

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL
CUSCO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“EVALUACIÓN DE LA EMISIÓN Y LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES
ATMOSFÉRICOS PARA UNA FUENTE LINEAL EN LA CIUDAD DEL
CUSCO – 2021”**

FPLUKER ANDY DELGADO GUIZADO

Bachiller en Ingeniería Química

Ing. WHASINGTON JULIO LECHUGA CANAL

Asesor

Tesis para optar al Título Profesional de:
Ingeniero Químico

**CUSCO-PERÚ
2022**

DEDICATORIA

*“A Dios, a mi esposa, familia
y amigos”*

AGRADECIMIENTO

A **Dios**, por guiar mis pasos, a **mi esposa** por su apoyo incondicional quien es mi motivación diaria, a **mi familia** por sus consejos, apoyo y persistencia.

A mi **asesor Ing. Julio Lechuga Canal** quien con sus consejos contribuyeron enormemente mi formación y supo orientarme y perfilar este documento.

Al **Ing. Gonzalo Rosado**, por su tiempo y conocimientos impartidos.

A las personas que depositaron su apoyo para la realización del presente trabajo.

PRESENTACIÓN

Sra. Decana y Docentes de la facultad de Ingeniería de Procesos de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

De conformidad con las disposiciones del reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería de Procesos vigente hasta la fecha, presento a vuestra consideración la tesis titulada “EVALUACIÓN DE LA EMISIÓN Y LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS PARA UNA FUENTE LINEAL EN LA CIUDAD DEL CUSCO – 2021” para optar al título profesional de Ingeniero Químico.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	2
1. PLANTEAMIENTO TEÓRICO.....	2
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2.1 PROBLEMA GENERAL.....	3
1.2.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS:	3
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	3
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	4
CAPÍTULO II.....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 ANTECEDENTES	5
BASES TEÓRICAS	6
2.2 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.....	6
2.3 FUENTES DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL	7
2.3.1 FUENTES MÓVILES.....	7
2.4 EMISIONES VEHICULARES	8

2.4.1 EMISIONES POR TUBO DE ESCAPE EN CALIENTE	8
2.4.2 EMISIONES POR DESGASTE DE NEUMÁTICOS Y FRENOS.....	9
2.4.3 RESUSPENSIÓN DE POLVO	9
2.5 FACTORES DE EMISIÓN VEHICULAR.....	10
2.6 CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS	13
2.7 MATERIAL PARTICULADO-PM10 Y PM2.5	14
2.8 DISPERSIÓN	18
2.8.1 MODELOS DE CAJA SIMPLE	19
2.8.2 MODELOS GAUSSIANOS	20
2.8.3 MODELOS CFD	21
2.8.4 MODELOS LAGRANGIANOS	22
2.8.5 MODELOS EULERIANOS.....	23
2.8.6 MODELOS TIPO PUFF	25
2.8.7 RECOMENDACIONES PARA LA APLICACIÓN DE MODELOS DE DISPERSIÓN:.....	25
2.9 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.....	30
2.9.1 ESTRUCTURA VERTICAL DE LA ATMÓSFERA	30
2.9.2 VIENTO	32
2.9.3 TOPOGRAFÍA.....	33
CAPÍTULO III.....	34
3. MATERIALES Y METODOLOGÍA	34

3.1	MATERIALES.....	34
3.1.1	EQUIPOS.....	34
3.1.2	SOFTWARE.....	34
3.1.3	BASE DE DATOS.....	34
3.2	METODOLOGÍA.....	34
3.2.1	INVENTARIO VIAL.....	36
3.2.2	FLUJO VEHICULAR POR CATEGORÍA.....	37
3.2.3	CÁLCULO DE LA VELOCIDAD.....	38
3.2.4	DETERMINACION DE EMISIÓN VEHICULAR.....	38
3.2.4	FACTORES DE EMISIÓN VEHICULAR.....	40
3.2.5	DOMINIO DEL MODELADO.....	41
3.2.6	PROCESAMIENTO DE DATOS METEOROLÓGICOS.....	42
3.2.7	MODELIZACIÓN CON AERMOD VIEW.....	42
	CAPÍTULO IV.....	44
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
4.1	FLUJO VEHICULAR.....	44
4.2	EMISIÓN VEHICULAR PM10 Y PM2.5.....	46
4.3	PROCESAMIENTO DE DATOS METEOROLÓGICOS.....	59
4.4	DISPERSIÓN DE PM10 TOTAL.....	61
4.4.1	DISPERSIÓN DE PM10 POR TUBO DE ESCAPE.....	65
4.4.2	DISPERSIÓN DE PM10 POR DESGASTE.....	67
4.4.3	DISPERSIÓN DE PM10 POR RESUSPENSIÓN DE POLVO.....	69

4.5	DISPERSIÓN DE PM2.5 TOTAL.....	71
4.5.1	DISPERSIÓN DE PM2.5 POR TUBO DE ESCAPE.....	73
4.5.2	DISPERSIÓN DE PM2.5 POR RESUSPENSIÓN DE POLVO	75
4.6	DISPERSIÓN DE PM10 Y PM2.5 EN DÍAS TÍPICOS Y ATÍPICOS.....	77
4.7	ESCENARIOS DE DISPERSIÓN DE PM10 Y PM2.5	77
4.7.1	DISPERSIÓN DE PM10 Y PM2.5 SIN PARTICIPACIÓN DE VEHÍCULOS PARTICULARES, TAXI – TAXI COLECTIVO.....	77
4.7.2	DISPERSIÓN DE PM10 Y PM2.5 CON AUSENCIA DEL TRANSPORTE PÚBLICO URBANO.....	78
	CAPÍTULO V.....	79
5.	CONCLUSIÓN	79
	CAPÍTULO VI	81
6.	RECOMENDACIONES	81
	ANEXOS	81
	REFERENCIAS	89

ANEXO

Anexo 1:	Dispersion de PM10 y PM2.5 Horaria (1h) y Diaria (24h) para Días Lunes – jueves a través de la Av. La Cultura – Cusco.....	82
Anexo 2:	Dispersion de PM10 y PM2.5 5 Horaria (1h) y Diaria (24h) para viernes a través de la Av. La Cultura – Cusco.....	83
Anexo 3:	Dispersion de PM10 y PM2.5 5 Horaria (1h) y Diaria (24h) para sábado a través de la Av. La Cultura – Cusco.....	84

Anexo 4: Dispersión de PM10 y PM2.5 Horaria (1h) y Diaria (24h) para Domingo a través de la Av. La Cultura – Cusco.....	85
Anexo 5: Dispersión PM10 y PM2.5 Total Horaria (1h) y Diario (24h), Sin participación de vehículos Particulares, Taxi – Taxi Colectivo a través de la Av. la Cultura – Cusco	86
Anexo 6: Dispersión PM10 y PM2.5 Total Horario (1h) y Diario (24h), Sin participación de vehículos de Transporte Público Urbano a través de la Av. la Cultura – Cusco	87
Anexo 7: Frecuencia, Velocidad y Dirección del Viento, monitoreado por el Aeropuerto Juan Velasco Astete.....	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Factores de Emisión Vehicular por Categoría para PM10	11
Tabla 2 Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire (MINAN,2017).....	13
Tabla 3 Comparación entre Partículas Finas y Gruesas	16
Tabla 4 Enfoques Recomendados para Diferentes Escalas y Aplicaciones del Modelado de Dispersión Atmosférica	26
Tabla 5 Lista de Características, Formulaciones y Procesos Típicos del Modelado, para las Diversas Escalas y Contaminantes Necesarios para la Evaluación de la Calidad del Aire	27
Tabla 6 Clases de Estabilidad Atmosférica (Turner, 1970).....	32
Tabla 7 Valores Típicos de la Longitud de Rugosidad Superficial	33
Tabla 8 Lista de Categorías Vehicular.....	38
Tabla 9 Factores de Emisión Vehicular por Descarga	39
Tabla 10 Valores de la Constante k (g/VKT)	39
Tabla 11 Contenido de Material en Suspensión	40
Tabla 12 Peso Vehicular.....	40

Tabla 13 Características del Área de Modelado	41
Tabla 14 Flujo Vehicular Horario Circulante por la Av. La Cultura – Cusco, dentro de las variaciones de una semana normal.....	44
Tabla 15 Velocidad Vehicular Promedio	46
Tabla 16	48
Tabla 17 Emisión vehicular PM10 Correspondiente al día Viernes designado como día Atípico	49
Tabla 18	50
Tabla 19 Emisión vehicular PM10 Correspondiente al día Domingo designado como día Atípico	51
Tabla 20 Emisión Vehicular Promedio – Horario de PM10 Total dentro de una semana Normal.....	52
Tabla 21 Emisión vehicular horario de PM2.5 correspondiente a los días Lunes a Jueves Considerados días Típicos	55
Tabla 22 Emisión vehicular PM2.5 Total Correspondiente al día Viernes designado como día Atípico	56
Tabla 23 Emisión vehicular PM2.5 Total Correspondiente al día Sábado designado como día Atípico	56
Tabla 24 Emisión vehicular PM2.5 Total Correspondiente al día Domingo designado como día Atípico	57
Tabla 25 Emisión Vehicular Promedio – Horario de PM2.5 Total dentro de una semana Normal.....	57
Tabla 26 Primeros 3 Valores Altos de PM10 para un Periodo de 1 hora y 24 horas, Evaluado para la Emisión Total Vehicular.....	63

Tabla 27 Primeros 3 Valores Altos de PM10 para un Periodo de 1 hora y 24 horas, Evaluado para Emisión por Tubo de Escape	65
Tabla 28 Primeros 3 Valores Altos de PM10 para un Periodo de 1 hora y 24 horas, Evaluado para Emisión por Desgaste	67
Tabla 29 Primeros 3 Valores Altos de PM10 para un Periodo de 1 hora y 24 horas, Evaluado para la Resuspensión de Polvo	69
Tabla 30 Primeros 3 Valores Altos de PM2.5 para un Periodo de 1 hora y 24 horas, Evaluado para la Emisión Total Vehicular.....	71
Tabla 31 Primeros 3 Valores Altos de PM2.5 para un Periodo de 1 hora y 24 horas, Evaluado para la Emisión por Tubo de Escape	73
Tabla 32 Primeros 3 Valores Altos de PM2.5 para un Periodo de 1 hora y 24 horas, Evaluado para la Resuspensión de Polvo.	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Representación de modelo de caja	19
Figura 2 Extensión instantánea de una pluma en diferentes momentos	20
Figura 3 Pluma Gaussiana.....	21
Figura 4 Pluma de una descarga sección de una fuente y sección transversal de la pluma	22
Figura 5 Propagación regional típica de una fuente puntual instantánea	23
Figura 6 División de la atmósfera en cuadrículas.	24
Figura 7 Modelo de cuadrícula en la atmósfera	24
Figura 8 Representación Esquemática de una Pluma Gaussiana y un Modelo Puff.....	25
Figura 9 Relación de la estabilidad atmosférica con el gradiente de temperatura y evolución de los penachos	31

Figura 10 Variación del viento con la altura por diferentes superficies.....	33
Figura 11 Metodología para el Cálculo de Emisiones Vehiculares y Dispersión de Contaminantes Atmosféricos	35
Figura 12 Longitud de la Vía Av. La Cultura – Cusco	36
Figura 13 Filmaciones del Flujo Vehicular	37
Figura 14 Dominio de la modelización espacial Fuente: Google Earth.....	41
Figura 15 Diagrama de Entradas y Salidas para Aermod View	43
Figura 16 Porcentaje de vehículos circulantes	45
Figura 17 Emisión Promedio por categoría vehicular de PM10 en una Resolución Temporal Horario correspondientes a los días Típicos y Atípicos.....	54
Figura 18 Porcentaje de Emisión PM10 por Categoría Vehicular	54
Figura 19 Emisión Vehicular de PM2.5 Promedio – Horario perteneciente a las diferentes categorías vehiculares	58
Figura 20 Porcentaje de Emisión de PM2.5 Promedio – Horario por Categoría Vehicular	59
Figura 21 Datos Procesados en Formato SAMSON, entrada para AERMOD	60
Figura 22 Parámetros Superficiales en formato SFC.	61
Figura 23 Parámetros de perfil en formato PFL	61
Figura 24 Dispersión de PM10 Total (1h) de la Av. La Cultura-Cusco	64
Figura 25 Dispersión de PM10 Total (24h) de la Av. La Cultura-Cusco	64
Figura 26 Dispersión de PM10 (1 h) de la Av. La Cultura-Cusco, emitido por tubo de escape vehicular.....	66
Figura 27 Dispersión de PM10 (24h) de la Av. La Cultura-Cusco, emitido por tubo de escape vehicular.....	66

Figura 28 Dispersión de PM10 (1h) de la Av. La Cultura-Cusco, Emitido por el Desgaste (Neumáticos y Frenos)	68
Figura 29 Dispersión de PM10 (24h) de la Av. La Cultura-Cusco, Emitido por el Desgaste (Neumáticos y Frenos)	68
Figura 30 Dispersión de PM10 (1h) de la Av. La Cultura-Cusco, por Resuspensión de Polvos	70
Figura 31 Dispersión de PM10 (24h) de la Av. La Cultura-Cusco, por Resuspensión de Polvos	70
Figura 32 Dispersión de PM2.5 Total (1h) de la Av. La Cultura-Cusco	72
Figura 33 Dispersión de PM2.5 Total (24h) de la Av. La Cultura-Cusco	72
Figura 34 Dispersión de PM2.5 (1h) de la Av. La Cultura Cusco, Emitido por Tubo de Escape Vehicular	74
Figura 35 Dispersión de PM2.5 (24h) de la Av. La Cultura Cusco, Emitido por Tubo de Escape Vehicular	74
Figura 36 Dispersión de PM2.5 (1h) de la Av. La Cultura Cusco, por Resuspensión de Polvo.....	76
Figura 37 Dispersión de PM2.5 (24h) de la Av. La Cultura Cusco, por Resuspensión de Polvo.....	76

RESUMEN

La presente investigación está orientado a evaluar la emisión y la dispersión de contaminantes atmosféricos para una fuente lineal en la ciudad de Cusco – 2021, siendo la fuente de emisión lineal, generados por la circulación vehicular en la Av. la Cultura considerando variaciones que se experimentan dentro de una semana normal cuyo flujo vehicular fue de 10834 vehículos por hora en una semana, así mismo basados en la Guía metodológica de estimaciones de emisiones vehiculares de la Comisión Nacional del Medio Ambiente y guía de emisiones vehiculares europea EMEP/CORINAIR – 2007, así como la utilización de la guía para la estimación de emisiones de PM2.5 INE-SEMART – 2011 se estimó una emisión de 1023.32 g/h y 735 g/h para PM10 y PM2.5 respectivamente , por último se empleó el sistema de modelado Aermod View utilizando data meteorológica, topográfica y fuente, cuyos resultados mostraron valores máximos para PM10 con concentraciones de 79.39 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ y 6.51 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ para el periodo de 1 hora y 24 horas respectivamente, por otra parte, se alcanzaron concentraciones máximas de 57.04 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ y 4.67 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ respecto a PM2.5, para 1 hora y 24 horas respectivamente, cuyos resultados no excedieron los estándares de Calidad Ambiental establecido por D.S. 003-2017-MINAM.

Palabras claves: Contaminantes Atmosféricos, Emisión Vehicular, Meteorología, Modelización, Dispersión.

ABSTRACT

The present research is oriented at evaluating the emission and dispersion of atmospheric pollutants for a linear source in the city of Cusco being the source of linear emission generated by vehicular circulation on Av. La Cultura considering the variations that are experienced within a normal week whose vehicular flow was 10834 vehicles per hour in a week, in addition based on in the methodological guide of vehicular emissions of the National Environmental Commission and European vehicle emissions guide EMEP/CORINAIR – 2007, as well as the use of the guide for the estimation of PM_{2.5} emissions INE-SEMART – 2011 an emission of 1023..32 g/h and 735 g/h was estimated for PM₁₀ and PM_{2.5} respectively , finally the Aermod View modeling system was used using meteorological, topographic and source data, whose results showed maximum values for PM₁₀ with concentrations of 79.39 µg/cm³ and 6.51 µg/cm³ for the period of 1 hour and 24 hours respectively, on the other hand, maximum concentrations of 57.04 µg/cm³ and 4.67 µg/cm³ were reached with respect to PM_{2.5}, for 1 hour and 24 hours respectively, whose results did not exceed the Environmental Quality Standards established by DS 003-2017-MINAM.

Keywords: Atmospheric Pollutants, Vehicle Emissions, Meteorology, Modeling, Dispersion.

INTRODUCCIÓN

Actualmente la contaminación ambiental es un problema que tiene una gran importancia en el ámbito local, nacional e internacional. La exposición a un aire contaminado en concentraciones suficientemente elevadas puede generar y agravar diferentes enfermedades respiratorias, cardiovasculares e incluso provocar la muerte afectando directamente la salud y el bienestar público.

La principal fuente de contaminación ambiental en las zonas urbanas es el transporte vehicular el cual está asociado directamente al PBI, inversión en la infraestructura vial, la demanda para movilizarse, así como la poca capacidad fiscalizadora y control vehicular. El sistema de gestión ambiental peruana ha implementado instrumentos ambientales para el control de la calidad del aire convirtiéndose la clave de un desarrollo sostenible urbano.

