los mapas del Atlas climatológico colombiano, alojados en el portal <http://atlas.ideam.gov.co/presentacion/>, elaborados por el IDEAM con el apoyo de UPME en el año 2015. Para este estudio se utilizaron los mapas temáticos correspondientes a la velocidad media mensual del viento a 10 metros de altura y dirección media mensual, ambos para el mes de abril, publicados en el año 2015. Estos documentos buscan representar la distribución espaciotemporal de los indicadores del clima, de los vientos y de la radiación solar en Colombia (IDEAM, 2015).

Los mapas mencionados en el párrafo anterior fueron georreferenciados con herramientas del software ArcGIS, con el objetivo de sobreponer el área de estudio en cada uno de los mapas de interés y de esa forma establecer los parámetros de velocidad y dirección del viento. Durante el procesamiento y en aras de mantener un sistema único de coordenadas, dichos mapas fueron proyectados a coordenadas planas según el origen único nacional establecido por el IGAC.

La sobreposición del área de estudio con el atlas climatológico correspondiente a la velocidad media mensual del viento a 10 metros de altura (**Figura 5**), permite evidenciar este parámetro para el área de estudio, es decir, el municipio de Nemocón (polígono rojo).

Por otro lado, el procedimiento para establecer la dirección del viento en grados fue similar al descrito en párrafos anteriores. La sobreposición del área de estudio con el atlas referente a la dirección del viento (**Figura 6**) evidencia que dicha sobre posición arroja una gran cantidad de vectores representantes de la dirección del viento, que permiten realizar una proyección o extensión de estos, con el objetivo de establecer el ángulo exacto al cual se está haciendo referencia.

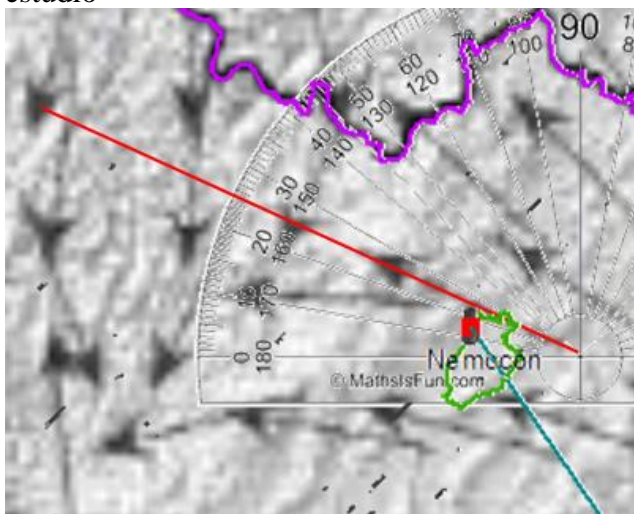
Figura 6 Sobreposición del área de estudio con el atlas climatológico correspondiente a la dirección del viento



Nota. Elaboración propia con insumos de la cartografía básica IGAC 1:10000 y el Atlas climatológico del IDEAM.

Como se mencionó en el párrafo inmediatamente anterior, la proyección o extensión del vector más cercano al área de estudio (línea representada de color rojo) permite establecer el ángulo exacto al cual se está refiriendo el atlas relacionado (**Figura 7**).

Figura 7 Proyección del vector representante de la dirección del viento sobre el área de estudio

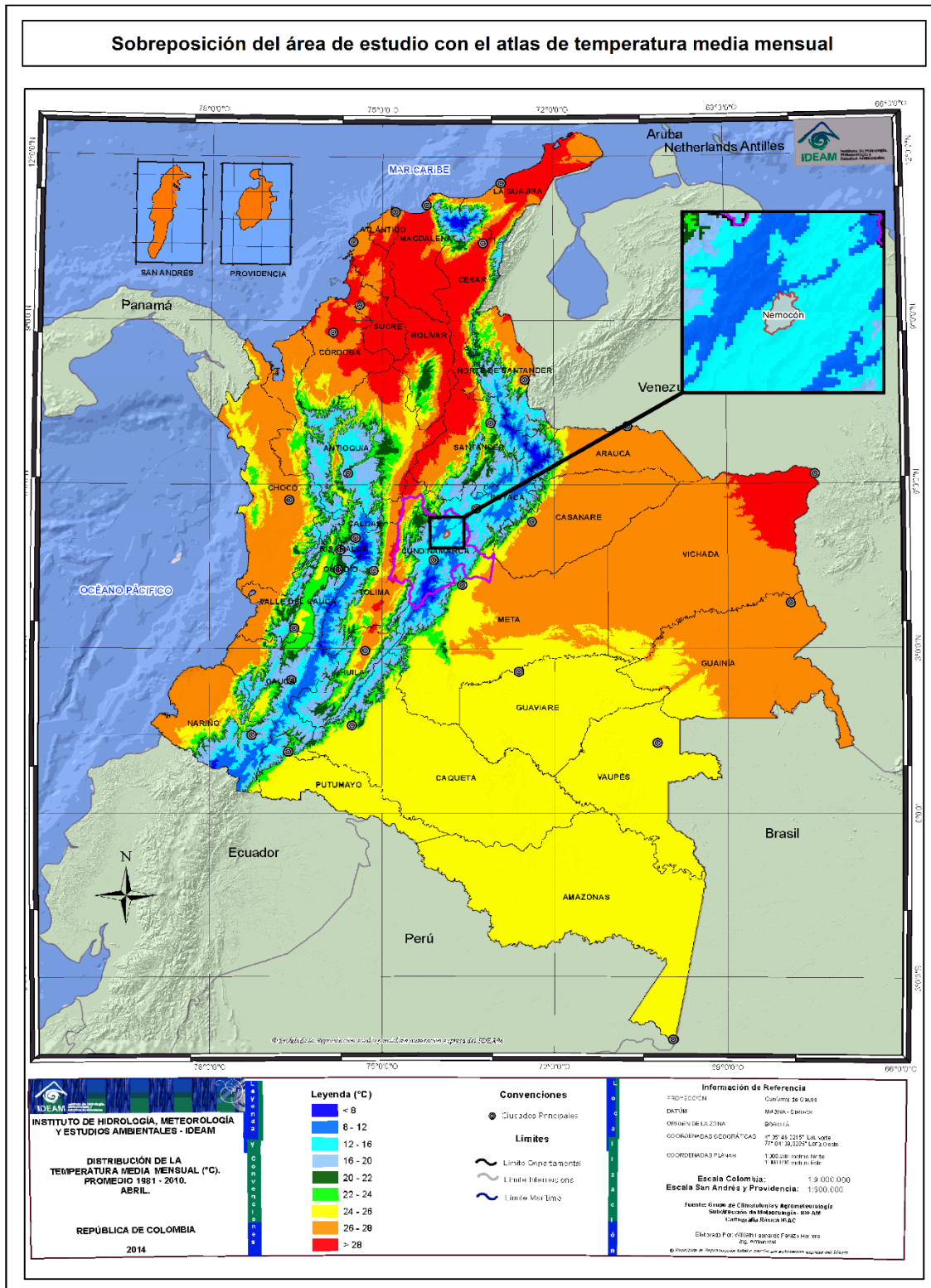


Nota. Elaboración propia con insumos de la cartografía básica IGAC 1:10000 y el Atlas climatológico del IDEAM.

7.5.2 Temperatura ambiente

Dentro de los atlas encontrados en el IDEAM, también se encuentra el atlas climatológico de la distribución de la temperatura media mensual para el mes de abril. Dicho atlas se procesó de igual forma que los atlas de velocidad y dirección del viento, con el objetivo de sobreponer el área de estudio y estimar la temperatura ambiente del área de interés (**Figura 8**).

Figura 8 Sobreposición del área de estudio con el atlas climatológico correspondiente a la distribución de la temperatura media mensual.