Los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos permiten estimar la concentración de los contaminantes y a la vez predecir la dirección en la cual se dispersan en los receptores, es así que el presente estudio busca evaluar la dispersión de contaminantes ambientales generados por el tránsito vehicular a través de la Av. la Cultura – Cusco y con ello ser instrumentos en la toma de decisiones futuras.

Para el desarrollo del estudio se efectuó el uso de factores de emisión vehicular utilizando la guía metodología para la estimación de emisiones atmosféricas vehiculares propuestas por la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA,2009), complementándose con la guía metodológica europea EMEP/CORINAIR (2007) y guía para la estimación de emisiones de PM2.5 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Instituto Nacional de Ecología de México – 2011 (NE-SEMARNAT) a partir del conteo vehicular circulante. Así mismo se recopiló información meteorológica y topográfica.

Los datos obtenidos fueron utilizados por el software Aermid View, el cual evalúa la dispersión espacial de los contaminantes atmosféricos PM10 y PM2.5 obteniendo niveles de concentración más altos evaluados para 1 hora y 24 horas los cuales fueron sectorizados por zonas de contaminación mediante isolíneas.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO TEÓRICO

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La contaminación del aire es uno de los principales problemas para la salud, a nivel mundial se estiman 7 millones de defunciones cada año por la exposición al aire contaminado y cerca de 4.2 millones atribuidas a la contaminación atmosférica (OMS,2018), siendo el material particulado el más relevante. En el caso de Perú las muertes atribuibles a causa de la contaminación atmosférica son de 14 por 100000 habitantes (OMS,2016). Según el reporte mundial de la calidad del aire 2018 para PM 2.5 Perú encabezó la lista como el país con mayor contaminación de América latina y el continente (IQAir, 2018).

El 2005 el consejo nacional del ambiente (CONAM), realizó plan “A limpiar el Aire” en la cuenca atmosférica de la ciudad del Cusco, evaluando la calidad del aire de los años 2000-2004 dando como resultado el 84.65% (151553.2 ton/año) de las emisiones generadas pertenecientes al material particulado PM10 el cual estaba vinculado al transporte vehicular y en particular al polvo del tráfico vehicular, manipulación de arcilla en la fabricación de tejas y ladrillos, así mismo de acuerdo al informe nacional de calidad del aire del 2013-2014 en el Perú de las 31 zonas de atención prioritaria, la ciudad del Cusco se ubicó en la segunda ciudad con la mayor concentración promedio diario con respecto al PM10 y en primer lugar excediendo el estándar de calidad del aire (ECA) respecto al PM2.5.

Los diferentes órganos del estado como DIGESA e investigaciones relacionados al material particulado han desarrollado las evaluaciones de manera puntual (estaciones de monitoreo), es decir los resultados obtenidos de la calidad del aire no son valores representativos que indican el nivel de contaminación ambiental y el nivel de afectación a la salud por parte de las fuentes lineales y puntuales. Una de las fuentes de contaminación ambiental principal es la Av. la Cultura – Cusco (fuente lineal) el cual está rodeado de centros educativos, hospitales, centros comerciales, etc., los cuales están siendo afectados de manera directa por la contaminación vehicular circulante, sin embargo para evaluar la calidad del aire y luego inferir el nivel de afectación a la salud es necesario la utilización de los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos, herramienta de calidad ambiental el cual es parte del Sistema de Gestión Ambiental que permitirá identificar la magnitud de la

contaminación de manera más precisa a la realidad local permitiendo crear un desarrollo sostenible de crecimiento urbano y generando condiciones de prevención a la salud.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 PROBLEMA GENERAL

- ¿Cuál es la dispersión de contaminantes atmosféricos de la fuente lineal la Av. la Cultura – Cusco?

1.2.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS:

- ¿Cuál es el flujo vehicular circulante de la fuente lineal la Av. La Cultura – Cusco?
- ¿Cuál es la emisión vehicular circulante de la fuente lineal la Av. La Cultura – Cusco?
- ¿Cuál es la dispersión de contaminantes atmosféricos PM10 y PM2.5 de la fuente lineal la Av. la Cultura – Cusco?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la dispersión de contaminantes atmosféricos de la fuente lineal la Av. La Cultura – Cusco.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Determinar el flujo vehicular circulante por la fuente lineal la Av. La Cultura – Cusco.
- Determinar la emisión vehicular circulante por la fuente lineal la Av. La Cultura – Cusco.
- Evaluar la dispersión de contaminantes atmosféricos PM10 y PM2.5 utilizando el software Aermol View de la fuente lineal la Av. La Cultura – Cusco.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Ambiental. - Actualmente la contaminación ambiental por PM10 Y PM2.5 desencadena una serie de desequilibrios ambientales desde el clima hasta la inhibición del crecimiento de las plantas, la aplicación de un modelo de dispersión como instrumento de gestión ambiental permite conocer de manera más precisa los campos de dispersión de los contaminantes, siendo un complemento perfecto en el monitoreo de la calidad del aire.

Urbano. - El crecimiento poblacional viene sufriendo una expansión desordenada, desde el punto de vista de la gestión urbana, la modelización es una herramienta indispensable en la urbanización sostenible permitiendo la planificación de focos de emisión y ordenamiento urbana/industrial minimizando la contaminación focalizada.

Salud. – La contaminación ambiental es uno de los principales problemas relacionadas a la salud, la exposición a un aire contaminado contribuye a una serie de enfermedades respiratorias, cardiovasculares, entre otras, minimizando la expectativa de vida de una persona, es así que el uso de la modelización crea mejores condiciones para la sociedad generando medidas de prevención.

Una de las principales vías de la ciudad del Cusco es la Av. la Cultura en la cual existe una gran cantidad de vehículos en circulación, cerca de esta se encuentran centros educativos, comerciales, hospitales, etc., es decir presenta una gran afluencia peatonal es así que la presente investigación busca evaluar que sectores de la ciudad son afectados por PM10 y PM2.5 en mayor concentración mediante la modelización.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

Deuman International & Walsh, (2005), “**Estudio de línea base ambiental COSAC I**”, implementaron un modelo de emisiones vehiculares con el uso de cálculos por medio de la metodología de MODEM para la red vial de Lima Metropolitana, a partir de factores de emisión vehicular y la categorización vehicular propuestas por Motor Test Center AB (MTC), para determinar el área de influencia ambiental antes y después del proyecto COSAC I. Los resultados indicaron un aporte mayoritario de PM10 y PM2.5 a la categoría buses (Combis, omnibuses y minibuses) alcanzando el 49%, camiones con el 27% y un 24 % entre vehículos livianos, taxis, camionetas y motocicletas.

Saavedra, (2014), “**Análisis de nuevos escenarios de emisión de contaminantes del parque automotor generados en un ambiente de tráfico vehicular**”, mediante factores de emisión vehicular, estimó las emisiones del parque automotor en la avenida Javier Prado (1.41 km), utilizando como base el modelo de Emisiones Vehiculares, MODEM (2010), obteniendo emisiones por tubo de escape en caliente de 18 377.4 kg/año, atribuyendo con el 82% al CO, 11% HC y 7% al NOx, por otra parte las partículas totales suspendidas para emisiones por desgaste de neumáticos y frenos, alcanzaron los 13.85kg/año atribuidas con el 33.1% a los automóviles y 15.04kg/año con el 43.48% por parte de los buses (omnibus y microbus) respectivamente.

Gil, (2021). “**Calidad del Aire en la Cuenca Atmosférica del Cusco**”, evaluó el inventario de emisiones de fuentes fijas y fuentes lineales, desarrollados por el grupo de estudios GESTA-aire, se estimaron una emisión total de 151 553.2 ton/año de PM₁₀, donde el 98.3% de emisiones corresponden al PM10 por parte del parque automotor.

Espinoza, (2018). “**Determinación De La Dispersión Geográfica De Los Gases NOx, CO, SO₂ Y Partículas (PM10), Emitidos por Una Central Térmica Aplicando El Modelo AERMOD**” Determinó la dispersión geográfica de los gases NOx, CO, SO₂ y partículas (PM10) emitidas por la chimenea de la central Térmica, usando el sistema de modelado AERMOD, cuyos niveles de

concentración estuvieron dentro de los estándares de calidad ambiental (ECA), obteniendo la concentración más alta a 600m de la fuente.

Sánchez & Wilcken (2016) **“Evaluación de tres Modelos de Micro-escala (AERMOD, CALINE4 Y R-LINE) en su Aplicación a las Vías Principales de la Ciudad de Bogotá”** el tesista plantea la evaluación de las 3 metodologías de modelado, donde concluye que el mejor modelo que se adecua a las condiciones de la ciudad de Bogotá, tomando en cuenta los factores meteorológicos y el flujo vehicular fue el modelo AERMOD frente a los R-LINE y CALINE4, así mismo analizó la meteorología basándose principalmente en una de las variables de dispersión más importantes que es la velocidad y dirección del viento encontrando 5 estaciones meteorológicas con comportamientos de viento homogéneo y 6 con comportamientos de vientos heterogéneos.

Tatar, Pasculescu, Pasculescu, & Romanescu (2011) **“modelado de la dispersión de contaminantes de la atmósfera de Rovinari central”** con el propósito de evaluar la contaminación de SO₂, NO₂, CO, partículas del área de Rovinari por parte de tres calderas N° 3, 4 y 5, los efectos potenciales en el medio ambiente y salud humana, se realizó un modelado matemático de los campos de concentración de los contaminantes utilizando el software Austal View, se encontraron concentraciones altas para dos contaminantes (SO₂ y NO₂) para el 2010. Las emisiones de SO₂ excedieron en 11.69 (caldera N°3), 11.66 (caldera N° 4) y en 15.92 (caldera N°5) del valor límite (400 mg/Nm³) se registraron valores altos a una distancia de 1200 m en la dirección Sur con concentraciones de 100-151 mg/m³ que cubre un área de 3600m² en tanto para el NO₂ las emisiones no excedieron el valor límite (500 mg/Nm³) representando 83% (caldera N°3), 93%(caldera N° 4) y 92.1%(caldera N°5) de emisiones del valor límite, la concentración de (50-87 mg/m³) se extiende a 400 m desde la distancia máxima de SO₂ hacia el este que comprende un área de 8800 m².

BASES TEÓRICAS

2.2 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

El contaminante desde el momento que es emitido al medio ambiente sufre diferentes transformaciones químicas y fotoquímicas, transporte y dispersión, modificando en algunos casos las condiciones de equilibrio natural del medio ambiente perjudicando al cuerpo receptor, es así que durante muchos años,

diferentes organismos como la organización mundial de la salud (OMS), la agencia de protección ambiental de los estados unidos (US-EPA), la Agencia Europea Ambiental (EEA), entre otros, vienen y continúan estudiando los diferentes efectos medio ambientales y la salud humana que provoca un aire contaminado, estimando 4.2 millones de personas muertas cada año a causa de la contaminación ambiental.

De acuerdo a la EPA existe contaminación cuando una o más sustancias químicas en concentraciones suficientemente elevadas en el aire pueden hacer daño a los seres humanos, animales, a la vegetación o a los materiales, asimismo la OMS citado en (Gallego, et al., 2012) define como “la aparición en el aire de una o varias sustancias extrañas en cantidades y durante periodos de tiempo suficientemente prolongados como para producir efectos nocivos sobre el hombre, los animales, las plantas o las tierras así como perturbar el bienestar o el uso de los bienes”

Por otra parte, los estándares nacionales de calidad ambiental del aire en el Perú definen como Contaminante del aire “Sustancia o elemento que en determinados niveles de concentración en el aire genera riesgos a la salud y al bienestar humano”.

2.3 FUENTES DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

Las emisiones de contaminación ambiental son atribuidas en general a dos fuentes: las naturales que son todas aquellas fuentes que no son causados por las personas y sus actividades (erupción volcánica, tormentas de polvo, brumas, etc...) y las antropogénicas que es la dependencia del hombre en la industria para producir sus necesidades o emisiones generadas por las actividades del hombre (Boubel, Fox, Turner, & Stern, 1994).

Las fuentes de acuerdo a su movilidad son clasificadas en fuentes puntuales que son establecimientos fijos (industrias mineras, cementeras, etc.) y las móviles, fuentes que se desplazan de un punto hacia otro (vehículos), siendo este como la mayor fuente de contaminación dentro de una zona urbana.

2.3.1 FUENTES MÓVILES.

Las fuentes móviles son todos aquellos procesos emisoras que se desplazan y no permanecen en un mismo punto (Seoáñez, 2002), tales como vehículos, aviones, barcos.

El mayor problema de contaminación en una zona urbana son los vehículos, quienes emiten grandes cantidades de contaminantes de criterio, hidrocarburos, entre otros componentes, producto de la combustión.

2.4 EMISIONES VEHICULARES

Las emisiones vehiculares se dan fundamentalmente a través de 3 condiciones: las emisiones en motor caliente, cuando se alcanza la estabilidad térmica de operación, las emisiones en motor frío provenientes en partidas frías (hasta alcanzar la temperatura de operación estable) y las emisiones evaporativas consignadas a los hidrocarburos evaporados antes y durante la operación vehicular. Además de lo mencionado existen las emisiones de material particulado por desgaste de neumáticos y frenos, esto producto del tiempo de uso y la resuspensión del polvo por el tránsito vehicular (CONAMA, 2009).

La emisión total está determinada por la siguiente ecuación general (CONAMA, 2009).

$E_{total} = E_{caliente} + E_{partidas\ frias} + E_{evaporativas} + E_{desgaste} + E_{polvo}$	Ecuación 1
--	------------

E_{total} : Emisiones totales del contaminante

$E_{caliente}$: Emisiones en caliente

$E_{partidas\ frias}$: Emisiones por partidas frías

$E_{evaporativas}$ Emisiones por evaporación de combustible.

$E_{desgaste}$: Emisión por desgaste de neumáticos y frenos

E_{polvo} : Emisión por resuspensión de polvo por calles pavimentadas.

Las emisiones vehiculares para condiciones de movilidad y cálculos de parámetros de estándares de calidad ambiental la ecuación (1) se resumen en:

$E_{total} = E_{caliente} + E_{desgaste} + E_{polvo}$	Ecuación 2
---	------------

2.4.1 EMISIONES POR TUBO DE ESCAPE EN CALIENTE

Las emisiones provenientes por tubo de escape en caliente vehicular está representado por la siguiente ecuación.

$E_i = NV_k * FE_{ik} * L$	Ecuación 3
----------------------------	------------

E_i : Emisión del contaminante evaluado (g/h)

NV_k : Número de vehículos de la categoría vehicular k (vehículo/h)

FE_{ik} : factor de emisión del contaminante i evaluado de la categoría vehicular k.

L : longitud de la red vial (km)

2.4.2 EMISIONES POR DESGASTE DE NEUMÁTICOS Y FRENOS

Las emisiones por descarga de neumáticos y frenos se determinaron mediante metodología de COPERT IV – simplificada citada en MODEM (2010).

$E_d = \sum_k NA_k \cdot FE_{d,k}$	<i>Ecuación 4</i>
------------------------------------	-------------------

E_d : Emisión del material particulado por desgaste (g)

NA_k : Nivel de actividad de la categoría vehicular (km/h).

$FE_{d,k}$: Factor de emisión del material particulado para la categoría vehicular k y tipo de descarga (g/km)

k : Categoría vehicular

d : Tipo de descarga, frenos o neumáticos

2.4.3 RESUSPENSIÓN DE POLVO

El paso vehicular a través de la red vial pavimentada genera la resuspensión de polvo el cual está representada por el factor de emisión de polvo resuspendido.

$FE = k \left(\frac{Sp}{2} \right)^{0.65} \left(\frac{W}{3} \right)^{1.5}$	<i>Ecuación 5</i>
--	-------------------

FE : factor de emisión de polvos re-suspendidos (g/km-vehículo)

k : constante que depende del tamaño de la partícula (g/VKT)

Sp : contenido de material sedimentada en la superficie del camino ≤ 75 micrones (g/m²)

W : peso vehicular (ton).

Para determinar la cantidad de emisiones vehiculares, es necesario atribuir factores de emisión vehicular, un valor que permite representar la emisión de los contaminantes vehiculares el cual está directamente relacionado con la velocidad vehicular.

$$V_k = \frac{t_k}{L}$$

Ecuación 6

V_k : velocidad de la categoría vehicular k

t_k : tiempo de recorrido de la categoría vehicular k

L : longitud de la Av. La cultura

2.5 FACTORES DE EMISIÓN VEHICULAR

De acuerdo a la US-EPA los factores de emisión son valores representativos que intentan explicar la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera cuyos valores están expresados en peso por distancia, peso, volumen o duración de la actividad.

Los factores de emisión vehicular permiten estimar la cantidad de contaminantes emitidos hacia la atmósfera. Existen diversos modelos empleados para la estimación de los factores de emisión vehicular, que presentan condiciones particulares así como tipos de vehículos, tipo de combustible , kilómetros recorridos, velocidades de operación, edad vehicular, entre otros, tales como el modelo MOBILE desarrollado por la US-EPA, modelo IVE un modelo internacional que se usa en regiones donde no existe herramientas que permiten estimar emisiones y el modelo COPERT desarrollado por la Agencia Europea del Ambiente – EEA.

En la tabla 1 se aprecia los factores de emisión vehicular propuestos por CONAMA los cuales son provenientes del modelo COPERT III de la Agencia Europea del Ambiente y de mediciones locales, así mismo presenta factores de emisiones vehiculares provenientes del programa EMEP/CORINAIR perteneciente también a la Agencia Europea del Ambiente.

Tabla 1

Factores de Emisión Vehicular por Categoría para PM10

CATEGORÍA	TONELADAS	DESCRIPCIÓN	EURO	FACTOR DE EMISIÓN g/km
autos livianos	<2.5 ton	Particulares, taxi-taxi colectivo	-	0.019
	<2.5 ton	Particulares C/C, taxi-taxi colectivo C/C	>=EURO I	0.0046
vehículos livianos	<2.5 ton	Station Wagon	-	$0.000058 * V^2 - 0.0086 * V + 0.45$
	<3.5 ton	comerciales S/C	-	0.019
	<3.5 ton	Comerciales C/C	-	0.0046
	<3.5 ton	comerciales diésel	-	$0.000045 * V^2 - 0.004885 * V + 0.1932$
camiones livianos	<3.5 ton	comerciales diésel	>EURO I	$0.00003015 * V^2 - 0.00327295 * V + 0.1294$
	<7.5 ton	convencionales	-	$4.5563 * V^{(-0.707)}$
	<7.5 ton	-	>=EURO I	$2.96159 * V^{(-0.7070)}$
	<7.5 ton	-	>=EURO II	$1.82252 * V^{(-0.7070)}$
camiones medianos	<7.5 ton	-	>=EURO III	$1.2757 * V^{(-0.7070)}$
	7.5-16 ton	-	-	$9.6037 * V^{(-0.7259)}$
	7.5-16 ton	-	>=EURO I	$6.242405 * V^{(-0.7259)}$
	7.5-16 ton	-	>=EURO II	$3.84184 * V^{(-0.7259)}$
camiones pesados	7.5-16 ton	-	>=EURO III	$2.689036 * V^{(-0.7259)}$
	>16 ton	convencionales	-	$10.933 * V^{(-0.7054)}$
	>16 ton	-	>=EURO I	$7.10645 * V^{(-0.7054)}$

CATEGORÍA	TONELADAS	DESCRIPCIÓN	EURO	FACTOR DE EMISIÓN g/km
	>16 ton	-	>=EURO II	$2.73325 * V^{(-0.7054)}$
	>16 ton	-	>=EURO III	$1.913275 * V^{(-0.7054)}$
buses	-	transporte público	-	$12.09253 * V^{(-0.7360)}$
	-	transporte público	>=EURO I	$5.109585 * V^{(-0.7360)}$
	-	transporte público	>=EURO II	$3.14436 * V^{(-0.7360)}$
	-	transporte público	>=EURO III	$2.201052 * V^{(-0.7360)}$
	-	interurbanos, rurales, particulares	-	$9.2934 * V^{(-0.7373)}$
	-	interurbanos, rurales, particulares	-	$6.04071 * V^{(-0.7373)}$
	-	interurbanos, rurales, particulares	-	$2.32335 * V^{(-0.7373)}$
	-	interurbanos, rurales, particulares	-	$1.626345 * V^{(-0.7373)}$
Motocicletas	2 tiempos	convencional	-	0.2
	< 250 cm3	convencional	-	0.02
	250<cc<750cm3	convencional	-	0.02
	>750cm3	convencional	-	0.02

Fuente: CONAMA (2009) & EMEP/CORINAIR (2007).

2.6 CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Los contaminantes principales del medio ambiente de acuerdo a sus niveles en el aire, los impactos generados a la salud, ecosistemas o los materiales, están determinados por los compuestos nitrogenados, monóxido de carbono, material particulado, compuestos orgánicos volátiles, compuestos orgánicos persistentes y ozono troposférico (Gallego et al., 2012).

La OMS señala cuatro contaminantes clave como el Material Particulado (PM), Ozono (O₃), Dióxido de nitrógeno (NO₂) y Dióxido de azufre (SO₂), que implican problemas sanitarios como cardiovasculares, respiratorias y cáncer, basados en evaluaciones científicas, por otra parte, se establecieron los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental en el D.S. 003-2017-MINAM, para mantener un ambiente equilibrado y cuidar la salud de las personas para el buen desarrollo de la vida.

Tabla 2

Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire (MINAM, 2017)

Parámetros	Periodo	Valor ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Criterio de Evaluación
Benceno (C ₆ H ₆)	Anual	2	Media aritmética anual
Dióxido de azufre (SO ₂)	24 horas	250	NE más de 7 veces al año
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	1 hora	200	NE más de 24 veces al año
	Anual	100	Media aritmética anual
Material particulado PM _{2.5}	24 horas	50	NE más de 7 veces al año
	Anual	25	Media aritmética anual
Material particulado PM ₁₀	24 horas	100	NE más de 7 veces al año
	Anual	50	Media aritmética anual
Mercurio Gaseoso Total (Hg)	24 horas	2	No exceder
Monóxido de Carbono (CO)	1 hora	30000	NE más de 1 vez al año
	8 horas	10000	Media aritmética móvil
Ozono (O ₃)	8 horas	100	Máxima media diaria NE más de 24 veces al año
	Mensual	1.5	NE más de 4 veces al año
Plomo (Pb) en PM ₁₀	Anual	0.5	Media aritmética de los valores mensuales

Parámetros	Periodo	Valor ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Criterio de Evaluación
Sulfuro de Hidrógeno (H_2S)	24 horas	150	Media aritmética

Nota: NE: No Exceder

Dentro de esta clasificación, el contaminante más relevante es el material particulado, PM10 y PM2.5 por los diferentes problemas que genera a la salud, respiratorios, cardiovasculares, entre otras.

2.7 MATERIAL PARTICULADO-PM10 Y PM2.5

La OMS y EPA definen al material particulado como una mezcla de sólidos y líquidos suspendidos en el aire, su importancia radica en el estudio del material particulado en suspensión, partículas de un tamaño aerodinámico de $\leq 10 \mu\text{m}$ (PM10) y partículas finas (PM2.5) de un tamaño aerodinámico $\leq 2.5 \mu\text{m}$ implicados en la contaminación ambiental y salud humana, variando de acuerdo a su composición, tamaño y origen. (OMS,2006)

El enfoque de las partículas está vinculado por aquellas que pueden ser inhaladas por el sistema respiratorio conocidos como la fracción respirable, los cuales están compuesto de sustancias orgánicas e inorgánicas tales como nitratos, fosfatos, amonio, iones de sodio, calcio, potasio, magnesio, cloro, carbón orgánico y elemental, material de corteza, agua unida a partículas y metales. (OMS, 2003), no obstante, las proporciones entre PM2.5 y PM10 varían de acuerdo a la topografía, meteorología y las fuentes específicas de material particulado de cada lugar (OMS, 2005), o difieren en las fuentes, mecanismos de formación, composición, tiempo de vida atmosférica, distribución espacial, variabilidad, tamaño, efectos biológicos. (Wilson & Suh, 1997) ejemplo: las regiones costeras están principalmente compuestas de cloruro de sodio proveniente de la sal marina.

Las partículas inhalables es decir PM10 se define como indicador de masa que entra al compartimento torácico (Wilson & Suh, 1997) que incluye partículas gruesas o de modo grueso ($\text{PM}_{10-2.5}$) y partículas finas o modo fino ($\text{PM}_{2.5}$). Las partículas gruesas se forman principalmente por abrasión o suspensión de polvo en el aire (Brugge, 2018) es decir producidos mecánicamente por ruptura de partículas sólidas más gruesas a fracciones respirables, entre las principales fuentes se encuentran el polvo transportado por el viento, caminos sin pavimentar, polvos generados por la turbulencia del tráfico en caminos con y sin pavimentar,

demoliciones de construcciones, evaporación del mar, polen, moho , partes de plantas e insectos(Wilson & Suh, 1997).

El PM_{2.5} indicador de masa de modo fino se forman usualmente a partir de gases emitidos al medio ambiente como un contaminante secundario, en una primera instancia estos gases a través de procesos de nucleación que implica la formación de partículas a partir de gases forman partículas por reacción química o condensación, seguidamente el crecimiento de estas partículas se da por coagulación (combinación de dos o más partículas) o condensación (gas o vapor se condensan en partículas existentes) hasta alcanzar aproximadamente 0.1µm para luego a través de acumulación forman partículas entre 0.1-1 µm.(WHO,2006).

Entre los más importantes de PM_{2.5} se encuentran los iones nitratos, sulfatos y amoniaco, material carbonoso, agua, materiales de corteza y metales. (WHO,2006) asimismo los niveles de partículas finas son relativamente constantes, puesto que cambian poco con distancias de kilómetros en espacios geográficos extendidos porque se forman como un contaminante secundario. (Brugge, 2018).

Tabla 3

Comparación entre Partículas Finas y Gruesas

	Partículas finas <2.5		Partículas gruesas 2.5-10um
Procesos de formación	Ultrafina(<1um) Combustión, procesos de alta temperatura y reacciones atmosféricas	Acumulación (0.1-1um) Combustión, procesos de alta temperatura y reacciones atmosféricas	Desintegración de sólidos y gotas grandes
Formación	Nucleación, condensación, coagulación	Condensación, coagulación, reacción de gases en o sobre partículas, evaporación de gotas de niebla y nubes en las que los gases se disuelven y reaccionan	Interrupción mecánica (chancado, molienda, abrasión de superficies), evaporación de rocíos, suspensión de polvos, reacción de gases en o sobre partículas.
Composición	Sulfato, carbón elemental, compuestos metálicos, compuestos orgánicos con vapores de saturación muy bajas a temperatura ambiente	Sulfato, nitrato, amonio e iones de hidrógeno, carbón elemental, gran variedad de compuestos orgánico, metales, agua ligada a partículas	Suelo suspendido o polvo de la calle, cenizas volantes de combustión incontrolada de carbón, petróleo y madera, nitratos, cloruros de ácido nítrico, ácido clorhídrico, óxidos de elemento de la corteza (silicio, aluminio, titanio, hierro), carbonato de calcio, cloruro de sodio sal marina, polen, moho, esporas de hongos, fragmentos de plantas y animales, neumáticos (pastillas de freno) y residuos de carretera.
Solubilidad	Probablemente menos soluble que el modo de acumulación	A menudo soluble, higroscópico y delicuescente	En gran parte insoluble y no higroscópico

	Partículas finas <2.5		Partículas gruesas 2.5-10um
	Ultrafina(<1um)	Acumulación (0.1-1um)	
Fuentes	Combustión, transformación atmosférica de dióxido de sulfuro y algunos compuestos orgánicos, procesos de alta temperatura	Combustión de carbono, petróleo, combustible diésel, madera, productos de transformación atmosférica de óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y carbono orgánico, incluyendo especies biogénicos orgánicos como los terpenos, procesos de alta temperatura, fundiciones de acero, etc.	Resuspensión de polvos industriales y suelo rastreado en caminos y calles, suspensión de suelo perturbado (agricultura, minería, caminos sin pavimentar), construcción y demolición, combustión incontrolada de carbón y petróleo, rocío oceánico, fuentes biológicas.
Vida media atmosférica	Minutos a horas	Días a semanas	Minutos a días
Procesos de eliminación	Crece en modo de acumulación, se difunde a las gotas de agua	Forma nubes de gotitas y se deposita en la lluvia, deposición seca	Deposición seca, barrido por la caída de lluvia
Distancias de viaje	<1 a decenas de km	Cientos a miles de km	< 1 a cientos de km

Fuente: (WHO, 2006) de US-EPA.

La exposición al material particulado puede ser adverso para la salud, básicamente condicionados por su concentración, tamaño y composición es decir por la capacidad de inhabilidad y toxicidad de la partícula, (SORIANO,2012), el PM10 que ingresa al sistema respiratorio disminuye la expectativa de vida de las personas, disminuyendo la función cardiopulmonar, por otro lado los PM2.5 son muy peligrosos, numerosos estudios lo relacionan con la mortalidad ya que por su diámetro aerodinámico puede llegar hasta los alvéolos pulmonares.

2.8 DISPERSIÓN

La dispersión es la acción y efecto de dispersar algo que solía estar unido (separación y esparcimiento), un fenómeno donde se produce movilidad por factores externos, este comportamiento en la atmósfera es provocado por el movimiento del fluido aire por factores de variación de presión, temperatura, viento, etc., entonces cuando una parcela de aire contaminado se encuentra en el fluido aire intervienen los factores que dispersan y a la misma vez transportan a través de la atmósfera, es de aquí que para verificar la calidad atmosférica se utilizan modelos de calidad del aire los cuales utilizan técnicas matemáticas y numéricas que simulan los procesos físicos y químicos que afectan a los contaminantes a medida que se dispersan y reaccionan en la atmósfera.(US EPA).

Así mismo “La modelización de la contaminación del aire puede verse como un método para proporcionar información sobre la calidad del aire sobre la base de lo que sabemos de las emisiones y de los procesos atmosféricos que conducen a la dispersión, transporte, la conversión química y la eliminación de contaminantes de la atmósfera por deposición”. (EEA, 1998).

Los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos son herramientas que permiten predecir a la vez estimar las concentraciones de los contaminantes hacia los receptores usando algoritmos matemáticos, es decir representan el comportamiento del contaminante en el dominio del modelado.

Existen numerosos modelos de dispersión cuyas aplicaciones se resumen en propuestas normativas, vigilancia de la calidad del aire, información pública e investigación científica siendo una de las principales aplicaciones los fines normativos tales como permisos de emisión, para realizar estudios de impacto ambiental, elaboración de programas de calidad, distribución de las concentraciones de los contaminantes en un tiempo y espacio determinado permitiendo evaluar la

calidad del aire de manera más precisa a la realidad local.(gallegos, et al., 2012),

Estos modelos pueden clasificar en:

- Modelos de caja
- Modelos gaussianos
- Modelos CFD
- Modelos lagrangianos
- Modelos eulerianos
- Modelos tipo Puff

2.8.1 MODELOS DE CAJA SIMPLE

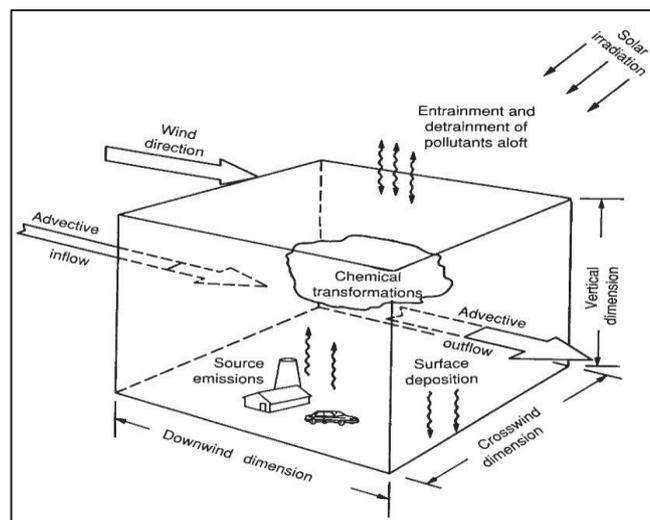
Es un tipo de modelo simple que permite estimar la concentración de un contaminante en un área determinada. Asume diferentes suposiciones tales como:

- La dirección es perpendicular a una de las caras
- El área bajo el estudio es la base
- La altura de la mezcla es el techo de la caja
- No existe transformaciones de sustancias dentro de la caja
- Condiciones estacionarias atmosféricas, sin transformaciones de nuevas sustancias

$$\text{concentración} = \frac{\text{Emisiones}}{\text{altura de mezcla} \times \text{velocidad del viento}}$$

Figura 1

Representación de modelo de caja.



Fuente: (Engardt, 2008)

2.8.2 MODELOS GAUSSIANOS

Los modelos gaussianos describen la dispersión atmosférica de una fumarada o columna en tres dimensiones (Henry & Heinke, 1999) asumiendo que el contaminante sigue una distribución normal como el modelo de Pasquill- Gifford o penacho gaussiano. Estos modelos asumen condiciones estacionarias, es decir presuponen condiciones meteorológicas estacionarias, turbulencia homogénea y vientos constantes (Gallegos, et, 2012), en todo el dominio del modelado.

$C(x, y, z) = \frac{Q}{u2\pi\sigma_z\sigma_y}$ $\exp \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right) \left[\exp \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right) + \right.$ $\left. \exp \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right) \right]$	Ecuación 7
--	------------

C (x, y, z): concentración en (µg/m³)

Q : caudal del contaminante emitido

σ_y, σ_z : coeficientes de dispersión horizontal y vertical

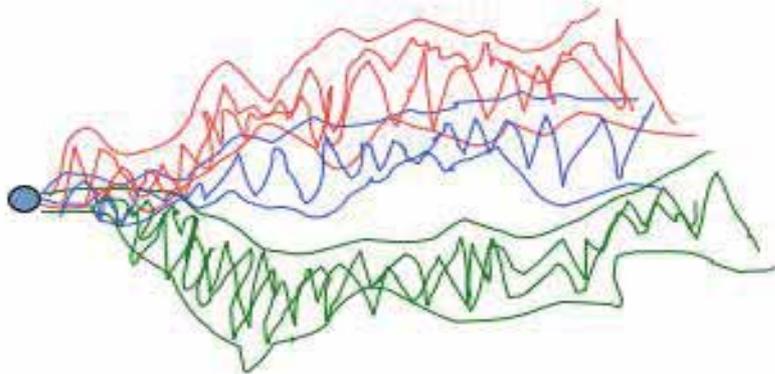
u : velocidad media a la altura de emisión (m/s)

H : altura efectiva de la pila

y, z : distancia horizontal y vertical desde la línea central de la pluma (m).