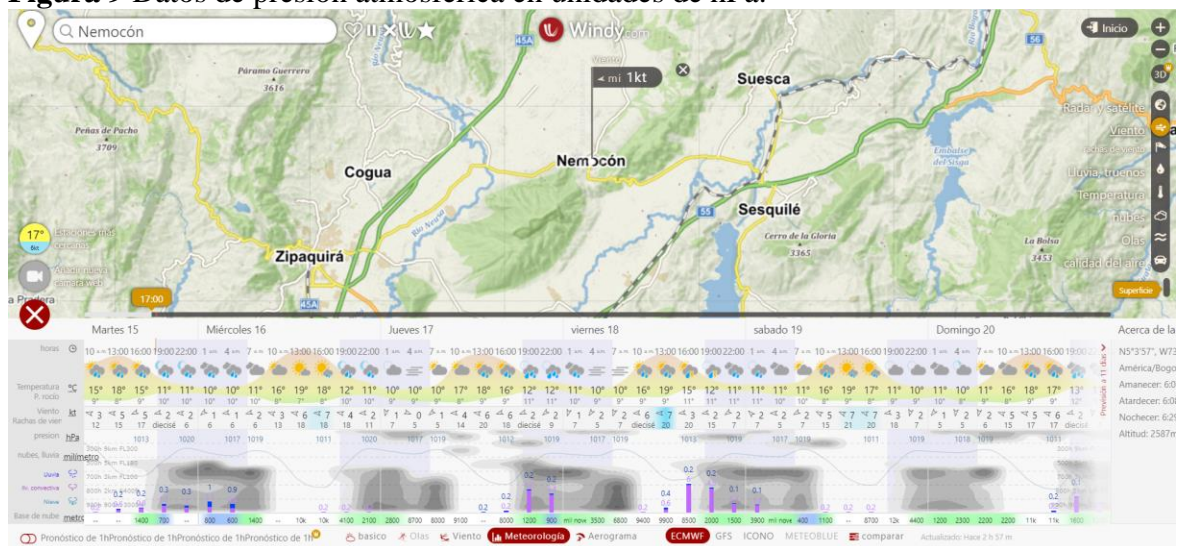


Nota. Elaboración propia con insumos de la cartografía básica IGAC 1:10000 y el Atlas climatológico del IDEAM.

7.5.3 Presión atmosférica

La presión atmosférica es una variable que incide directamente con la elevación de la pluma o columna de humo. Este valor se obtuvo a partir de la página web climatológica “windy” la cual arroja valores horarios de la presión atmosférica en unidades de hPa. De dicha página web, se tomó el menor y el mayor valor de presión para el mes de abril (Figura 9), con el objetivo de utilizar el menor valor en la estabilidad atmosférica C y el mayor valor en la estabilidad atmosférica B, teniendo en cuenta que esta última es la que presenta una estabilidad atmosférica más inestable con respecto a la clasificación C. Las estabilidades atmosféricas serán definidas en el siguiente ítem de este documento.

Figura 9 Datos de presión atmosférica en unidades de hPa.



Nota. Fuente: (Windy, 2022).

Es importante resaltar en este punto los valores elegidos de la página web identificada anteriormente (Tabla 7) para el desarrollo de los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos.

Tabla 7 Presión atmosférica según la estabilidad atmosférica para el municipio de Nemocón

Estabilidad atmosférica	Presión atmosférica	unidades
B	1020	hPa
C	1010	hPa

Nota. Fuente: (Windy, 2022) ajustada por el autor.

7.6 Estabilidad atmosférica

La estabilidad atmosférica interviene en la dispersión de contaminantes atmosféricos, siendo por lo tanto una variable de gran interés a la hora de realizar la modelación. En una atmosfera estable, los contaminantes tendrán una baja dispersión y, como consecuencia, la concentración de estos incrementará. (Vidal-Daza & Pérez, 2018)

Por la metodología empleada en la sobreposición del área de interés y los atlas del IDEAM, se pudo inferir que los tipos de estabilidad atmosférica que predominan el área de estudio son B o C, ya que son las clasificaciones que se encuentran en un rango de velocidad del viento a 10 metros de altura correspondiente a 4 y 5 m/s, según el sistema de clasificación de Pasquill (**Figura 10**).

Figura 10 Sistema de clasificación atmosférica de Pasquill
Pasquill (1961) stability classification system.

Surface (10 m) wind speed (ms ⁻¹)	Daytime ^a Insolation			Nighttime ^b cloud cover	
	Strong ^c	Moderate	Slight ^d	Thinly overcast or > 4/8 low cloud	< 3/8 cloud
< 2	A	A-B	B	–	–
2–3	A-B	B	C	E	F
3–5	B	B-C	C	D	E
5–6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Nota. Fuente (Kahl & Chapman, 2018)

Según las categorías propuestas por Pasquill 1961, la clasificación atmosférica se clasifica y describen de la siguiente forma:

- A: totalmente inestable
- B: moderadamente inestable
- C: ligeramente inestable
- D: neutral
- E: ligeramente estable
- F: totalmente estable

7.7 Coeficientes de dispersión horizontal y vertical (σ_y , σ_z)

Indican la amplitud de la dispersión de la masa inicial en los ejes Y y Z en función de la distancia del eje X. Su determinación se logra a través de las correlaciones de McMullen. (Molano & Díaz, 2019).

La correlación propuesta por McMullen en 1975 se expresa de la siguiente forma (Arzate, 2004)

$$\sigma = \exp\left[I + J(\ln x) + K(\ln x)^2\right]$$

En donde:

σ : Desviación normal de la concentración del contaminante, ya sea en horizontal σ_y o vertical σ_z

lnx: Logaritmo natural de la distancia a nivel del suelo, expresada en kilómetros.

I, J, K: Constantes empíricas para una condición de estabilidad correspondiente al valor de σ .

Para determinar las constantes empíricas, se deben tener en cuenta las estabilidades atmosféricas del área de interés. Los valores constantes de σ_y (**Figura 11**) y de σ_z (**Figura 12**) se encuentran relacionados directamente con las condiciones como: la distancia a nivel del suelo y condiciones de estabilidad.

Figura 11 Valores de I, J, K para σ_y

Condición de Estabilidad	I	J	K
A	5.357	0.8828	-0.0076
B	5.058	0.9024	-0.0096
C	4.651	0.9181	-0.0076
D	4.230	0.9222	-0.0087
E	3.992	0.9222	-0.0064
F	3.553	0.9181	-0.0070

Nota. Fuente (Arzate, 2004)

Figura 12 Valores de I, J, K para σ_z

Condición de Estabilidad	I	J	K
A	6.035	2.1097	0.2770
B	4.694	0.0136	0.0136
C	4.110	-0.0020	-0.0020
D	3.414	-0.0316	-0.0316
E	3.057	-0.0450	-0.0450
F	2.621	0.6564	-0.0540

Nota. Fuente (Arzate, 2004)

Teniendo en cuenta que las estabildades atmosféricas predominantes se clasificaron en B y C, los valores constantes relacionados corresponden a los coeficientes de dispersión horizontal y vertical que intervinieron en la modelación (**Tabla 8**).

Tabla 8 Valores de σ_y y σ_z para las estabildades atmosféricas B y C

Tipo de estabilidad atmosférica	σ_y			σ_z		
	I	J	K	I	J	K
B	5.058	0.9024	-0.0096	4.694	0.0136	0.0136
C	4.651	0.9181	-0.0076	4.110	-0.0020	-0.0020

Nota: Elaboración propia.

7.8 Cálculo de la elevación de la pluma o columna de humo

La columna de humo o pluma emergente de la fuente puntual se elevará a una altura adicional como consecuencia del flujo másico que se desplaza de forma vertical y la temperatura de este, ya que el gas producto de la actividad sale con una velocidad diferente a la velocidad del viento a la altura de la chimenea y mayor temperatura en relación con el medio ambiente (Arzate, 2004).

Por lo anterior, se debe calcular la elevación de la pluma, para ello, se utilizó la ecuación de Holland. Dicha ecuación, estima el comportamiento de la pluma con respecto a las diferentes variables asociadas presentadas y descritas a continuación:

$$\Delta h = \frac{v_s \cdot d}{u} \left[1.5 + 2.68 \times 10^{-3} \cdot P \cdot d \left(\frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \right]$$

Donde:

Δh : Elevación de la pluma

V_s : es la velocidad de salida del gas (m/s)

d: es el diámetro de salida de la emisión (m)

P: Presión (hPa)

T_s: temperatura de salida del gas (°K)

T_a: temperatura ambiente (°K)

U: velocidad del viento (m/s)

H_s: Altura de la chimenea (m)

Con los parámetros meteorológicos caracterizados para el área de estudio, se desarrolló la ecuación de Holland utilizando los valores relacionados para las dos estabilidades atmosféricas del área de estudio (**Tabla 9**).

Tabla 9 Valores establecidos para el desarrollo de la ecuación de Holland, según la estabilidad atmosférica.

Variable	Estabilidad atmosférica	
	B	C
V _s (m/s)	9.7	9.7
d (m)	0.66	0.66
P (hPa)	1020	1010
T _s (°K)	295.82	295.82
T _a (°K)	289.15	285.15
U (m/s)	5	4
H _s (m)	14.28	14.28

Nota: Elaboración propia.