Figura 2

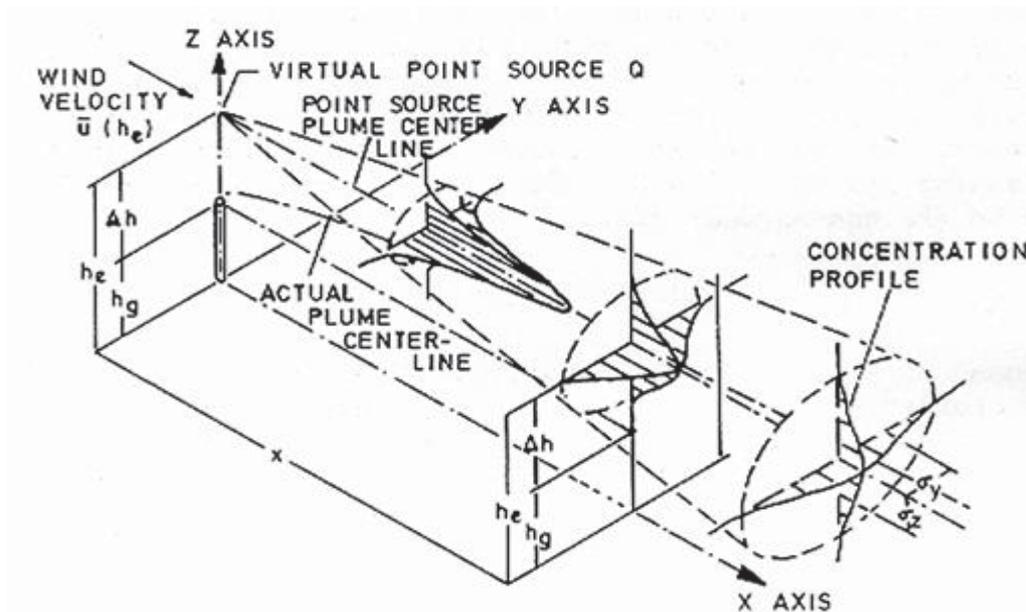
Extensión instantánea de una pluma en diferentes momentos



Fuente: (Engardt, 2008)

Figura 3

Pluma Gaussiana



Fuente: (Engardt, 2008)

Por otra parte, los modelos gaussianos solo aplican a contaminantes primarios es decir aquellos que son emitidos directamente de la fuente hacia el medio ambiente conservando la naturaleza de emisión inicial a través de la pluma gaussiana modelos de dispersión como: ISC3, AERMOD, ADMS, entre otras; este último conocido como modelo refinado utilizado para aplicaciones regulatorios recomendado por la EPA.

2.8.3 MODELOS CFD

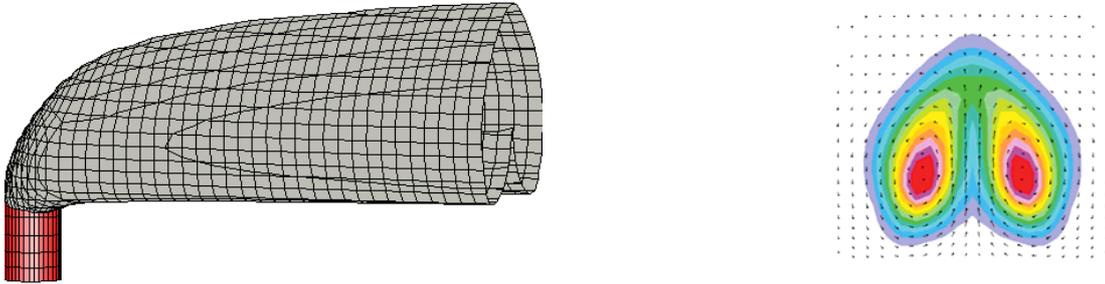
Es un método basado en la ecuación de Navier-Stokes que simula espacialmente y temporalmente las rutas de los contaminantes del aire desde las emisiones de las fuentes hasta las concentraciones de los contaminantes dentro de la zona. Vallero, (2019). Su enfoque está basado en analizar flujos en áreas urbanas. (Hussain, 2013) Obteniendo resultados de modelado de alta resolución (muy precisa) a escala local como el modelo ANSYS.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi V dA = \oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi dA + \oint_V S_\phi dV$$

Inestable convección difusión generación

Figura 4

Pluma de una descarga sección de una fuente y sección transversal de la pluma



Fuente: (Engardt, 2008)

2.8.4 MODELOS LAGRANGIANOS

Los modelos lagrangianos asumen que cada fuente emite un número determinado de partículas que siguen diferentes trayectorias por efectos determinísticos (campos de viento y flotabilidad) y estocástico (turbulencia), (Leelossy, Molnár, Izsák, Havasi, Lagzi, Mészáros, 2014). Las trayectorias son calculadas mediante ecuaciones diferenciales ordinarias- EDOs donde la distribución final de las partículas da una estimación de campo de concentración en un determinado volumen de aire. Estos modelos no son frecuentemente utilizados, pero son muy precisas al momento de modelar como el AUSTAL utilizado por Alemania con fines regulatorios.

La trayectoria de una partícula está dada por:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v} + \vec{v}_1$$

\vec{r} : posición de la partícula

\vec{v} : velocidad determinística de la partícula

\vec{v}_1 : vector fluctuante del viento turbulento

Figura 5

Propagación regional típica de una fuente puntual instantánea

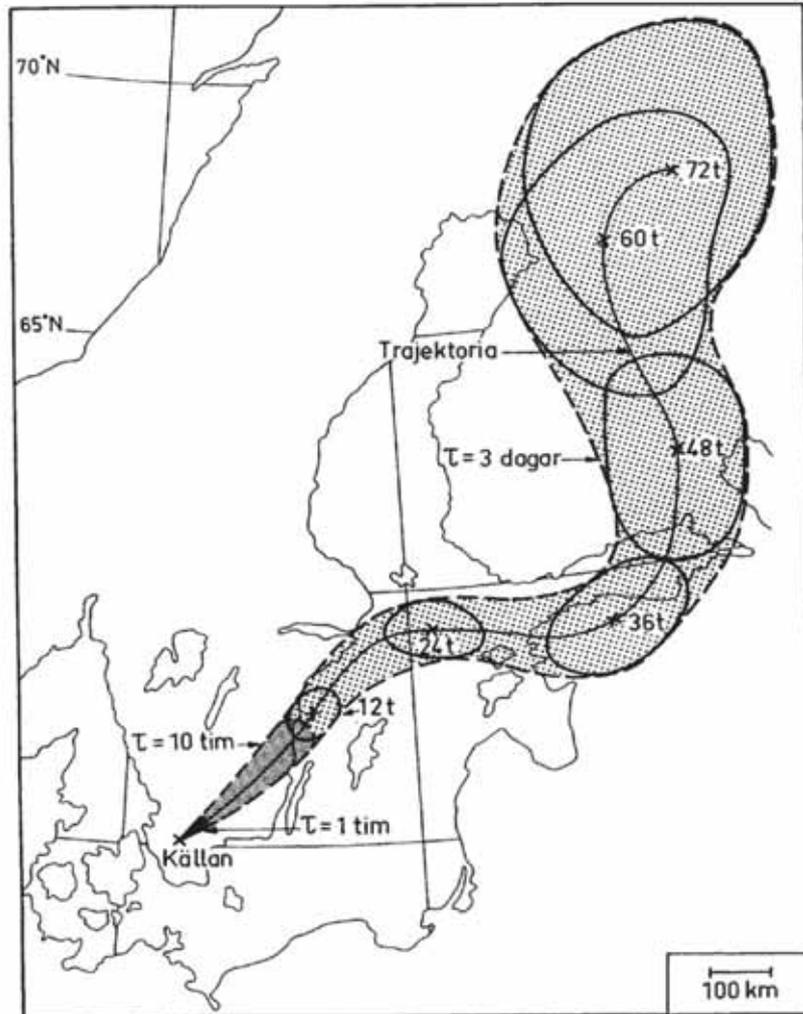


Figura: (Engardt, 2008)

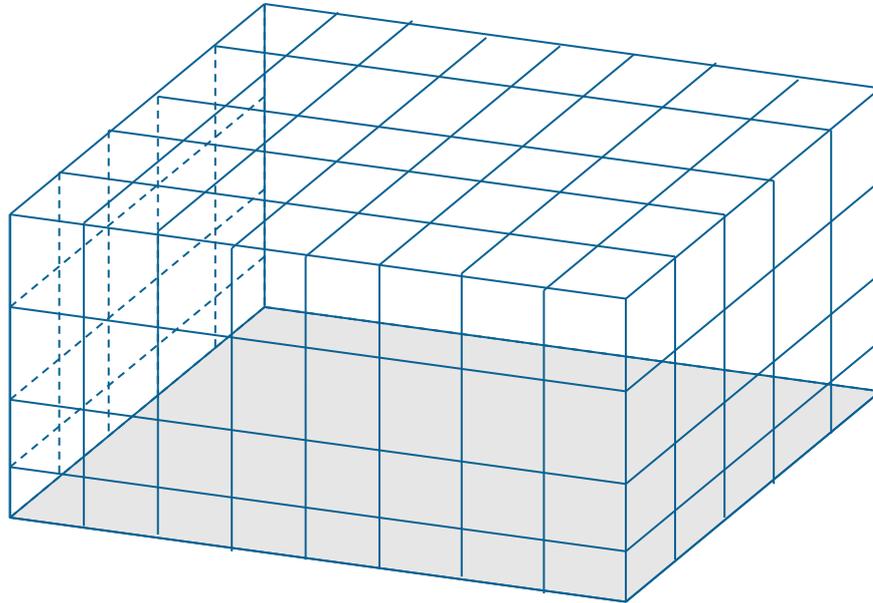
2.8.5 MODELOS EULERIANOS

Los modelos eulerianos se basan en la solución numérica de la ecuación de transporte, matemáticamente es una ecuación diferencial parcial de segundo orden (PDEs), (Leelossy, et al., 2014), este método se basa en una grilla en el espacio en cual nos permite analizar la dispersión de los contaminantes caja por caja en diferentes periodos de tiempo viento.

(Gallego et al., 2012). “Estos modelos son especialmente útiles para abordar la simulación de los contaminantes fotoquímicos (ozono, óxidos de nitrógeno y compuestos volátiles), los cuales presentan una compleja reactividad que es favorecida por la radiación solar y la temperatura”.

Figura 6

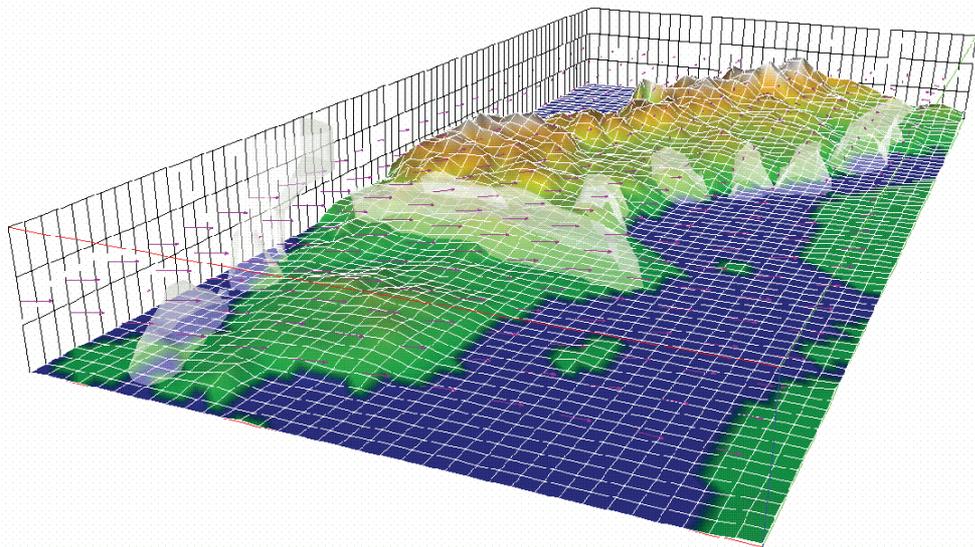
División de la atmósfera en cuadrículas.



Fuente: (Engardt, 2008)

Figura 7

Modelo de cuadrícula en la atmósfera



Fuente: (Engardt, 2008)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\nabla \cdot (c\vec{v}) + S_c + \nabla \cdot (D_c \nabla c)$$

\vec{v} : vector viento

S_c : término de fuente

D_c : coeficiente de difusión

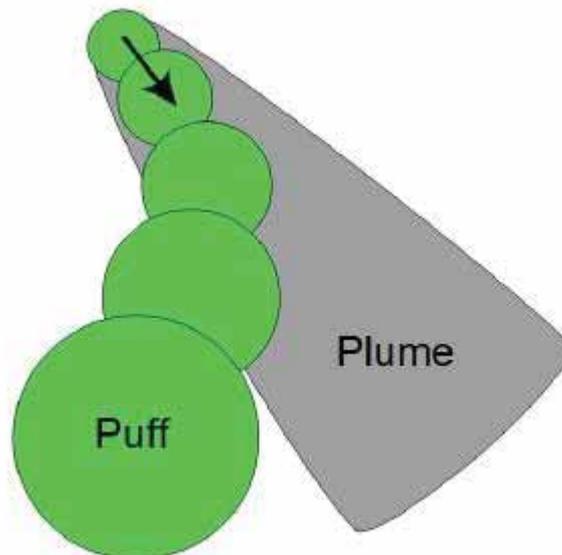
La ecuación representa los cambios de la concentración en un punto específico en función al flujo advectivo, fuente y el flujo difusivo.

2.8.6 MODELOS TIPO PUFF

Estos modelos son una combinación entre modelos gaussianos y lagrangianos, calculan la dispersión de los contaminantes a partir de una fuente de emisión instantánea (puff), estos pueden manejar cambios temporales de la dirección del viento incluyendo el efecto de la turbulencia, (Leelossy, et al., 2014), ejemplo: modelos como RIMPUFF, CALPUFF, RAPTAD, HYSPLIT.

Figura 8

Representación Esquemática de una Pluma Gaussiana y un Modelo Puff



Fuente: obtenido de (Leelossy, et al., 2014)

2.8.7 RECOMENDACIONES PARA LA APLICACIÓN DE MODELOS DE DISPERSIÓN:

Para la elección de un modelo de dispersión atmosférica es importante conocer las propiedades de los contaminantes que permiten visualizar de mejor manera el problema de contaminación, así como también las escalas de transporte, es así que

en la tabla 6 y tabla 7 se presentan enfoques y características para la selección de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos.

Tabla 4

Enfoques Recomendados para Diferentes Escalas y Aplicaciones del Modelado de Dispersión Atmosférica

Aplicación	< 1 km	1-10 km	10-100km	100-1000 km
Gestión de riesgos online (la rutina corta es importante)	-	Gaussiano	Puff	Euleriano
Terreno complejo	CFD	Lagrangiano	Lagrangiano	Euleriano
Materiales reactivos	CFD	Euleriano	Euleriano	Euleriano
Sensibilidad del receptor de la fuente	CFD	Lagrangiano	Lagrangiano	Lagrangiano
Cargas medias a largo plazo	-	Gaussiano	Gaussiano	Euleriano
Dispersión en atmósfera libre (volcanes)	-	Lagrangiano	Lagrangiano	Lagrangiano
Capa límite convectivo	CFD	Lagrangiano	Euleriano	Euleriano
Capa límite estable	CFD	Lagrangiano	Euleriano	Euleriano
Zonas urbanas, calles profundas	CFD	CFD	Euleriano	Euleriano

Fuente: obtenido de (Leelossy, et al., 2014).

Tabla 5

Lista de Características, Formulaciones y Procesos Típicos del Modelado, para las Diversas Escalas y Contaminantes Necesarios para la Evaluación de la Calidad del Aire

Descripción	Área de Evaluación		
	Local/hotspot (1–1 000 m)	Urbano/aglomerado (1–300 km)	Regional (25–10 000 km)
Tipo de modelo	<ul style="list-style-type: none"> -Modelos parametrizados gaussianos y no gaussianos. -Modelos estadísticos Modelos dinámicos de fluidos. -Modelos de partícula lagrangiana 	<ul style="list-style-type: none"> -Modelos parametrizados gaussianos y no gaussianos. -Modelos de transporte químico euleriano. -Modelos de partícula Lagrangiana. 	<ul style="list-style-type: none"> -Modelos de transporte químico euleriano -Modelos químicos lagrangianos
Meteorología	<ul style="list-style-type: none"> -Meteorología local. -Modelos dinámicos de solución de obstáculos. -Modelos de diagnóstico de campos de viento. 	<ul style="list-style-type: none"> -Modelos meteorológicos de mesoescala -Medidas meteorológicas localizadas -Modelos de diagnóstico de campos de viento 	<ul style="list-style-type: none"> -Modelos meteorológicos sinópticos/ meso escalares
Química	<ul style="list-style-type: none"> -Parametrizado o ninguno -Emisiones de tráfico ascendentes. 	<ul style="list-style-type: none"> -Según la aplicación -Modelos de emisión ascendentes y/o descendentes. 	<ul style="list-style-type: none"> -exhaustiva -Modelos de emisión de arriba hacia abajo
Emisión de modelado	<ul style="list-style-type: none"> -Emisiones específicas de la fuente 	<ul style="list-style-type: none"> -Modelos de procesos de emisión 	<ul style="list-style-type: none"> -Modelos de procesos de emisión
Compuesto	Local/hotspot	Urbano/aglomerado	Regional/continental

PM10	-Sin procesos químicos	-Deposición -Formación de partículas secundarias inorgánicas	-Deposición -partículas Primarios (combustión) -Partículas de formación secundaria inorgánica y orgánica. -polvo suspendido -sal marina. -Deposición.
PM2.5	-Sin procesos químicos	-Deposición -Formación de partículas secundarias inorgánicas -Química foto oxidante limitada	-Partículas de formación secundaria inorgánica y orgánica.
NO2	-Química fotooxidante	-Esquema foto estacionario estadístico/ relaciones empíricas. -Deposición	-Deposición -Química foto oxidante completa.
NOX	-Sin procesos químicos	-Sin procesos químicos -Química foto oxidante complete a grandes escalas	-Química foto oxidante completa.
O3	-Como en NO2	-Como en NO2	-Como en NO2 -Deposición.
SO2	-Sin procesos químicos	-Deposición. -Partículas de formación secundaria inorgánica y orgánica.	-Partícula de formación secundaria inorgánica. -Química foto oxidante completa.
Pb	-Sin procesos químicos	-Deposición -Formación de partículas secundarias inorgánicas	-Deposición -Esquemas químicos especializadas
Benceno	-Sin procesos químicos	n/a	-Deposición -Química foto oxidante completa

CO	-Sin procesos químicos	-Sin procesos químicos	-Química foto oxidante completa
Metales pesados	-Sin procesos químicos	-Deposición -Esquemas químicos especializadas	-Deposición -Esquemas químicos especializadas

Fuente: requisitos de la resolución de la calidad del aire de la Agencia Europea Ambiental (EEA,2011)

2.9 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

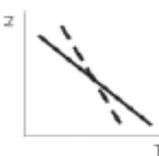
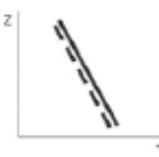
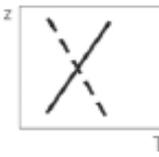
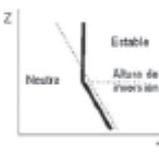
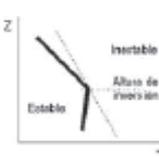
En contaminación atmosférica la dispersión y transporte de contaminantes está directamente relacionada con los parámetros meteorológicos fundamentales, como la velocidad y dirección del viento, así como la estratificación térmica de la atmósfera y la turbulencia (Henry & Heinke, 1999), incluyendo factores topográficos y geográficos (Gallego et al., 2012), este hecho se produce en la capa límite planetaria, es decir el estrato en la que existen cambios de estabilidad atmosférica por acción de movimientos horizontales o verticales del aire, llegando a alcanzar alturas de 1 a 2 km.

2.9.1 ESTRUCTURA VERTICAL DE LA ATMÓSFERA

La temperatura a medida que asciende por la troposfera, estrato en la que se desarrolla la vida, disminuye a razón de 0.65K/100m, conocido como la tasa de decaimiento (γ), sin embargo este valor dentro de la capa de mezcla es muy diferente, cuando este cambio se manifiesta en una temperatura adiabática seca es decir sin condensación, el valor es igual a 0.9K/100m denominado tasa de enfriamiento adiabático seco (Γ_D), (Henry & Heinke, 1999).

Figura 9

Relación de la estabilidad atmosférica con el gradiente de temperatura y evolución de los penachos

Atmósfera	Gradiente térmico	Gráfico del gradiente térmico	Tipo de penacho
Inestable	$\left(\frac{-dT}{dz}\right) > \Gamma$		 Penacho serpenteante (looping) con vientos ligeros
Neutra	$\left(\frac{-dT}{dz}\right) \approx \Gamma$		 Penacho cónico (coning) en ausencia de vientos
Estable	$\left(\frac{-dT}{dz}\right) \ll \Gamma$		 Penacho tubular (fanning) en ausencia de viento
Inversión térmica: inestable o neutra abajo, inversión encima	$\left(\frac{-dT}{dz}\right) < \Gamma$ $\left(\frac{-dT}{dz}\right) \approx \Gamma$		 Penacho fumigante (fumigating)
Inversión térmica: Inversión abajo, inestable encima	$\left(\frac{-dT}{dz}\right) > \Gamma$ $\left(\frac{-dT}{dz}\right) < \Gamma$		 Penacho antifumigante (lofting)
<p>--- Gradiente de temperatura adiabático (Γ) — Gradiente de temperatura existente</p>			

Fuente: (Gallego et al., 2012).

- Si $\gamma > \Gamma_D$, se denomina atmósfera inestable es decir existe turbulencia (mezcla vertical o agitación) (Núñez, 2002), entre diferentes masas de aire dentro de la capa límite por ende cuando un contaminante es emitido en estas condiciones, el transporte y la dispersión es favorable
- Si $\gamma < \Gamma_D$, se denota como atmósfera estable, no existe mezcla vertical, generalmente se manifiesta durante la noche y se empieza a romperse paulatinamente a medida que el sol caliente la superficie (Núñez, 2002),

pertenece a esta clase de atmósfera las inversiones, que es una discontinuidad del perfil de temperatura.

- Sí $\gamma = \Gamma_D$, es una condición neutra, asociado con poco calentamiento del suelo, cielos cubiertos con escasa mezcla vertical (Núñez, 2002) donde predominan las turbulencias mecánicas (Gallego et al., 2012) el transporte vertical de un contaminante dependerá de las fuerzas externas (Henry & Heinke, 1999).

Tabla 6

Clases de Estabilidad Atmosférica (Turner, 1970).

velocidad del viento a 10 m- (m/s)	Día			Noche	
	Radiación solar			Nubosidad ^d	
	Fuerte ^a	Moderada ^b	Débil ^c	>4/8 (en su mayoría nublado)	<3/8 (en su mayoría despejado)
<2	A	A-B	B	E	F
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

Fuente: A: muy estable. B: moderadamente inestable. C: ligeramente inestable. D: neutra. E: ligeramente estable. F: estable. ^a día de verano claro. ^b día de verano con algunas nubes. ^c corresponde a un atardecer o verano nublado. ^d fracción del cielo cubierto por las nubes. (Gallego et al., 2012).

2.9.2 VIENTO

Es un factor muy importante en el transporte de los contaminantes debido a gradientes de presión y temperatura, los contaminantes se transportan en la dirección y a la velocidad del viento (Henry & Heinke, 1999), siendo mas lentos cerca de la superficie por las irregularidades que esta presenta.

Los factores topográficos y geográficos son de hecho los causantes de que el viento sufra sus modificaciones de velocidad y dirección del viento (Gallego et al., 2012), las irregularidades producen turbulencia cerca de la superficie, muchas veces los contaminantes son atrapados en estas condiciones.

2.9.3 TOPOGRAFÍA

La topografía es uno de los factores muy importantes al momento de modelar un contaminante, está relacionado a los efectos sobre los elementos de la meteorología, como por ejemplo modificar la dirección y velocidad del viento, los contaminantes pueden ser retenidos en las formaciones de las montañas, limitando la dispersión. (Gallego et al., 2012).

Tabla 7

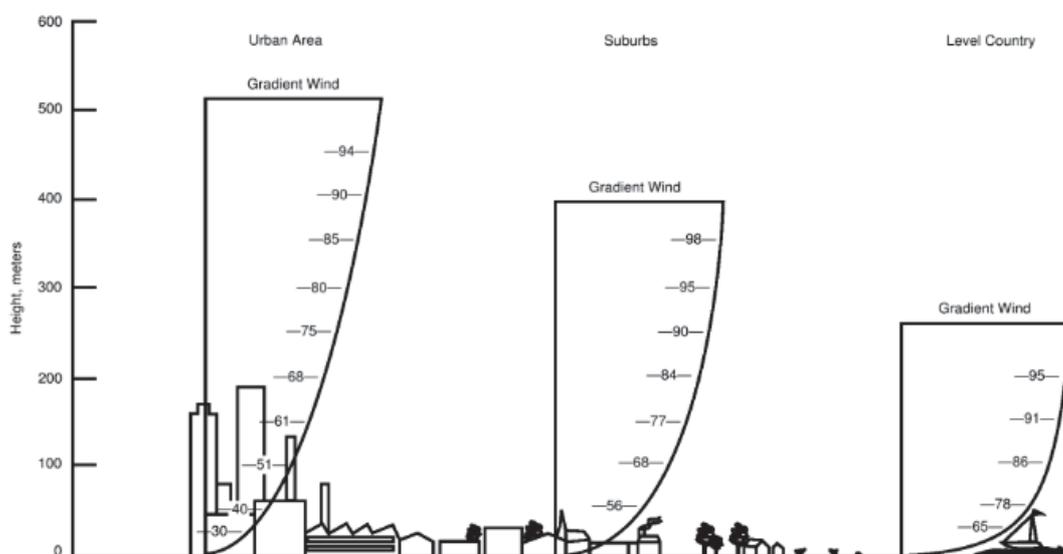
Valores Típicos de la Longitud de Rugosidad Superficial

Tipo de Superficie	Longitud de Rugosidad Superficial
Urbano	1.0-3.0
Bosque coníferas	1.3
Tierra cultivada (verano)	0.2
Tierra cultivada (invierno)	0.1
Pradera (verano)	0.001
Pradera (invierno)	0.0001

Fuente: Mohammed. (2019).

Figura 10

Variación del viento con la altura por diferentes superficies



Fuente: (Liu & Liptak, 1999)

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1 MATERIALES

3.1.1 EQUIPOS

- Cámara filmadora PANASONIC AVCCAM AG-HMC40P – **Características:** tipo de lente – zoom, tipo de zoom – óptica y digital con anillo de enfoque, zoom óptico – 12, resolución – 1080x720, conectividad – HDMI, distancia focal máxima – 490 mm, formato de video – AVCHD, utilizado para la filmación de los vehículos circulantes por la Av. la cultura – Cusco, para luego ser contabilizados.

3.1.2 SOFTWARE

- Programa de modelado Aermod View de Lakes environmental: **entradas de alimentación:** Fuente de emisión, ruta de control (opciones de título y dispersión), ruta de receptor (grilla de esparcimiento), meteorología (formato SFC y PFL) y topografía (SRTM3/S132072, Datum 84)– **salida:** representación gráfica de dispersión.

3.1.3 BASE DE DATOS

- Información meteorológica del Aeropuerto Abelardo Velasco Astete, utilizado para la generación de parámetros de la capa límite atmosférica y rosa de vientos.
- Elevación digital topográfica US SRTM 1-arc (Resolución 30 metros), utilizado para especificar las elevaciones del terreno dentro Aermod View.

3.2 METODOLOGÍA

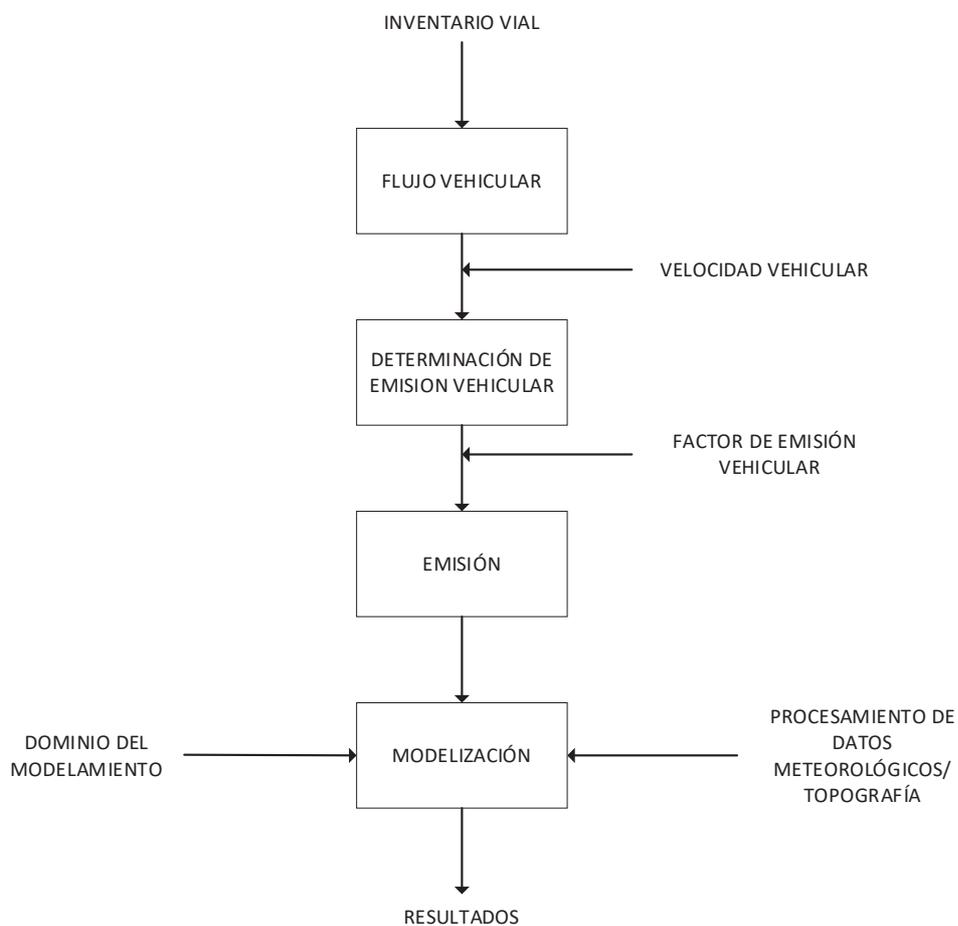
El presente estudio se realizó utilizando la metodología general tal como se visualiza en la Figura 11. Inicia con el inventario vial que detalla la identificación de la Av. La cultura – Cusco (inicio y final), ubicación en coordenadas UTM y el dimensionamiento de la vía, seguidamente se obtuvo el flujo vehicular mediante el conteo vehicular a partir de las filmaciones realizadas dentro de una semana de variaciones normales.

Para la determinación de la emisión vehicular se aplicó la metodología tipo arco dispuesto por el modelo de emisiones – MODEM, cuya metodología permite

calcular las diferentes emisiones vehiculares, tanto en frío, caliente, reposo, desgaste de neumáticos y frenos y resuspensión de polvo utilizando los factores de emisión vehicular dispuestos en la guía metodológica de CONAMA y EMEP/CORINAIR (tabla 1) los cuales están en función de la velocidad vehicular cuyos valores fueron calculados mediante tiempos de recorrido vehicular. Para las modelizaciones de dispersión de PM10 y PM2.5 se utilizó programa de modelado Aermod View cuyas entradas permiten la alimentación de la emisión vehicular en (g/s), así como también el dominio de modelado es decir el área en la cual se estiman las concentraciones de PM10 y PM2.5 y los factores meteorológicos procesados los cuales fueron obtenidos del aeropuerto Abelardo Velasco Astete, al igual que la topografía del lugar en el terreno digital SRTM3/SRTM1(S13W072)-DATUM 84.

Figura 11

Metodología para el Cálculo de Emisiones Vehiculares y Dispersión de Contaminantes Atmosféricos



A continuación, se describe la metodología general presentado en la figura 11, para el cumplimiento de los objetivos de la presente investigación:

3.2.1 INVENTARIO VIAL

IDENTIFICACIÓN

- Av. La cultura – Cusco, inicia en la intersección con la Av. Huáscar y finaliza con la intersección con Av. Camino Real.

UBICACIÓN EN COORDENADAS UTM

- Inicio- 178273.00 m E 8503406.00 m S
- Fin- 181593.00 m E 8502585.00 m S

Figura 12

Longitud de la Vía Av. La Cultura – Cusco



Fuente: Google Earth.

DIMENSIÓN

- Longitud de 3.418 km
- Ancho promedio de 15.75 m (dos sentidos)

3.2.2 FLUJO VEHICULAR POR CATEGORÍA

Para determinar el flujo vehicular que circula a través de la Av. La Cultura – Cusco, se realizaron filmaciones en el puente de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, teniendo en consideración las variaciones que se experimentan dentro de una semana normal (Deuman International & Walsh, 2005), teniendo así filmaciones (las filmaciones se realizaron en la segunda semana del mes de agosto entre el 9 y 15 de mes en mención) : Lunes-Jueves denominados días típicos y Viernes, Sábado y Domingo denominados días atípicos puesto que existe una tendencia de incremento vehicular los fines de semana así como una disminución los domingos por las reuniones y descansos familiares existentes, por otro lado también se realizaron encuestas en las oficinas de los transportes urbanas e interurbanas, así como a conductores que pasan por la Av. La Cultura con el fin de minimizar el conteo vehicular por categoría y obtener una estimación cercana a la realidad. El horario de las filmaciones fue realizado de 10:00 am-11:00 am., durante una semana.