7.9 Cálculo de la altura efectiva de la emisión

Para determinar la altura efectiva a la cual se realiza la emisión, que no es más que la altura real en la que la pluma inicia su trayectoria horizontal, se debe desarrollar la siguiente ecuación (Molano & Díaz, 2019)

$$H = h + \Delta h$$

Donde:

H: altura efectiva de la de la emisión (m)

h: altura de la chimenea (m)

Δh : altura de la elevación de la pluma (m)

7.10 Velocidad del viento a la altura de la emisión

Diferentes factores presentes en el medio de dispersión, como estructuras antrópicas o coberturas vegetales de gran tamaño, pueden afectar la velocidad con la que se desplaza el viento. Por lo cual Arzate (2004) indica que: *“es indispensable tener en cuenta los cambios de la velocidad del viento relacionado al tipo de suelo, rural o urbano, en el cual se esté elaborando la determinación de propagación de un contaminante. También se debe considerar un ajuste a dicha velocidad ya que su medición se efectúa a 10 metros de altura.”*

Una de las opciones propuesta para establecer la velocidad del viento a la altura de la emisión se encuentra descrita por la siguiente ecuación (Arzate, 2004):

$$U_2 = U_1 \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^n$$

Donde:

U1: velocidad del viento a la altura de referencia (m/s)

U2: velocidad del viento a la altura efectiva de la emisión (m/s)

H1: altura de referencia (m)

H2: altura efectiva de la chimenea (m)

n: constante

Los valores constantes de n (**Figura 13**) hacen referencia a los valores relacionados con el tipo de superficie en la que se encuentra la fuente de emisión, la cual puede ser rural o urbana.

Figura 13 Valores constantes de n

Estabilidad atmosférica	Superficie rural	Superficie urbana
	n	n
<i>A</i>	0.10	0.15
<i>B</i>	0.15	0.15
<i>C</i>	0.20	0.20
<i>D</i>	0.25	0.25
<i>E</i>	0.25	0.40
<i>F</i>	0.30	0.60

Nota. Fuente (Arzate, 2004)

La obtención de la velocidad del viento a la altura de la emisión se desarrolló para las estabildades atmosféricas B y C, en ambos casos la constante de “ n ” obedeció a una superficie rural, relacionando de igual forma las variables que interfieren en el procesamiento de datos, adquiridas durante el desarrollo de este proyecto (**Tabla 10**).

Tabla 10 Valores establecidos para el desarrollo de la ecuación de la velocidad del viento a la altura de la emisión, según la estabilidad atmosférica.

Variable	Estabilidad atmosférica	
	B	C
U1 (m/s)	5	4
H1 (m)	14.28	14.28

Variable	Estabilidad atmosférica	
	B	C
H2 (m)	43.48	72.11
n	0.15	0.20

Nota: Elaboración propia.

7.11 Descarga y procesamiento del Modelo Digital de Elevación (DEM)

Ya que el modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos requiere del uso de la calculadora ráster, se descargó un DEM de fácil acceso del satélite Alos Palsar, el cual tiene una resolución de 12.5 metros.

Es importante tener referencia visual de las características seleccionadas del DEM descargado del satélite Alos Palsar (**Figura 14**), ya que puede contar con información como la fecha de captura, la cual, para este proyecto es del 30 de junio de 2010, imagen que cubre toda el área de estudio.

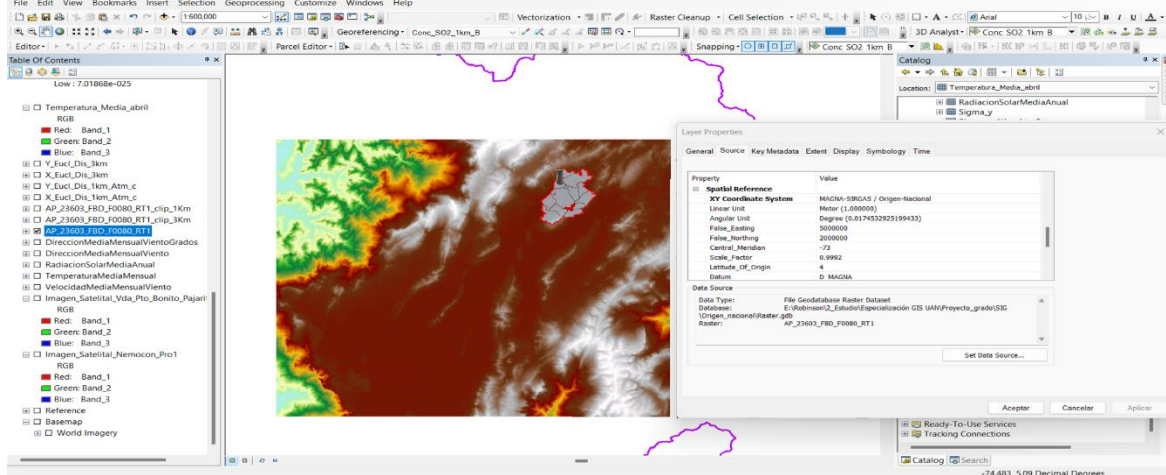
Figura 14 DEM Alos Palsar seleccionado.

The screenshot shows the ASF Data Search Vertex interface. At the top, there are search filters for 'Geográfico' (Geographic) and 'ALOS PALSAR'. The map displays a satellite image of a region with a yellow bounding box. Below the map, there is a list of data files with columns for file ID, date, and download status. The selected file is 'ALPSRP236030080' with a date of '30/06/10, 03:41:26Z'. The detailed view of this file shows metadata such as 'Polarización - HH+HV', 'Ángulo fuera del nadir - 34.3', and 'Rotación de Faraday - 1.863591'. The interface also includes a search bar, navigation controls, and a footer with copyright information.

Nota. Fuente: (NASA, 2022) ajustada por el autor.

Luego de la descarga, se procesó el DEM utilizando en primera instancia una proyección a coordenadas planas origen único nacional establecidas por el IGAC (**Figura 15**), lo cual permite asegurar la calidad de los resultados.

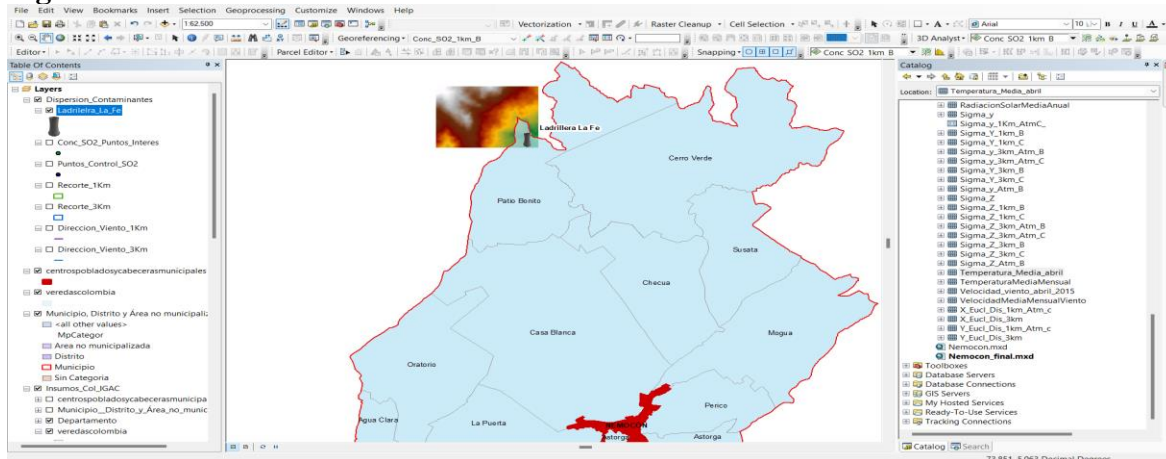
Figura 15 DEM desplegado y proyectado a coordenadas planas origen único en ArcGIS



Nota. Elaboración propia

Ya que no fue requerida la totalidad de la extensión del DEM, se procedió a realizar un corte al mismo en el área de influencia de la chimenea de la ladrillera La Fe (**Figura 16**). Lo anterior en aras de que al correr el modelo de dispersión en el Model Builder, el proceso no tenga mayor dificultad de ejecución.

Figura 16 Recorte del DEM al área de influencia



Nota. Elaboración propia

El recorte del DEM mostrado anteriormente entró como insumo del Model Builder, el cual se presentará más adelante.

7.12 Determinación de la altura de la chimenea al nivel del mar

Esta variable se determinó a partir del DEM mencionado y mostrado en el ítem anterior, utilizando la herramienta de ArcGIS “*Extract Multi Values to Point*”, la cual permitió extraer el valor del píxel correspondiente a la altura en metros sobre el nivel del mar de la chimenea de la ladrillera La Fe, esta variable será conocida más adelante como Z.