Figura 13

Filmaciones del Flujo Vehicular



Las categorías vehiculares fueron reorganizadas de acuerdo a la guía metodológica de fuentes móviles CONAMA (2009) y EMAP/CORINAIR (2007), realizando una adaptación a la realidad local.

Tabla 8

Lista de Categorías Vehicular

Categoría vehicular	Descripción
Autos livianos	Autos particulares, taxis colectivos, sedan y Station wagon
Vehículos livianos	Vehículos comerciales
Camiones livianos	Camión simple
Camiones medianos	
Camiones pesados	
Buses	Transporte público Urbano, Interurbano, Rural y Particulares.
Motocicletas	< de 250 cm ³ , 250<cc<750 cm ³ , >750cm ³ .

Fuente: CONAMA (2009) & metodología EMEP/CORINAIR (2007).

3.2.3 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD

Para el cálculo de velocidad (Ec. 6), se estimaron los tiempos de recorrido de las categorías vehiculares a través de la Av. La Cultura, transportándose en los vehículos desde el inicio (Paradero Huáscar) hasta el final (Paradero Marcavalle).

Las estimaciones de los tiempos se realizaron de acuerdo a los días planteados por (Deuman International & Walsh, 2005), en el horario de 10:00 am-11:00 am, tanto de subida y bajada, obteniendo tiempos promedios.

3.2.4 DETERMINACION DE EMISIÓN VEHICULAR

Los cálculos de las emisiones vehiculares por categoría, clasificadas en la tabla 8, siguieron la **METODOLOGÍA TIPO ARCO** parte del Modelo de emisiones vehiculares **MODEM**, esta metodología se basa en la existencia de una red vial, en condiciones de operación básicas, en un horario determinado, por otro lado los cálculos determinados por esta metodología son: emisiones por tubo de escape en caliente, emisiones evaporativas, por desgaste de frenos y neumáticos, consumo

de combustible y emisiones por parte del polvo suspendido por calles pavimentadas.

Los contaminantes que se evaluarán en este trabajo son:

- PM10
- PM2.5

La emisión total (Ec. 2) para los contaminantes a evaluar está representada por: las emisiones por tubo de escape en caliente (Ec. 3).

Las emisiones por desgaste de neumáticos y frenos se calcularán mediante la (Ec. 4) para lo cual se utilizaron los valores de la tabla 9.

Tabla 9

Factores de Emisión Vehicular por Descarga

Categoría vehicular	Desgaste de neumáticos (g/km)	Desgaste de frenos (g/km)
Motocicletas	0.0028	0.0037
Autos livianos	0.0064	0.0073
Camiones livianos	0.0101	0.0115
Camiones pesados y buses	0.0270	0.0320

Fuente: factor de emisión vehicular COPERT IV, citado en MODEM (2010)

Para el cálculo de la emisión por resuspensión de polvo se determinaron mediante la ecuación 3, previamente se calcularon el factor de emisión por resuspensión de polvo (Ec. 5), utilizando los valores de las tablas: 10, 11 y 12.

Tabla 10

Valores de la Constante k (g/VKT)

Tamaño de partículas	k (g/VKT)
PM2.5	1.1
PM10	4.6

Fuente: CONAMA (2009) obtenido de AP-42

Tabla 11*Contenido de Material en Suspensión*

Flujo vehicular (v/día)	≤500	500- 5000	5000- 10000	>10000
Carga de finos (g/m ²)	0.6	0.2	0.06	0.03

Fuente: AP 42, Fuentes misceláneas-vías pavimentadas (2011)

Tabla 12*Peso Vehicular*

Tipo de vehículo	Peso (ton)
Vehículos particulares	1.2
Vehículos comerciales	2
Motos	0.2
Buses	17.2
Camiones livianos	7.5
Camiones medianos Diesel	12
Camiones pesados	45

Fuente: CONAMA (2009)

3.2.4 FACTORES DE EMISIÓN VEHICULAR

La emisión vehicular para PM10 se determinó a partir de factores de emisión vehicular (tabla 1), para lo cual este presente trabajo está basado en la guía metodología para la estimación de emisiones atmosféricas realizado por CONAMA (2009), de igual manera se complementa con la guía metodológica EMEP/CORINAIR (2007).

Por otra parte, las estimaciones de PM2.5 se realizaron tomando en cuenta la razón de PM2.5/PM10 en combustión vehicular, según la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Instituto Nacional de Ecología de México – 2011 (INE-SEMARNAT). Los procesos de emisión por combustión tienen una razón por encima del 98%, por otra parte, la guía metodológica EMEC/CORINAIR (2007) considera el PM2.5= PM10. A partir de lo mencionado la razón de PM2.5/PM10 en combustión vehicular utilizado fue un promedio aritmético de 99%.

3.2.5 DOMINIO DEL MODELADO

El dominio del modelado es el área donde se estimó y predijo la dispersión de PM10 y PM2.5, perteneciente a una zona urbana con terreno elevado. A continuación, se presentan las características y dominio del área de modelado Tabla N°13 y Fig. N°14 respectivamente.

Tabla 13

Características del Área de Modelado

PROYECCIÓN DE MAPA	DOMINIO DEL ÁREA
Proyección: UTM.	Esquina SW (176642.91, 8500019.02)
Datum: WGS84 (Sistema Geodésico Mundial 1984)	Esquina NE (186642.91, 8505019.02)
Zona UTM: 19	Ancho 10 km
Hemisferio: Sur	Largo 5 km
	Área 50 km ²

Figura 14

Dominio de la modelización espacial



Fuente: Google Earth

3.2.6 PROCESAMIENTO DE DATOS METEOROLÓGICOS

Los datos meteorológicos fueron obtenidos del aeropuerto Alejandro Velasco Astete, para un periodo de 3 meses (mayo, junio y julio) conocidos como meses secos, sin precipitaciones, estos datos meteorológicos fueron procesados por el programa AERMET, el cual consta de tres etapas: la primera etapa consta de la extracción y evaluación de la calidad de los datos meteorológicos, en la segunda etapa se realiza un mezclado de todos los datos meteorológicos alimentados y son ordenados en bloques de 24 horas de los datos alimentados y por último en la tercera etapa son calculados los parámetros de dispersión, obteniendo parámetros de superficie (formato .SFC) y de perfil (formato .PFL).

3.2.7 MODELIZACIÓN CON AERMOD VIEW

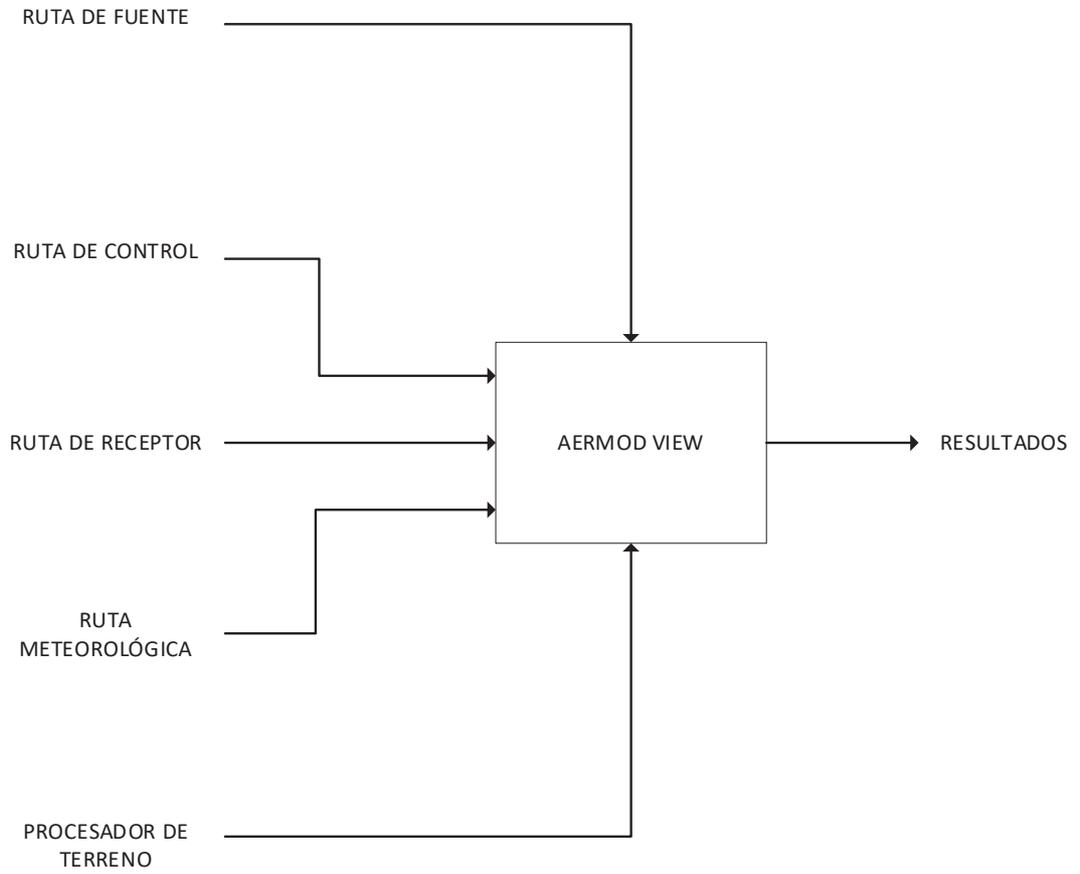
La dispersión de PM10 y PM2.5 de las emisiones vehiculares se realizó mediante la modelización con AERMOD view, cuyo modelo necesita rutas (Figura 15), las cuales son informaciones necesarias para la obtención de la dispersión.

En la ruta fuente, se procedió a la alimentación de la longitud de la fuente lineal de 3.418 km con las coordenadas descritas en el inventario vial, así como la altura de emisión por tubo de escape vehicular cuyo valor es de 0.4 m (Sánchez & Wilcken, 2016). En la ruta de control se especifica las opciones del título del proyecto y las opciones dispersión del contaminante.

La ruta receptora permite analizar los puntos de contaminación en 231 grillas receptoras con espaciamiento de 500 m. La ruta meteorológica es alimentada por los archivos generados en AERMET- archivos. SFC y archivos. PFL y por último para la ruta de terreno se alimentó con el terreno digital SRTM3/SRTM1(S13W072)-DATUM 84. Finalmente se ejecutó la corrida del programa para la obtención de resultados.

Figura 15

Diagrama de Entradas y Salidas para Aermod View



CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 FLUJO VEHICULAR

A partir de la metodología descrita, la tabla 14 presenta los resultados de una resolución temporal horaria de la circulación vehicular por la Av. La Cultura – Cusco, los cuales fueron contabilizados a partir de las grabaciones realizadas dentro de las variaciones de una semana normal. Se contabilizaron que la cantidad de vehículos circulantes de lunes a jueves fueron de 2789 vehículos por hora, considerados días típicos puesto que presentan características similares de circulación vehicular y peatonal determinados por los días laborables. El fin de una semana laboral y el inicio del fin de semana incrementa la circulación vehicular obteniendo de 3026 y 3275 vehículos por hora para los días viernes y sábado respectivamente, por último, se contabilizó 1762 vehículos por hora correspondiente al día domingo, estos resultados son producto de las irregularidades de la semana definidos por las condiciones de flujo vehicular y peatonal irregular llamados días atípicos.

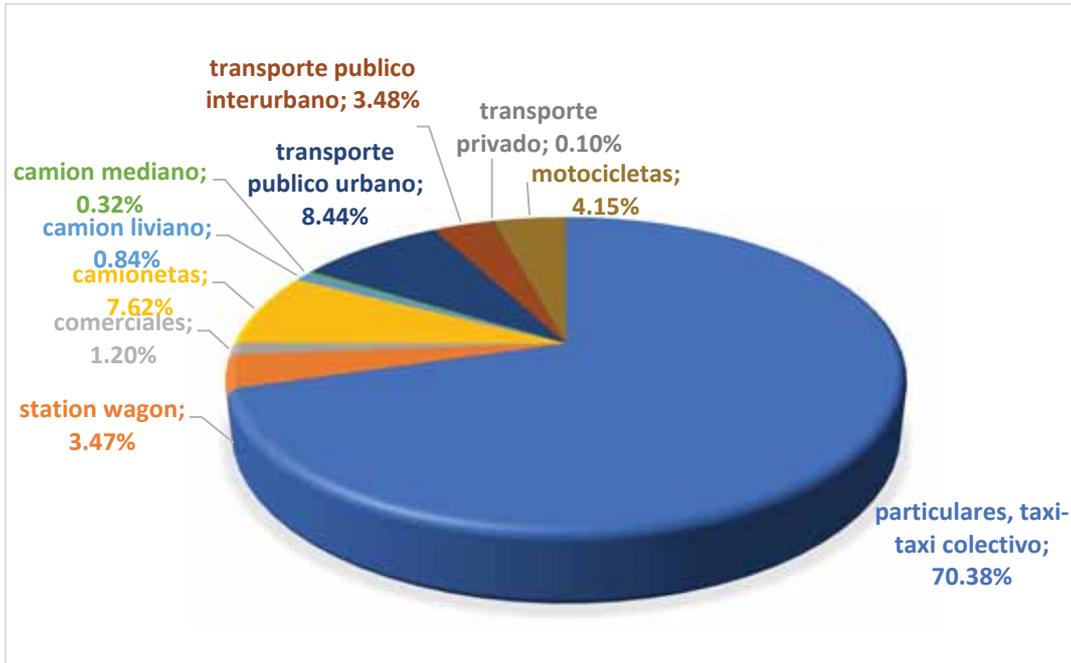
Tabla 14

Flujo Vehicular Horario Circulante por la Av. La Cultura – Cusco, dentro de las variaciones de una semana normal.

CATEGORÍA VEHICULAR	LUNES-JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO
Particulares, taxi-taxi colectivo	2050	1950	2185	1179
Station wagon	98	89	107	79
Comerciales	33	33	55	10
Camionetas	98	411	397	263
Camión liviano	18	44	38	7
Camión mediano	7	14	17	3
Transporte público urbano	257	257	257	78
Transporte público interurbano	100	100	100	68
Transporte privado	5	0	0	0
Motocicletas	123	128	101	75
Total	2789	3026	3257	1762

Figura 16

Porcentaje de vehículos circulantes



De acuerdo a la figura 16, los vehículos particulares, taxi-taxi colectivo presentan una mayor participación en la circulación vehicular por la Av. La Cultura – Cusco los cuales representan el 70.38% frente al 8.44% del transporte público urbano, así mismo existe una representación del 7.62% respecto a las camionetas, motocicletas con 4.15%, transporte público interurbano y Station wagon con el 3.48% y 3.47% respectivamente. Las categorías que presentan menor participación son los vehículos comerciales, camión liviano, camión mediano y el transporte privado resultando 1.20%, 0.84%, 0.32% y 0.1% respectivamente.

En los últimos 20 años y aun en las venideras la tendencia del parque automotor local y nacional es ascendente, debido al incremento del PBI nacional, generando un mayor poder adquisitivo en las familias, la existencia de inversión en la infraestructura vial, malas políticas públicas y migraciones a zonas urbanas (Gutierrez & Márquez, 2020) A Pesar de la situación sanitaria actual el cual ha restringido diferentes actividades del sector producción, manufacturera, etc., y con ello ha limitado la circulación vehicular y peatonal, actualmente se han reactivado paulatinamente los diferentes sectores dinamizadoras de la economía local y nacional esto implica un crecimiento en el flujo vehicular en la región y con ello la zona de estudio. (Av. La Cultura – Cusco).

4.2 EMISIÓN VEHICULAR PM10 Y PM2.5

Las velocidades promedio determinadas por las diferentes categorías vehiculares se presentan en la tabla 15, los cuales son producto de las características propias de la Av. la Cultura – Cusco, es decir la cantidad de semáforos, paraderos y las vías derivadas. La velocidad también implica la fuerza necesaria para el movimiento de cada categoría vehicular que es proporcional a la masa, por consiguiente, se ha de esperarse los resultados de la tabla 15, donde se visualiza que los vehículos livianos poseen mayor velocidad que las demás categorías vehiculares alcanzando los 25 km/h, sin embargo, en algunas condiciones nacionales como la Av. Javier Prado – Lima las velocidades respecto a esta categoría vehicular alcanzan los 8.5 km/h (Saavedra, 2014) y los 20 km/h en la ciudad de Arequipa (Tapia, 2017).

Tabla 15

Velocidad Vehicular Promedio

VELOCIDAD	V.P km/h
AUTOS LIVIANOS	23.61
VEHICULOS LIVIANOS	25.21
CAMIONES LIVIANOS Y MEDIANOS	18.55
TRANSPORTE PÚBLICO Y PRIVADO	16.6

Así mismo se obtuvieron emisiones vehiculares horarios correspondiente a PM10 en una semana de variaciones normales. La tabla 16 muestra los resultados de PM10 para los días típicos considerados (lunes – jueves), así mismo la tabla 17, 18 y 19 muestran los resultados de PM10 Total correspondiente a los días atípicos (viernes, sábado y domingo respectivamente).