7.13 Cálculo de la distancia Euclidiana

El proceso que realiza la herramienta de “*Euclidean Distance*” es definido por la plataforma de ESRI como un algoritmo que funciona de la siguiente forma: “*para cada celda, la dimensión a cada una de las celdas de origen se determina al calcular la hipotenusa con un valor máximo en X y en Y, los cuales representarán los otros dos lados del triángulo. El cálculo determina la verdadera distancia euclidiana, en lugar de la distancia de la celda. Se calcula entonces la longitud cercana a un origen, y si esta es inferior que la longitud máxima especificada, el valor se concede a la ubicación de la celda en el ráster de salida*” (ESRI, 2022)

El cálculo de la distancia Euclidiana se llevó a cabo en dos objetos de interés, el primero de ellos fue el punto que representa la ubicación de la chimenea de la ladrillera La Fe, y el segundo, la línea que simboliza la dirección del viento con una longitud de 1000 metros, con el objetivo de definir la distancia euclidiana en los ejes X y Y, siendo X la

chimenea y Y la dirección del viento. Para que este cálculo no sobrepasara el área de interés, se definió como el Extent del procesamiento, el DEM cortado al área de influencia.

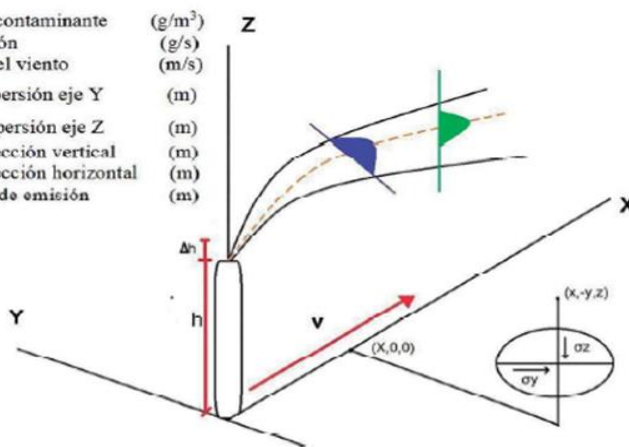
7.14 Modelo de dispersión Gaussiano con ArcGIS

El modelo gaussiano de dispersión se fundamenta en la ecuación presentada en la **Figura 17**, teniendo como objetivo la representación del desplazamiento de la pluma de contaminación acorde a la dirección predominante del viento.

Figura 17 Ecuación del modelo Gaussiano de dispersión de contaminantes

$$C = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \left\{ + e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2} \right\}$$

C - Concentración del contaminante	(g/m ³)
Q - Flujo máscico emisión	(g/s)
U - Velocidad media del viento	(m/s)
σ_y - Coeficiente de dispersión eje Y	(m)
σ_z - Coeficiente de dispersión eje Z	(m)
Z - Distancia en la dirección vertical	(m)
Y - Distancia en la dirección horizontal	(m)
H - Altura de efectiva de emisión	(m)



Nota. Fuente (Molano & Díaz, 2019) ajustada por el autor.

Para resolver la ecuación gaussiana de dispersión de contaminantes, se procedió a dividir la ecuación en 3 partes, con el fin de que al incluir las fórmulas en el Model Builder, el procesamiento se ejecutara sin mayor inconveniente.

Al dividir la ecuación mostrada en la **Figura 17** en tres partes se obtuvo que:

$$A = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \quad B = \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \quad C = \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2}\right)$$

La modelación se realizó con el software ArcGIS, el cual se utilizó con la licencia estudiantil que dispone la Universidad Antonio Nariño.

La estructura de cada uno de los Model Builder (**Anexo 1** y **Anexo 2**) se encuentra distribuida de forma tal que permite la interacción sencilla entre los procesos y variables, en donde en la parte izquierda se encuentran los parámetros constantes de valores enteros y decimales, mientras que en la parte superior se encuentra la información de tipo ráster (DEM cortado y resultados del cálculo de la distancia euclidiana en X y Y).

Los primeros procesos identificados como Ecu_x y Ecu_y correspondieron al desarrollo de la ecuación de los coeficientes de dispersión horizontal y vertical, mientras que los procesos intermedios identificados como Ecu_A, Ecu_B y Ecu_C, corresponden a la división en tres partes de la ecuación de dispersión Gaussiana. El último proceso contiene la suma de las tres ecuaciones (**Anexo 1** y **Anexo 2**).

El resultado de las modelaciones se observa por defecto con un stretch correspondiente a “*Percent clip*” o recorte por porcentaje, el cual eliminando un porcentaje de valores máximos y mínimos (por defecto 0.5%), representa la pluma de contaminación. Para este estudio se estableció un stretch de 2% en valores mínimos y máximos, y se habilitó la opción denominada “*Apply Gamma Stretch*” de un valor de 1.5, generando un mejor realce visual sobre la dispersión del contaminante.

8. Resultados y análisis

Como bien se ha mencionado a lo largo de este documento, además de replicar la dispersión del contaminante con valores extraídos de diversas fuentes consultadas, también se asignaron valores hipotéticos elevados a la estabilidad atmosférica más inestable, con el fin de comparar los resultados de ambas modelaciones.

Las modelaciones planteadas en este proyecto revelaron con una representación gráfica, la forma en que se moviliza el contaminante dióxido de azufre, teniendo en cuenta la dirección del viento predominante para las dos estabilidades atmosféricas del área de interés.

Se pudo establecer que para el área de estudio la velocidad media mensual del viento a 10 metros de altura se encontró en un rango entre 4 y 5 m/s, mientras que la dirección del viento tuvo una inclinación en grados de 155°, este último coincide con lo descrito por Arango & Rodríguez (2017) en donde señalan que el viento sopla desde el Sureste hacia el Noroeste.

Por otro lado, se pudo comprobar que el resultado de la temperatura del área de estudio se encuentra en un rango entre 12 y 16 °C, lo cual concuerda con la apreciación realizada por Arango & Rodríguez (2017), donde describen que: *“la temperatura promedio de la vereda de Patio Bonito del municipio de Nemocón es de 13.9 ° C en promedio”*.

El cálculo de la elevación de la pluma o columna de contaminación (Δh) arrojó como resultado valores según la estabilidad atmosférica (**Tabla 11**), con los que se pudo

establecer una relación, en donde con una estabilidad atmosférica más inestable como lo es la de tipo B, se obtiene un valor menor al que se presentó en condiciones atmosféricas clasificadas en estabilidad C, es decir, que con una estabilidad atmosférica más inestable se obtiene una menor elevación de la pluma de contaminación.

Tabla 11 Elevación de la pluma (Δh) según la estabilidad atmosférica.

Elevación de la pluma	Estabilidad atmosférica	
	B	C
Δh (m)	29.20	57.83

Nota: Elaboración propia.

Así mismo, los resultados obtenidos para la altura efectiva de la emisión (H) (**Tabla 12**), permitieron conservar las características determinadas por las estabilidades atmosféricas relacionadas, como ya se explicó anteriormente. Este resultado se encuentra directamente relacionado con el cálculo de la elevación de la pluma de contaminación, razón por la cual se mantiene el valor más elevado en la estabilidad atmosférica clasificada como ligeramente inestable.

Tabla 12 Resultados de la altura efectiva de la emisión según la estabilidad atmosférica.

Elevación de la pluma	Estabilidad atmosférica	
	B	C
H (m)	43.48	72.11

Nota: Elaboración propia.

Los resultados presentados anteriormente, muestran la altura máxima que alcanza la pluma de contaminación desde la base de la fuente de emisión.

Por otro lado, y a diferencia de la altura efectiva de la emisión, el resultado de la velocidad del viento a la altura de la emisión (U_2) (**Tabla 13**) fue directamente proporcional a la estabilidad atmosférica, donde la clasificación B tuvo un resultado mayor

al que se presenta en condiciones de estabilidad ligeramente inestable de tipo C, lo cual indica que entre más inestable sea la estabilidad atmosférica del área de estudio, la velocidad del viento será mayor.

Tabla 13 Velocidad del viento a la altura de la emisión según la estabilidad atmosférica.

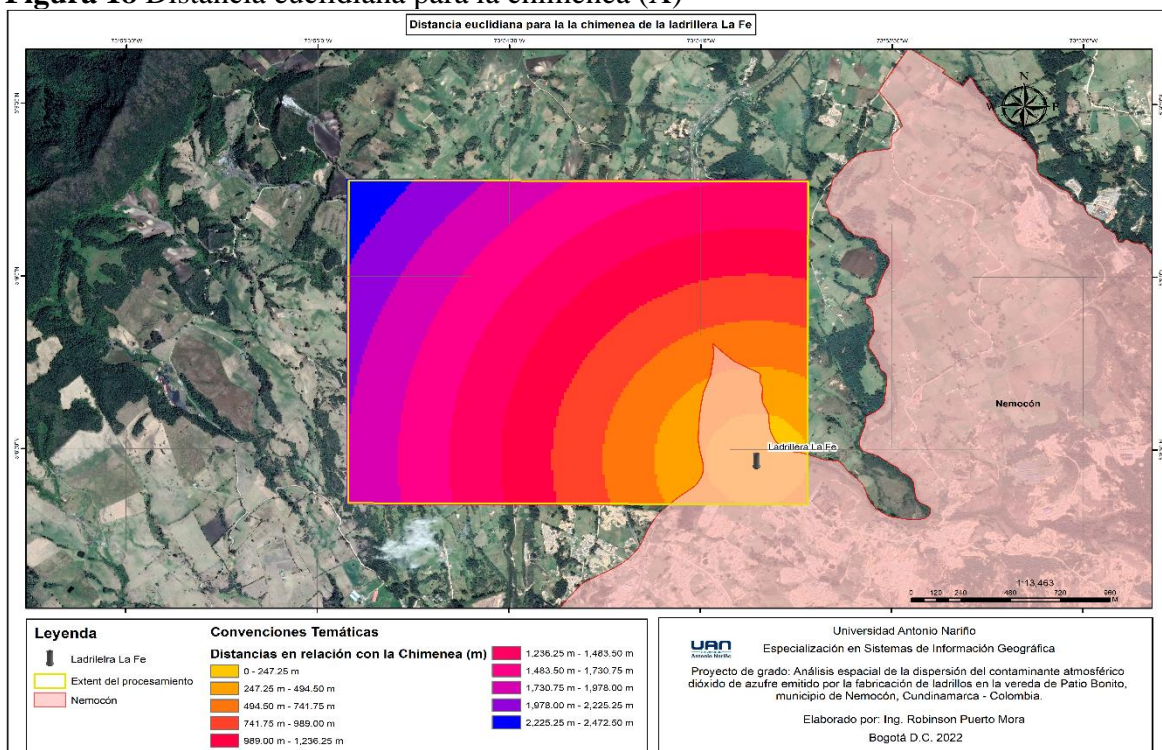
Elevación de la pluma	Estabilidad atmosférica	
	B	C
U2 (m/s)	5.91	5.53

Nota: Elaboración propia.

Con los resultados de la velocidad del viento a la altura de la emisión, se encontró que la concentración de la contaminación de dióxido de azufre es menor en cercanías con la fuente de emisión en la estabilidad atmosférica de tipo B, en comparación con la estabilidad de tipo C, como se mostrará más adelante. Lo anterior es producto de la dilución del contaminante que logra la velocidad del viento al dispersar rápidamente los agentes contaminantes, ya que a mayor velocidad menor será la concentración de estos (Grijalbo, 2016).

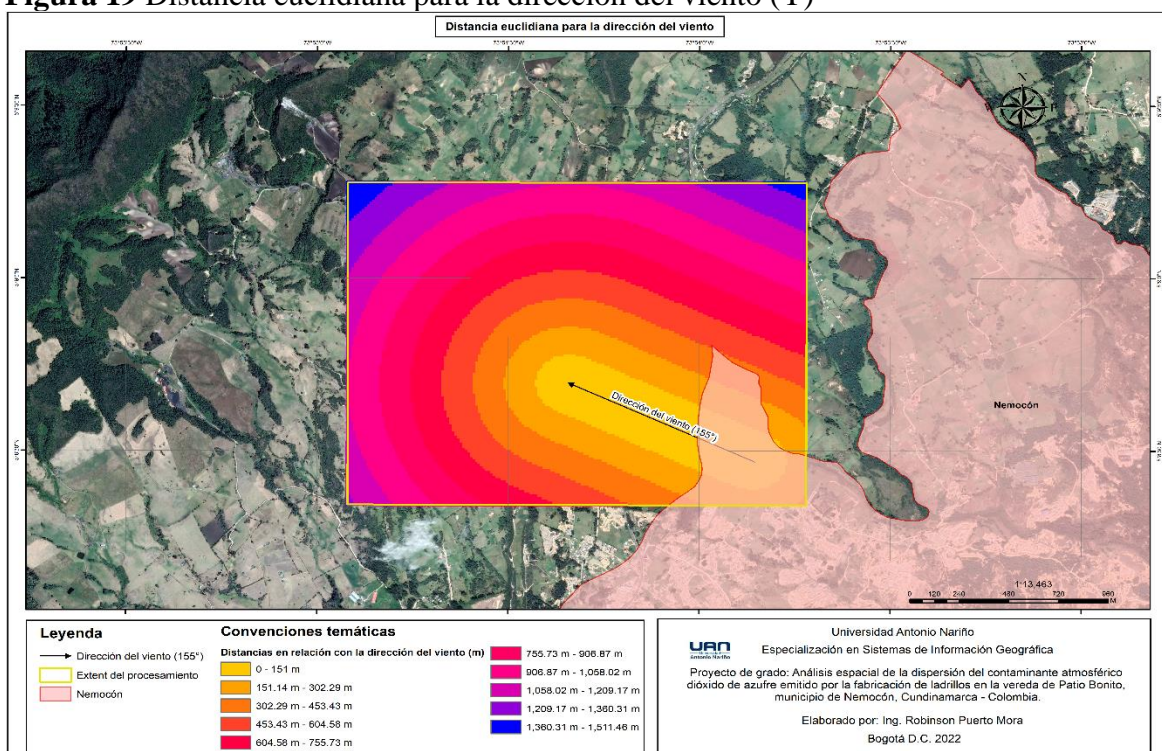
El resultado de la distancia euclidiana para la chimenea (X) generó un área con diferentes categorías asociadas a la proximidad que se tiene con el punto de interés, es decir, la chimenea (**Figura 18**). De igual forma, el resultado de la distancia euclidiana para la línea que representa la dirección del viento (Y), muestra un comportamiento similar, pero con forma oblicua alrededor de ésta (**Figura 19**).

Figura 18 Distancia euclidiana para la chimenea (X)



Nota. Elaboración propia

Figura 19 Distancia euclidiana para la dirección del viento (Y)



Nota. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos a partir del desarrollo metodológico y las diversas ecuaciones realizadas, los cuales son parámetros que finalmente intervienen de forma directa o indirecta en los modelos de dispersión plasmados (**Tabla 14**), se reunieron con el propósito de establecer una relación entre los valores numéricos obtenidos y los resultados visuales logrados a partir de los mismos, los cuales son analizados posteriormente.