En la tabla 16 considerado días típicos de una normal, se observa que la emisión por tubo de escape por parte de los vehículos particulares, taxi – taxi colectivo poseen una emisión de 133.14 g/h cuyo resultado es inferior a las emisiones de transporte público urbano de 349.36 g/h, siendo los vehículos menores muy superiores en número, estos resultados se deben fundamentalmente por el tipo de combustible utilizado, por ejemplo más del 75% de emisiones de PM10 está vinculado a camiones y buses (Deuman International & Walsh, 2005) cuyo

combustible es el diésel. Por otro lado, la liberación de PM10 por desgaste de neumáticos y frenos, está directamente influenciado por el nivel de actividad vehicular, es así que los vehículos particulares, taxi – taxi colectivo emiten la mayor liberación alcanzado los 44.85 g/h y 51.15g/h respectivamente y por último la resuspensión de polvo influenciado por el peso vehicular alcanzando un valor máximo de 80. 42 g/h por parte del transporte público urbano.

Por último, los resultados de las emisiones de PM10 de las tablas 17, 18 y 19, correspondientes al tubo de escape, desgaste de neumáticos y frenos, y resuspensión de polvo son iguales a las características de liberación de la tabla 1

Tabla 16*Emisión vehicular horario de PM10 correspondiente a los días Lunes a jueves considerados días Típicos*

CATEGORÍA VEHICULAR	LUNES-JUEVES (Veh/h)	EMISIÓN POR TUBO (g/h)	NEUMÁTICOS (g/h)	FRENOS (g/h)	RESUSPENSIÓN (g/h)	EMISIÓN TOTAL (g/h)
Particulares, taxi-taxi colectivo	2050	133.14	44.85	51.15	5.91	235.05
Station wagon	98	93.56	2.14	2.45	0.97	99.12
Comerciales	33	2.14	0.07	1.30	0.70	4.22
Camionetas	98	6.36	3.38	3.85	2.09	15.69
Camión liviano	18	35.56	0.62	0.71	5.68	42.57
Camión mediano	7	11.03	0.65	0.77	2.21	14.66
Transporte público urbano	257	349.36	23.72	28.11	80.42	481.61
Transporte público interurbano	100	100.08	9.23	10.94	31.29	151.54
Transporte privado	5	5.00	0.46	0.55	3.20	9.21
Motocicletas	123	8.41	1.18	1.56	0.08	11.22

Tabla 17*Emisión vehicular PM10 Correspondiente al día Viernes designado como día Atípico*

CATEGORÍA VEHICULAR	VIERNES (Veh/h)	EMISIÓN POR TUBO (g/h)	NEUMÁTICOS (g/h)	FRENOS (g/h)	RESUSPENSIÓN (g/h)	EMISIÓN TOTAL (g/h)
Particulares, taxi-taxi colectivo	1950	126.65	42.66	48.66	5.62	223.59
Station wagon	89	84.97	1.95	2.22	0.88	90.01
Comerciales	33	2.14	0.07	1.30	0.70	4.22
Camionetas	411	26.69	14.19	16.16	8.75	65.79
Camión liviano	44	86.93	1.52	1.73	13.89	104.07
Camión mediano	14	22.07	1.29	1.53	4.42	29.31
Transporte público urbano	257	349.36	23.72	28.11	80.42	481.61
Transporte público interurbano	100	100.08	9.23	10.94	31.29	151.54
Transporte privado	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Motocicletas	128	8.75	1.23	1.62	0.09	11.68

Tabla 18*Emisión vehicular PM10 Correspondiente al día Sábado designado como día Atípico*

CATEGORÍA VEHICULAR	SÁBADO (Veh/h)	EMISIÓN POR TUBO (g/h)	NEUMÁTICOS (g/h)	FRENOS (g/h)	RESUSPENSIÓN (g/h)	EMISIÓN TOTAL (g/h)
Particulares, taxi-taxi colectivo	2185	141.91	47.80	54.52	6.30	250.53
Station wagon	107	102.15	2.34	2.67	1.06	108.22
Comerciales	55	3.57	0.12	2.16	1.17	7.03
Camionetas	397	25.78	13.71	15.61	8.45	63.55
Camión liviano	38	75.07	1.31	1.49	12.00	89.88
Camión mediano	17	26.80	1.57	1.86	5.37	35.59
Transporte público urbano	257	349.36	23.72	28.11	80.42	481.61
Transporte público interurbano	100	100.08	9.23	10.94	31.29	151.54
Transporte privado	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Motocicletas	101	6.90	0.97	1.28	0.07	9.22

Tabla 19*Emisión vehicular PM10 Correspondiente al día Domingo designado como día Atípico*

CATEGORÍA VEHICULAR	DOMINGO (Veh/h)	EMISIÓN POR TUBO (g/h)	NEUMÁTICOS (g/h)	FRENOS (g/h)	RESUSPENSIÓN (g/h)	EMISIÓN TOTAL (g/h)
Particulares, taxi-taxi colectivo	1179	76.57	25.79	29.42	3.40	135.18
Station wagon	79	75.42	1.73	1.97	0.78	79.90
Comerciales	10	0.65	0.02	0.39	0.21	1.28
Camionetas	263	17.08	9.08	10.34	5.60	42.10
Camión liviano	7	13.83	0.24	0.28	2.21	16.56
Camión mediano	3	4.73	0.28	0.33	0.95	6.28
Transporte público urbano	78	106.03	7.20	8.53	24.41	146.17
Transporte público interurbano	68	68.05	6.28	7.44	21.28	103.04
Transporte privado	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Motocicletas	75	5.13	0.72	0.95	0.05	6.84

Tabla 20

Emisión Vehicular Promedio – Horario de PM10 Total dentro de una semana Normal.

CATEGORÍA VEHICULAR	TONELADAS	EMISIÓN POR TUBO(g/h)	NEUMÁTICOS (g/h)	FRENOS (g/h)	RESUSPENSIÓN (g/h)	EMISIÓN TOTAL (g/h)
particulares, taxi-taxi colectivo	<2.5 ton	125.39	42.23	48.17	5.57	221.36
Station wagon	<2.5 ton	90.97	2.08	2.38	0.94	96.37
Comerciales	<3.5 ton	2.13	1.13	1.29	0.70	5.26
Camionetas	<3.5 ton	13.57	7.22	8.22	4.45	33.46
Camión liviano	<7.5 ton	45.44	0.79	0.90	7.26	54.40
Camión mediano	7.5-16 ton	13.96	0.82	0.97	2.80	18.55
Transporte público urbano	-	314.60	21.36	25.31	72.41	433.69
Transporte público interurbano	-	95.50	8.81	10.44	29.86	144.61
Transporte privado	-	2.86	0.26	0.31	1.83	5.26
Motocicletas	convencional	7.77	1.09	1.44	0.08	10.38

La tabla 20 muestra las emisiones vehiculares Promedio para las diferentes categorías vehiculares para PM10 total en una resolución temporal horaria cuya emisión estimada alcanzó los 1023.32 g/h. Las figuras 17 y 18 muestran la participación de emisión de PM10 por las diferentes categorías vehiculares.

El aporte mayoritario está vinculado al transporte público urbano cuyas emisiones alcanzaron los 433.69 g/h el cual representa el 42.38% de participación, seguidamente de los vehículos particulares, taxi-taxi colectivo que emiten 221.36 g/h representado el 21.63%. por otra parte, se tiene al Transporte Público Interurbano, Station wagon, camión liviano y camionetas con emisiones de 144.61.83 g/h, 96.37 g/h, 54.4 g/h y 33.46 g/h con participación de 14.13%, 9.42%, 5.32% y 3.27% respectivamente. Por último, se tiene a la categoría camión mediano, motocicletas, comerciales y transporte privado con emisiones de 18.55 g/h, 10.38 g/h, 5.26 g/h y 5.26 g/h y con participación vehicular de 1.81%, 1.01%, 0.51% y 0.51% respectivamente.

Las diferentes participaciones de emisión vehicular de PM10 son propias de la zona de estudio, los cuales son diferentes a otras realidades del país, por ejemplo, el transporte de buses alcanzó una participación de 49% y Camiones 28% en el proyecto COSAC 1 – Lima (Deuman International & Walsh, 2005) frente al 42.38% y 7.18 % (camiones liviano y mediano) en la Av. la Cultura – Cusco. Existen diferencias significativas, pero poseen un patrón de emisión vehicular el cual está en función del tipo de combustible que utilizan influenciados por las características de la vía y la normativa de circulación vehicular.

Figura 17

Emisión Promedio por categoría vehicular de PM10 en una Resolución Temporal Horario correspondientes a los días Típicos y Atípicos.

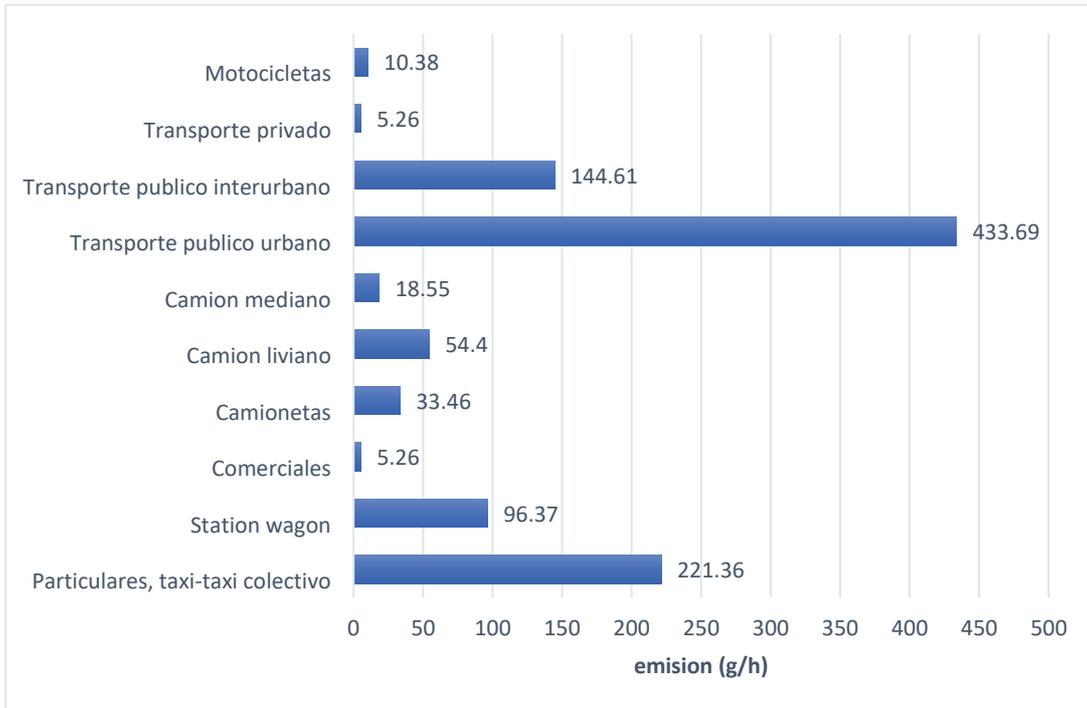
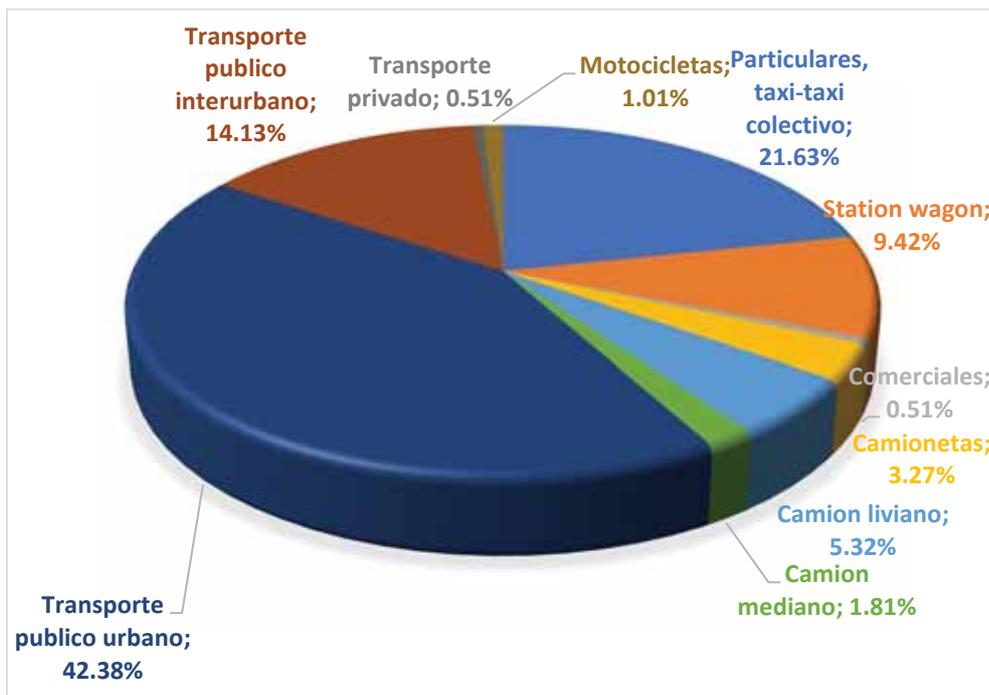


Figura 18

Porcentaje de Emisión PM10 por Categoría Vehicular



Por otra parte, se realizaron las estimaciones respecto al material particulado PM2.5. En la tabla 21 se muestra los resultados de PM2.5, emisión correspondiente a los días típicos y las tablas 22, 23 y 24 correspondientes a los atípicos.

De acuerdo a la metodología descrita, se consideró que la relación de emisión por tubo de escape de PM2.5 respecto al PM10 sea del 0.99, por consiguiente, los resultados obtenidos son muy próximos entre sí, por otra parte, la resuspensión de polvo es independiente del flujo y peso vehicular. Se visualiza que el transporte urbano es el mayor contaminante en los días típicos y atípicos alcanzando un máximo de 365.10 g/h y alcanzado un mínimo 110.81 g/h el domingo, en segundo lugar, los vehículos particulares, taxi – taxi colectivo poseen un máximo de 133.22 g/h para los días típicos y 142 g/h correspondiente al día sábado, estas emisiones muestran que la mayor liberación de PM2.5 se dan los días sábados por el incremento del flujo vehicular y mayor actividad peatonal.

Tabla 21

Emisión vehicular horario de PM2.5 correspondiente a los días Lunes a Jueves

Considerados días Típicos

CATEGORÍA VEHICULAR	LUNES- JUEVES (Veh/h)	EMISIÓN POR TUBO (g/h)	RESUSPENSION (g/h)	EMISIÓN TOTAL (g/h)
Particulares, taxi-taxi colectivo	2050	131.81	1.41	133.22
Station wagon	98	92.62	0.23	92.85
Comerciales	33	2.12	0.17	2.29
Camionetas	98	6.30	0.50	6.80
Camión liviano	18	35.21	1.36	36.56
Camión mediano	7	10.92	0.53	11.45
Transporte público urbano	257	345.87	19.23	365.10
Transporte público interurbano	100	99.08	7.48	106.56
Transporte privado	5	4.95	0.76	5.72
Motocicletas	123	8.32	0.02	8.34

Tabla 22*Emisión vehicular PM2.5 Total Correspondiente al día Viernes designado como día Atípico*

CATEGORÍA VEHICULAR	VIERNES (Veh/h)	EMISIÓN POR TUBO (g/h)	RESUSPENSION (g/h)	EMISIÓN TOTAL (g/h)
Particulares, taxi-taxi colectivo	1950	125.38	1.34	126.72
Station wagon	89	84.12	0.21	84.33
Comerciales	33	2.12	0.17	2.29
Camionetas	411	26.43	2.09	28.52
Camión liviano	44	86.06	3.32	89.38
Camión mediano	14	21.85	1.06	22.91
Transporte público urbano	257	345.87	19.23	365.10
Transporte público interurbano	100	99.08	7.48	106.56
Transporte privado	0	0.00	0.00	0.00
Motocicletas	128	8.66	0.02	8.68

Tabla 23*Emisión vehicular PM2.5 Total Correspondiente al día Sábado designado como día Atípico*

CATEGORÍA VEHICULAR	SÁBADO (Veh/h)	EMISIÓN POR TUBO (g/h)	RESUSPENSION (g/h)	EMISIÓN TOTAL (g/h)
Particulares, taxi-taxi colectivo	2185	140.49	1.51	142.00
Station wagon	107	101.13	0.25	101.38
Comerciales	55	3.54	0.28	3.82
Camionetas	397	25.53	2.02	27.55
Camión liviano	38	74.32	2.87	77.19
Camión mediano	17	26.53	1.28	27.81
Transporte público urbano	257	345.87	19.23	365.10
Transporte público interurbano	100	99.08	7.48	106.56
Transporte privado	0	0.00	0.00	0.00
Motocicletas	101	6.84	0.02	6.85

Tabla 24*Emisión vehicular PM2.5 Total Correspondiente al día Domingo designado como día Atípico*

CATEGORÍA VEHICULAR	DOMINGO (Veh/h)	EMISIÓN POR TUBO (g/h)	RESUSPENSION (g/h)	EMISIÓN TOTAL (g/h)
Particulares, taxi-taxi colectivo	1179	75.81	0.81	76.62
Station wagon	79	74.66	0.19	74.85
Comerciales	10	0.64	0.05	0.69
Camionetas	263	16.91	1.34	18.25
Camión liviano	7	13.69	0.53	14.22
Camión mediano	3	4.68	0.23	4.91
Transporte público urbano	78	104.97	5.84	110.81
Transporte público interurbano	68	67.37	5.09	72.46
Transporte privado	0	0.00	0.00	0.00
Motocicletas	75	5.08	0.01	5.09

Tabla 25*Emisión Vehicular Promedio – Horario de PM2.5 Total dentro de una semana Normal*

CATEGORÍA VEHICULAR	TONELADAS	EMISIÓN POR TUBO (g/h)	RESUSPENSION (g/h)	EMISIÓN TOTAL (g/h)
Particulares, taxi-taxi colectivo	<2.5 ton	124.13	1.33	125.46
Station wagon	<2.5 ton	90.06	0.23	90.28
Comerciales	<3.5 ton	2.11	0.17	2.28
Camionetas	<3.5 ton	13.44	1.06	14.50
Camión liviano	<7.5 ton	44.98	1.74	46.72
Camión mediano	7.5-16 ton	13.82	0.67	14.49
Transporte público urbano	-	311.45	17.32	328.77
Transporte publico interurbano	-	94.55	7.14	101.69
Transporte privado	-	2.83	0.44	3.27
Motocicletas	convencional	7.70	0.02	7.71

La tabla 25 muestra la emisión vehicular promedio horario para PM2.5 cuya emisión total alcanza los 735.17 g/h. Las figuras 19 y 20 muestran la participación promedio horaria respecto a las emisiones siendo los máximos responsables de contaminación atmosférico el transporte público urbano y los vehículos

particulares, taxi – taxi colectivo liberando 328.77 g/h el cual representa el 36.54% del total y 125.46 g/h con el 17.07% respectivamente. El mayor contaminante de PM2.5 evaluado en Lima – COSAC I está vinculado al transporte público una participación del 49% (Deuman International & Walsh, 2005), estos resultados dan a entender que el mayor responsable de emisión de PM2.5 son pertenecientes a esta categoría vehicular. Por otra parte, los transportes privados y comerciales están vinculados a la categoría vehicular con menor emisión de PM2.5 con 3.27 g/h y 2.28 g/h representando el 0.44% y 0.31% respectivamente.