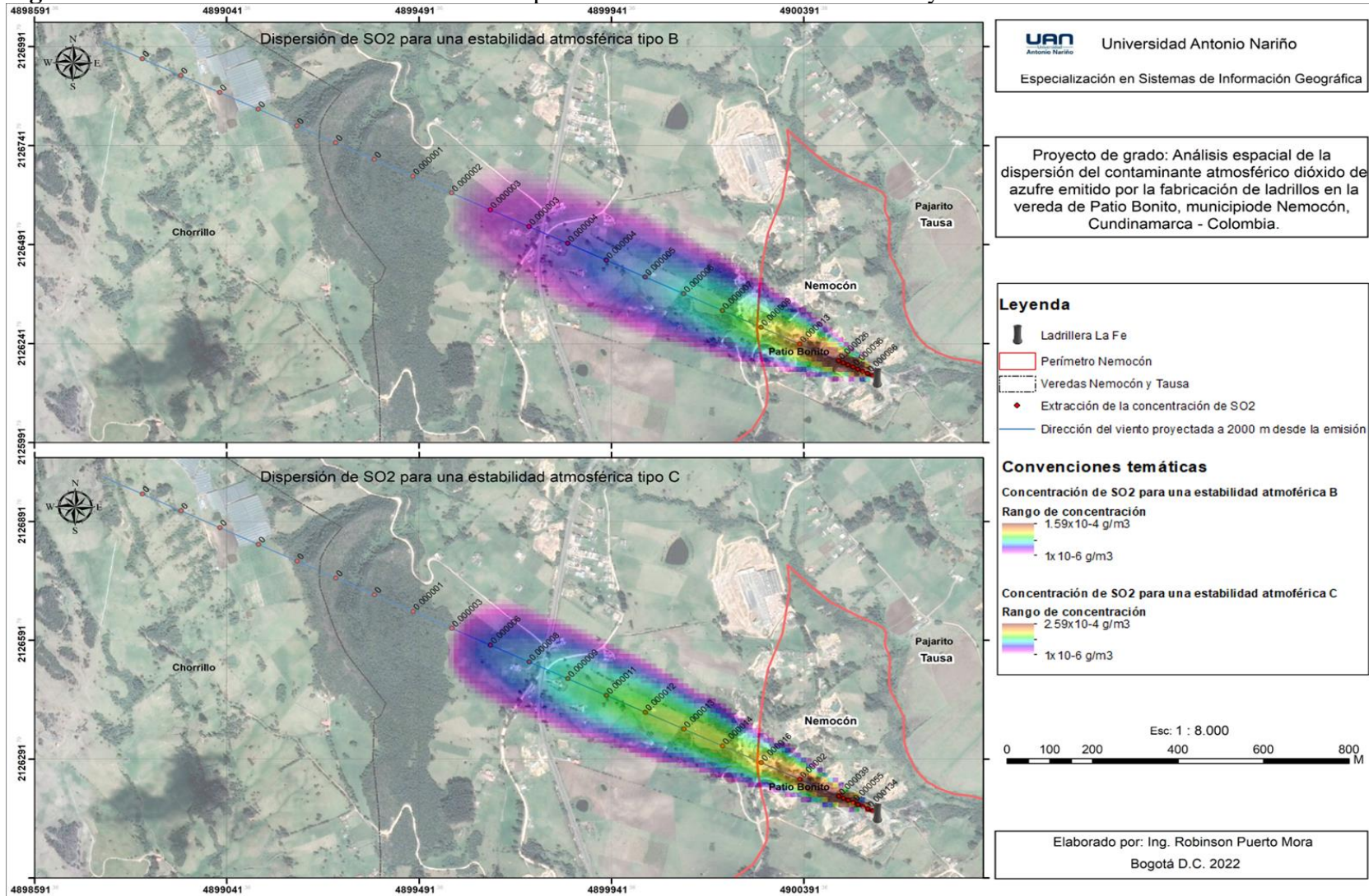
Tabla 14 Resultados obtenidos de los parámetros que intervienen directa o indirectamente en los modelos de dispersión.

Parámetros	Datos utilizados en la estabilidad atmosférica B	Datos utilizados en la estabilidad atmosférica C
Cantidad del contaminante (Q) (g/s)	2.08	1.74
Velocidad del viento de referencia (Uref) (m/s)	5	4
Dirección del viento (grados)	155°	155°
Temperatura ambiente (° K)	289.15	285.15
Presión atmosférica (hPa)	1020	1010
Estabilidad Atmosférica	B	C
Altura de la chimenea (m)	14.28	14.28
Elevación de la pluma contaminante Δh (m)	29.20	57.83
Altura efectiva de la emisión del contaminante (H) (m)	43.48	72.11
Velocidad del viento a la altura de la chimenea (U) (m/s)	5.91	5.53
Eje (Longitud de la dispersión)	1000 metros	1000 metros
Z (altura a la que se encuentra la chimenea) (m)	2779 msnm	2779 msnm

Nota. Fuente: elaboración propia.

Al ejecutar los Model Builder para las estabilidades atmosféricas predominantes del área de estudio (B y C), se obtuvo como resultado un archivo tipo ráster, el cual contiene el comportamiento de la dispersión de la concentración de dióxido de azufre para cada caso en particular (**Figura 20**).

Figura 20 Resultados de la concentración de SO₂ para las estabilidades atmosféricas B y C



Nota. Fuente: elaboración propia.

En términos generales, las características de la emisión como de las condiciones meteorológicas influyeron para que el penacho o columna de humo se moviera a una distancia de 1000 metros aproximadamente, indicando así que la dispersión de la contaminación que parte desde la vereda de Patio Bonito del municipio de Nemocón, se desplace hasta la vereda de Pajarito del municipio de Tausa.

El comportamiento de la dispersión de la contaminación se evaluó en la dirección del viento predominante, para una distancia de 2000 metros, en donde se asignaron un total de 26 puntos, de los cuales, los primeros 8 se encuentran cada 12.5 metros (el primero ubicado a 12.5 metros de la fuente de emisión), lo anterior, teniendo presente que la resolución del DEM fue del mismo valor, distancia a la cual los valores de los píxeles tuvieron concentraciones distintas gracias a la proximidad que se tiene con la fuente de emisión. Por otro lado, los puntos restantes fueron ubicados cada 100 metros, ya que los cambios de la concentración a dicha distancia se hicieron menos constantes. Se debe tener en cuenta que, para los puntos que se encontraron a una distancia de más de 1300 metros de la fuente de emisión, los valores de las concentraciones estuvieron por debajo de 1×10^{-6} g/m^3 por lo cual se excluyeron, ya que se muestran como concentraciones iguales a 0 g/m^3 .

A los puntos descritos anteriormente se les extrajo el valor del píxel asociado a la concentración de dióxido de azufre, con el objetivo de determinar el comportamiento entre la concentración del contaminante y una distancia determinada (**Tabla 15**).

Tabla 15 Concentración de SO_2 Vs distancia

Distancia	Concentración SO_2 estabilidad atmosférica B	Concentración SO_2 estabilidad atmosférica C
m	g/m^3	g/m^3
12.5	0.000159	0.000259
25	0.000086	0.000134

Distancia	Concentración SO ₂ estabilidad atmosférica B	Concentración SO ₂ estabilidad atmosférica C
m	g/m ³	g/m ³
37.5	0.000057	0.000088
50	0.000045	0.000071
62.5	0.000036	0.000055
75	0.000031	0.000048
87.5	0.000031	0.000048
100	0.000026	0.000039
200	0.000013	0.000020
300	0.000009	0.000016
400	0.000007	0.000014
500	0.000006	0.000013
600	0.000005	0.000012
700	0.000004	0.000011
800	0.000004	0.000009
900	0.000003	0.000008
1000	0.000003	0.000006
1100	0.000002	0.000003
1200	0.000001	0.000001
1300	0.0	0.0

Nota: Elaboración propia.

Los resultados extraídos evidencian que la concentración del contaminante es mayor en áreas cercanas a la fuente de emisión, y que por factores meteorológicos, ésta va disminuyendo a medida que se aleja de la misma (**Tabla 15**). Se debe resaltar que en condiciones atmosféricas de tipo C las concentraciones dispersas son casi el doble de las producidas en una estabilidad atmosférica tipo B, teniendo concentraciones similares en ambos tipos de estabildades a los 1200 metros de la fuente de emisión. Dichos resultados presentan similitud con los encontrados en los estudios realizados por Buitrago & Rojas (2017) y el trabajo de grado realizado por Alva (2019), en donde el comportamiento de las concentraciones de un contaminante a una distancia determinada, empezaron a disminuir a medida que se alejan de la fuente de emisión. Aunque los softwares utilizados en los estudios referenciados anteriormente y el presente proyecto fueron diferentes, los

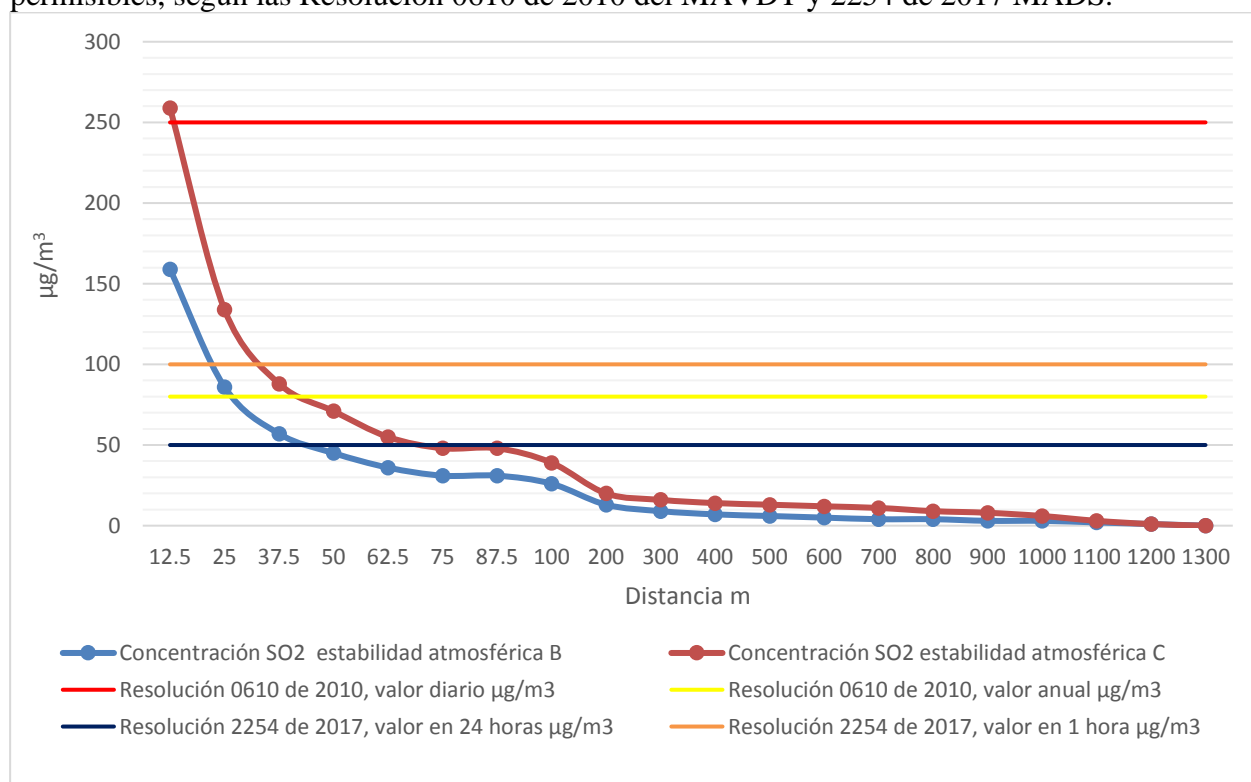
resultados se encuentran relacionados por los comportamientos de concentraciones de los diferentes contaminantes evaluados en ambos trabajos.

Lo anterior indica que para la estabilidad atmosférica de tipo C la concentración máxima tuvo un valor de $2.59 \times 10^{-4} \text{ g/m}^3$, mientras que para la estabilidad atmosférica tipo B fue de $1.59 \times 10^{-4} \text{ g/m}^3$, por lo tanto, y aunque los valores más altos (hipotéticos) se encuentran asociados a la estabilidad atmosférica más inestable (tipo B), la concentración se dispersa con valores más bajos que con parámetros asociados a los valores tomados de los estudios realizados (fuentes consultadas) que finalmente corresponden a la estabilidad atmosférica tipo C. Los valores obtenidos a partir de las modelaciones realizadas para ambas estabilidades atmosféricas demuestran que el horno semicontinuo de la ladrillera La Fe, no es un contribuyente representativo de la contaminación por dióxido de azufre a nivel municipal, lo anterior, teniendo en cuenta que las mediciones diarias para el mes de abril del 2016, registradas por el Subsistema de Información sobre Calidad del Aire (SISARE), reportadas por Arango & Rodríguez (2017) para el parámetro dióxido de azufre, en donde las concentraciones en un periodo de 30 días estuvieron por debajo del límite mínimo de detección del método, correspondiente a $0.02 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ en concentraciones ambientales de la vereda de Patio Bonito.

Lo descrito en el párrafo anterior permitió demostrar que las concentraciones más altas se encuentran dentro del perímetro del municipio de Nemocón, teniendo en cuenta que el límite político administrativo del mismo se encuentra a una distancia de 300 metros en dirección al viento predominante de la fuente de emisión, por lo cual las concentraciones más bajas de dióxido de azufre son dispersas en la vereda Pajarito del municipio de Tausa, esto, para las dos estabilidades atmosféricas de interés.

A manera de referencia, los resultados de las concentraciones de dióxido de azufre para las dos estabilidades atmosféricas fueron comparadas con la normatividad ambiental aplicable (**Figura 21**), como lo es el caso de la Resolución 0610 de 2010 del entonces MAVDT modificada mediante la Resolución 2254 de 2017 del MADS, en donde se establecen los valores máximos permisibles de contaminación de aire. En la primera de ellas se establecen los valores máximos en 24 horas y anual, mientras que en la segunda se sitúan en 1 y 24 horas.

Figura 21 Comparación de las concentraciones dispersas de SO₂ Vs los límites máximos permisibles, según las Resolución 0610 de 2010 del MAVDT y 2254 de 2017 MADS.



Nota. Fuente: elaboración propia.

Ya que los valores comparativos de la norma se encuentran en µg/m³ los resultados de las concentraciones de SO₂ fueron convertidos de g/m³ a la unidad comparativa referente en la norma, con lo cual se pudo establecer que para el caso de la estabilidad

atmosférica más inestable (B), la concentración entre la fuente de emisión y los primeros 12.5 metros en dirección al viento predominante, exceden los valores máximos permisibles establecidos en las resoluciones de referencia, sin embargo, y como ya se describió en párrafos anteriores, la concentración va decreciendo a medida que la columna de humo se aleja de la chimenea de la ladrillera La Fe, encontrándose a los 100 metros por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad ambiental aplicable.

En la dispersión del mismo contaminante con una estabilidad atmosférica ligeramente inestable (C), se mostró que la concentración entre la fuente de emisión y los primeros 12.5 metros en dirección al viento predominante, exceden los valores máximos permisibles, exceptuando el valor máximo determinado para el valor diario de la Resolución 0610 de 2010. Para este caso se observó que a los 50 metros de la fuente de emisión, la concentración de SO_2 se encontró por debajo de los límites establecidos en las resoluciones de referencia.

La modelación aquí realizada se encuentra basada netamente en la distribución Gaussiana, razón por la cual es válido afirmar que los resultados mostrados y analizados en este documento son representativos, tal y como lo demostraron Molano & Díaz (2019) en un banco de pruebas, en el cual se justificó que la dispersión de contaminantes atmosféricos es acorde a la tendencia Gaussiana.

Para este proyecto no es correcta la aplicación de los Índices de Calidad de Aire (ICA), ya que este tipo de índices se realiza sobre un Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA) y no sobre concentraciones ligadas a modelos de concentración de

contaminantes, sin embargo, al ser una medición ambiental, y como ya fue mencionado, esta fuente puntual no es un gran contribuyente de la contaminación por SO₂ en Nemocón.

9. Conclusiones

- La identificación de las variables requeridas para el desarrollo de los modelos de dispersión se logró principalmente con los diferentes repositorios de documentos de trabajos de grado disponibles en internet, en especial el de Arango & Rodríguez (2017), en el cual se encontró gran cantidad de parámetros que permitieron, junto con la información de los atlas climatológicos colombiano publicados por el IDEAM, completar los datos de entrada para la modelación de un escenario aproximado a la realidad, así como la especulación frente a valores hipotéticos que se pueden presentar de forma real en algún momento de la producción de ladrillos de la ladrillera La Fe.
- Se modelaron y espacializaron dos plumas de contaminación de dióxido de azufre teniendo en cuenta las dos estabilidades atmosféricas presentes en el área de estudio (B y C), y los parámetros meteorológicos asociados a cada una de ellas. Para la estabilidad atmosférica de tipo C la concentración máxima tuvo un valor de 2.59×10^{-4} g/m³, mientras que para la estabilidad atmosférica tipo B fue de 1.59×10^{-4} g/m³, lo cual indica que, aunque los valores más altos (hipotéticos) se encuentran asociados a la estabilidad atmosférica más inestable (tipo B), la concentración se dispersa con valores más bajos que con parámetros asociados a los valores tomados de los estudios realizados (fuentes consultadas) que finalmente corresponden a la estabilidad atmosférica tipo C.
- La distribución espacial de dióxido de azufre, que no resulta ser más que la representación gráfica de la movilización del contaminante de interés causada por las características de la emisión y las condiciones meteorológicas, influyeron para que el

penacho o columna de humo se movilizara hasta una distancia de 1000 metros aproximadamente, indicando así que la dispersión de la contaminación que parte desde la vereda de Patio Bonito del municipio de Nemocón, se desplace hasta la vereda de Pajarito del municipio de Tausa. Lo anterior, permitió evidenciar que las concentraciones más altas se encuentran dentro del perímetro del municipio de Nemocón, teniendo en cuenta que el límite político administrativo del mismo se encuentra a una distancia de 300 metros en dirección al viento predominante de la fuente de emisión, por lo cual las concentraciones más bajas de dióxido de azufre son dispersas en la vereda de Pajarito, esto, para las dos estabildades atmosféricas de interés.

10. Recomendaciones

- Realizar la modelación de los parámetros establecidos en este documento en softwares especializados en la simulación de dispersión de contaminantes atmosféricos como lo son por ejemplo AERDMOD y SCREEN3 con el objetivo de comparar los modelos aquí elaborados y los desarrollados en softwares especializados.

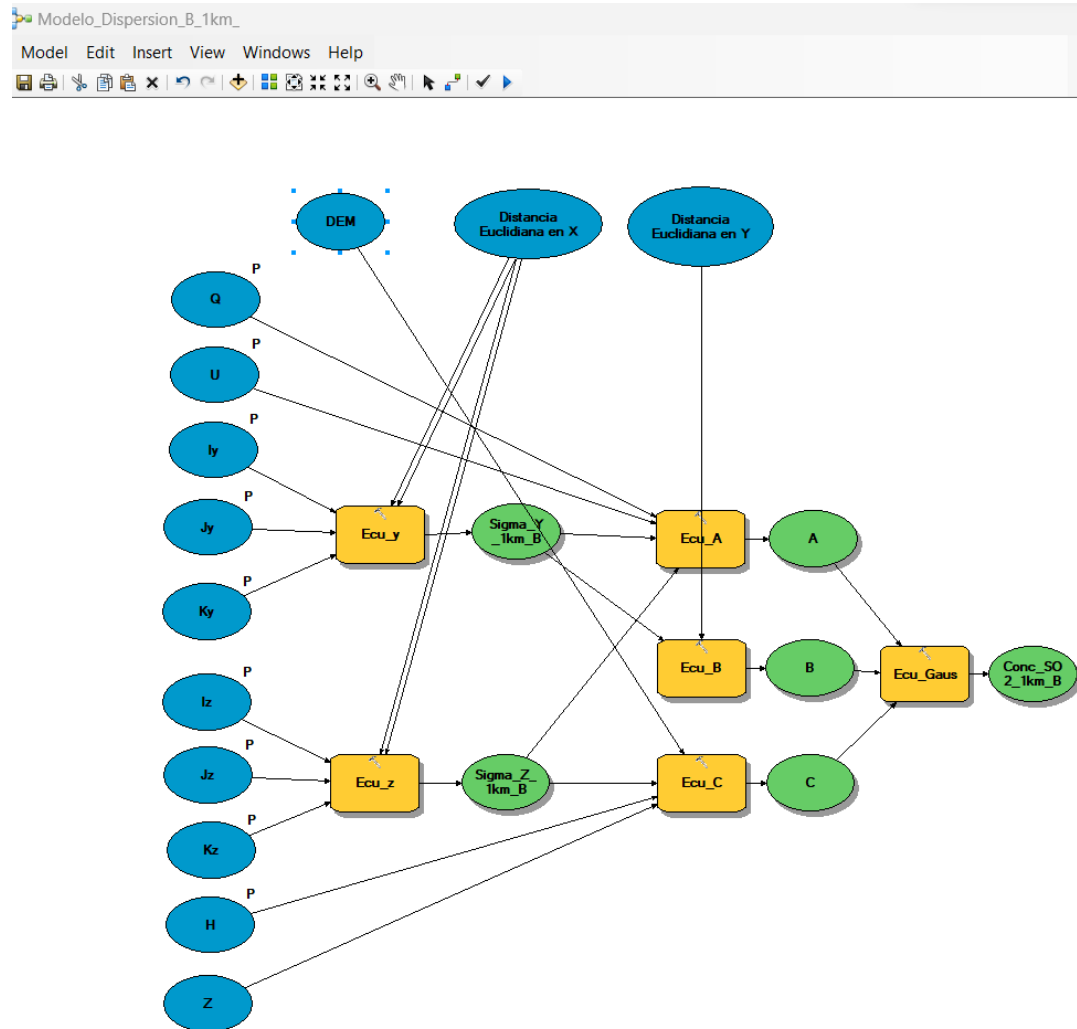
11. Referencias Bibliográficas

- Alcaldía de Nemocón - Cundinamarca. (21 de 03 de 2022). *Sitio oficial de Nemocón en cundinamarca, Colombia*. Obtenido de https://archive.ph/20150520070845/http://www.nemocon-cundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml
- Alcaldía municipal de Nemocón. (5 de 2020). *Plan de desarrollo municipal 2020 - 2023*. Obtenido de http://sabanacentrocomovamos.org/home/wp-content/uploads/2020/05/19052_plan-de-desarrollo-nemocon-20202023_Nemoc%C3%B3n.pdf
- Alva, D. A. (2019). *Concentración de material particulado, monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en la planta de producción de óxido de calcio Puylucana, Cajamarca*. Obtenido de <https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/UNC/3523/CONCENTRACION%20DE%20MATERIAL%20PARTICULADO%20MONOXIDO%20DE%20CARBONO%20DIOXIDO%20DE%20AZUFRE%20Y%20DIOXIDO%20DE%20NITROGENO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Arango, Á. P., & Rodríguez, H. G. (2017). *Análisis de las emisiones de contaminantes asociados a la fabricación de ladrillos y propuesta de reconversión tecnológica Nemocón - Colombia*. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/6716/ArangoOrdoñez%20IngelaPatricia2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Arzate, C. I. (31 de Enero de 2004). *Realización de software educativo para simular la dispersión de contaminantes atmosféricos*. Obtenido de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/arzate_e_ci/
- Buitrago, D. C., & Rojas, D. C. (7 de 07 de 2017). *Estimación de factores de emisión de una ladrillera en la localidad de Ciudad Bolívar en Bogotá D.C*. Obtenido de https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1475&context=ing_ambiental_sanitaria
- ESRI. (15 de 03 de 2022). *Comprender el análisis de distancia euclidiana*. Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-euclidean-distance-analysis.htm#GUID-6CC4991E-74A0-4612-B649-4961D5DFA6E3>
- Google Imágenes. (16 de 03 de 2022). *Horno semicontinuo tipo cedan*. Obtenido de https://documen.site/download/horno-cedan-semi-continuo_pdf

- Grijalbo, L. (2016). Elaboración de inventarios de focos contaminantes. UF1941. En L. Grijalbo, *Elaboración de inventarios de focos contaminantes. UF1941* (págs. 66-67). España: Tutor Formación.
- IDEAM. (2015). *Introducción al atlas interactivo*. Obtenido de Atlas IDEAM: <http://atlas.ideam.gov.co/presentacion/>
- IDEAM. (04 de 04 de 2022). *Generalidades de la lluvia ácida*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/generalidades-de-la-lluvia-acida>
- Manahan, S. (2006). *Introducción a la química ambiental*. México: Reverté ediciones.
- Marín, M., & Otalvora, A. M. (2020). *Implementación de un modelo de análisis de dispersión atmosférica de material particulado (PM10) a través de la herramienta AERMOD VIEW en el municipio de Yumbo (Valle del Cauca)*. Obtenido de <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/31701/mmarinocaamotalvoram.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Matias, M. E. (2021). *Modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos influenciado por la actividad minera a través del software de AERMOD en el distrito de Tinyahuarco*. Obtenido de <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2145>
- Molano, L. G., & Díaz, C. J. (2019). Análisis y verificación del modelo gaussiano de dispersión: métodos teóricos y experimentales. *Revista De Investigación*, 31-43. Obtenido de Revista De Investigación.
- NASA. (15 de 03 de 2022). *Datos de la tierra* . Obtenido de ASF Data Search Vertex: [https://search.asf.alaska.edu/#/?dataset=ALOS&productTypes=RTC_HI_RES&beamModes=FBD&start=2009-10-14T05:00:00Z&end=2010-10-15T04:59:59Z&resultsLoaded=true&granule=ALPSRP236030080-RTC_HI_RES&zoom=10.869¢er=-73.845,4.872&polygon=POLYGON\(\(-73.9409%205.15](https://search.asf.alaska.edu/#/?dataset=ALOS&productTypes=RTC_HI_RES&beamModes=FBD&start=2009-10-14T05:00:00Z&end=2010-10-15T04:59:59Z&resultsLoaded=true&granule=ALPSRP236030080-RTC_HI_RES&zoom=10.869¢er=-73.845,4.872&polygon=POLYGON((-73.9409%205.15)
- Vidal-Daza, O. A., & Pérez, A. P.-V. (2018). Estimación de la Dispersión de Contaminantes Atmosféricos Emitidos por una Industria Papelera Mediante el Modelo AERMOD. *Ingeniería, vol. 23.*, 31-47.
- Wark, K., & Warner, C. F. (2002). Contaminación del aire origen y control. México: Limusina-Noriega.
- Windy. (15 de 03 de 2022). *Windy: Wind map & weather forecast*. Obtenido de <https://www.windy.com/5.066/-73.877/meteogram?5.012,-73.877,12,m:dNBad51>

12. Anexos

Anexo 1 Model Builder utilizado en la estabilidad atmosférica tipo B



Anexo 2 Model Builder utilizado en la estabilidad atmosférica tipo C