Figura 19

Emisión Vehicular de PM2.5 Promedio – Horario perteneciente a las diferentes categorías vehiculares

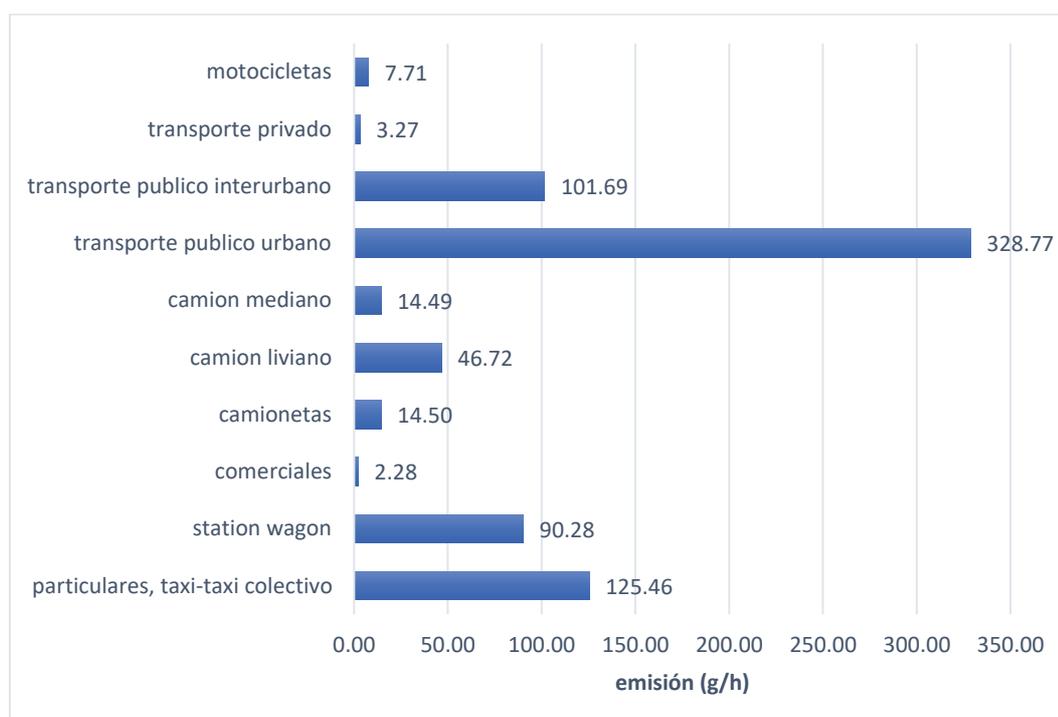
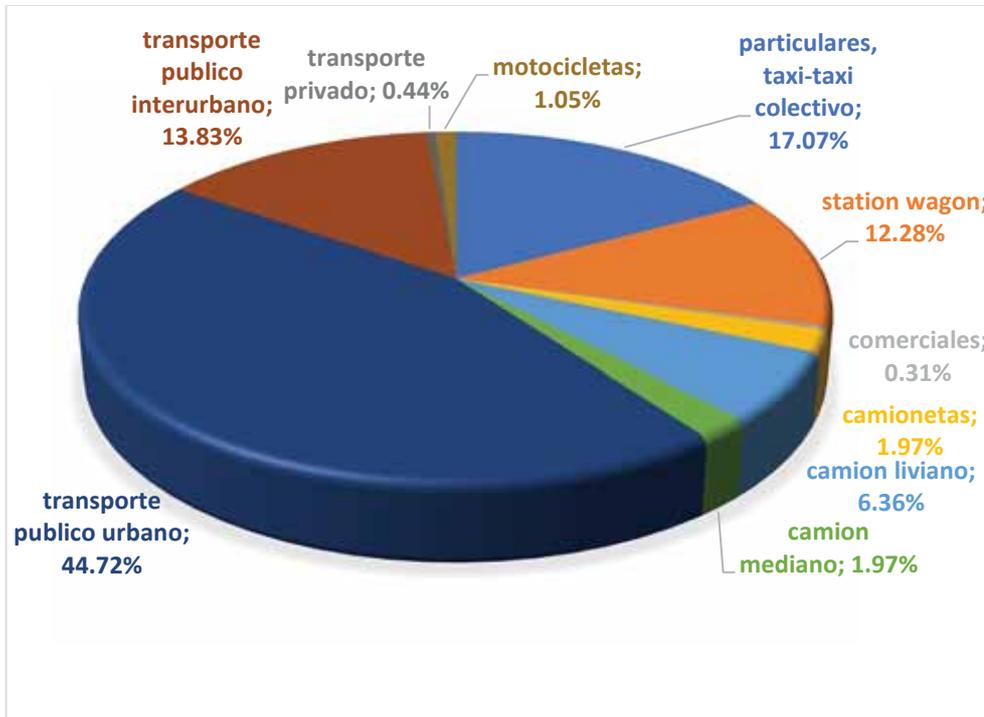


Figura 20

Porcentaje de Emisión de PM2.5 Promedio – Horario por Categoría Vehicular

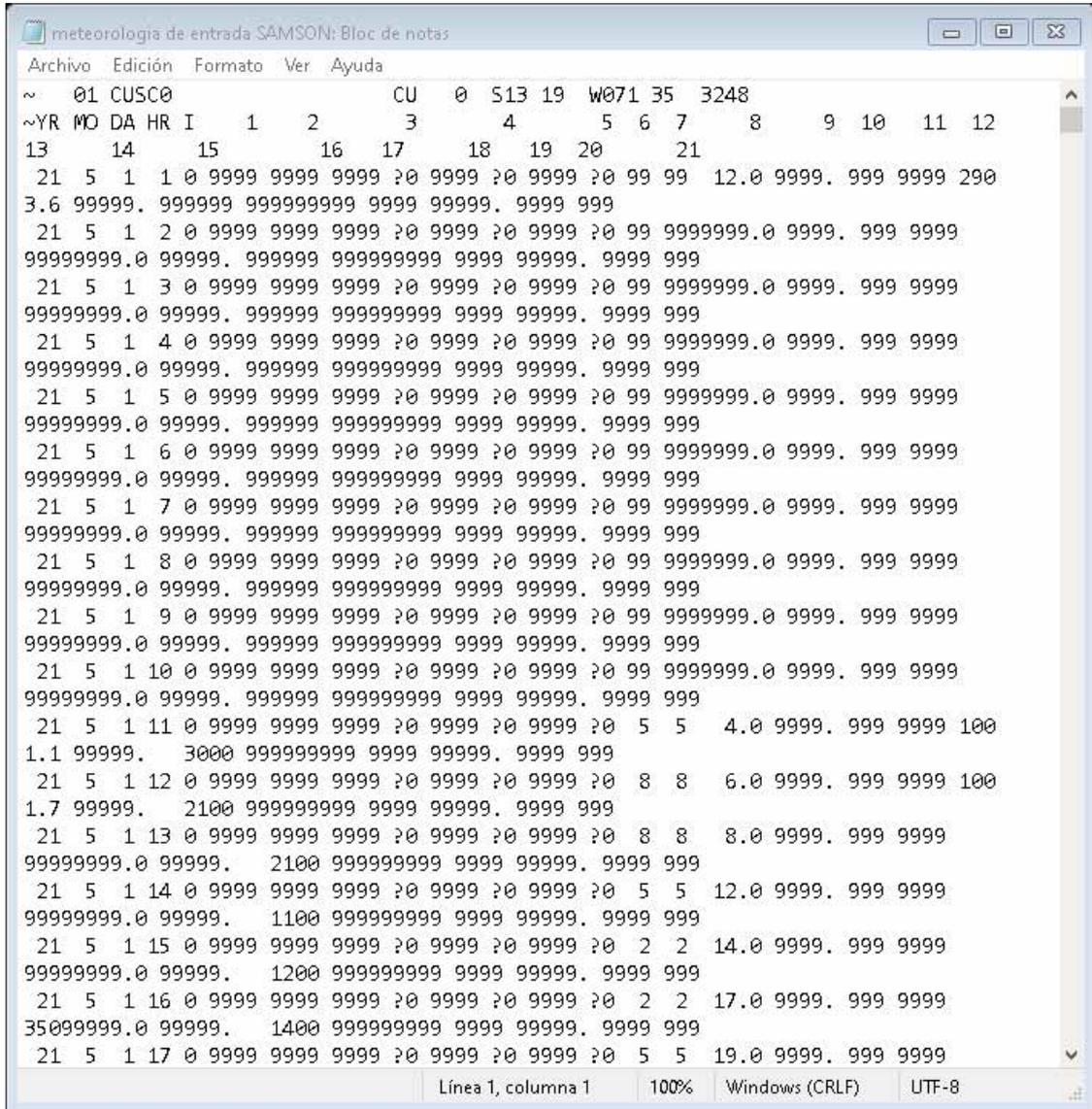


4.3 PROCESAMIENTO DE DATOS METEOROLÓGICOS

El procesamiento de datos meteorológicos se realizó a partir de la data meteorológica del aeropuerto Velasco Astete, los cuales fueron la temperatura, velocidad y dirección del viento, la nubosidad y su altura, cuyos valores se ordenaron en Excel de manera horaria para las 24 horas del día para luego ser transformados en formato SAMSON (figura 21) y ser alimentados al preprocesador AERMET.

Figura 21

Datos Procesados en Formato SAMSON, entrada para AERMOD



En la Figura 22 y 23 se muestran los resultados del preprocesamiento de datos meteorológicos por AERMET, parámetros superficiales como la velocidad de fricción superficial, velocidad convectiva, altura de mezcla, etc., en formato SFC y parámetros de perfil como la temperatura, velocidad y dirección del viento, etc., en formato PFL. Los resultados obtenidos son requisitos indispensables para la determinación de la dispersión de contaminantes PM10 y PM2.5

Figura 22

Parámetros Superficiales en formato SFC.

UA_ID:	SF_ID:	OS_ID:											
01	01	01											
VERSION: 14134 CCVR_Sub TEMP_Sub													
21	5	1	121	1	-999.0	-9.000	-9.000	-9.000	-999.	-999.	-99999.0	1.0000	4.00
1.00	3.60	290.0	10.0	285.1	2.0	0	0.00	999.	679.	99	NAD-SFC		
NoSubs													
21	5	1	121	2	-999.0	-9.000	-9.000	-9.000	-999.	-999.	-99999.0	1.0000	4.00
1.00	999.00	999.0	-9.0	999.0	-9.0	11	2.29	99.	999.	99	NAD		
NoSubs													
21	5	1	121	3	-999.0	-9.000	-9.000	-9.000	-999.	-999.	-99999.0	1.0000	4.00
1.00	999.00	999.0	-9.0	999.0	-9.0	11	2.29	99.	999.	99	NAD		
NoSubs													
21	5	1	121	4	-999.0	-9.000	-9.000	-9.000	-999.	-999.	-99999.0	1.0000	4.00
1.00	999.00	999.0	-9.0	999.0	-9.0	11	2.29	99.	999.	99	NAD		
NoSubs													
21	5	1	121	5	-999.0	-9.000	-9.000	-9.000	-999.	-999.	-99999.0	1.0000	4.00
1.00	999.00	999.0	-9.0	999.0	-9.0	11	2.29	99.	999.	99	NAD		
NoSubs													
21	5	1	121	6	-999.0	-9.000	-9.000	-9.000	-999.	-999.	-99999.0	1.0000	4.00
1.00	999.00	999.0	-9.0	999.0	-9.0	11	2.29	99.	999.	99	NAD		

Figura 23

Parámetros de perfil en formato PFL

UA_ID	SF_ID	OS_ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	5	1	1	10.0	1	290.0	3.60	12.00	99.00	99.00											
21	5	1	2	10.0	1	999.0	999.00	9999.90	99.00	99.00											
21	5	1	3	10.0	1	999.0	999.00	9999.90	99.00	99.00											
21	5	1	4	10.0	1	999.0	999.00	9999.90	99.00	99.00											
21	5	1	5	10.0	1	999.0	999.00	9999.90	99.00	99.00											
21	5	1	6	10.0	1	999.0	999.00	9999.90	99.00	99.00											
21	5	1	7	10.0	1	999.0	999.00	9999.90	99.00	99.00											
21	5	1	8	10.0	1	999.0	999.00	9999.90	99.00	99.00											
21	5	1	9	10.0	1	999.0	999.00	9999.90	99.00	99.00											
21	5	1	10	10.0	1	999.0	999.00	9999.90	99.00	99.00											
21	5	1	11	10.0	1	101.0	1.00	4.00	99.00	99.00											
21	5	1	12	10.0	1	98.0	1.50	6.00	99.00	99.00											
21	5	1	13	10.0	1	999.0	999.00	8.00	99.00	99.00											
21	5	1	14	10.0	1	999.0	999.00	12.00	99.00	99.00											
21	5	1	15	10.0	1	999.0	999.00	14.00	99.00	99.00											
21	5	1	16	10.0	1	999.0	999.00	17.00	99.00	99.00											
21	5	1	17	10.0	1	999.0	999.00	19.00	99.00	99.00											
21	5	1	18	10.0	1	999.0	999.00	20.00	99.00	99.00											
21	5	1	19	10.0	1	999.0	999.00	19.00	99.00	99.00											

4.4 DISPERSIÓN DE PM10 TOTAL

La modelización de dispersión de material particulado PM10 Total esta expresado en $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, se analizaron 231 puntos con esparcimientos espaciales de 500 m. La figura 24 muestra los resultados del modelado de PM10 Total correspondiente a una resolución temporal horaria (1h), cuyas representaciones de las concentraciones están delimitadas mediante iso líneas.

La formación de las isolíneas y la dirección de dispersión de PM10 está directamente influenciada por la velocidad y dirección del viento, los resultados de

dispersión muestran que el contaminante está siendo transportado paralela a las limitaciones de la cuenca atmosférica – Cusco, por los vientos provenientes del Sur – Este (SE) en dirección Nor – Oeste (NO) con velocidades mínimas de 0.5 m/s a 2.10 m/s y velocidades máximas de 5.7 m/s a 8.8 m/s. (Anexo 7).

La figura 24 muestra que las zonas de acceso peatonal de las 3 puertas principales de la UNSAAC (Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco) ubicadas en la Av. la Cultura y la sección de librerías ubicadas al frente de la universidad, se encuentran en el área de mayor influencia delimitado por el primer contorno 70 donde la concentración máxima alcanzada es de $79.39 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ (tabla 29) y un mínimo de $70 \mu\text{g}/\text{cm}^3$, el segundo contorno 70 se encuentra muy cerca del ministerio de relaciones exteriores alcanzando un máximo de $75.45 \mu\text{g}/\text{cm}^3$. Por otra parte, existen dos zonas entre los contornos 70 y 50, la primera zona está ubicado en el hospital regional y la dirección de salud cusco, entidades prestadoras de salud (EPS) y la universidad cuyas áreas alcanzan concentraciones de $50 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ a $70 \mu\text{g}/\text{cm}^3$, las mismas que son registradas en la segunda zona situado en Limacpampa siendo parte de esta influencia un centro escolar (Clorinda Matto de Turner). Las zonas de alta contaminación están próximas a la fuente de emisión caso contrario a lo evaluado por Espinoza. (2018) y Tatar et al., (2011) el cual es producto del tipo y altura de emisión.

Así mismo la figura 25 muestra la dispersión de PM10 para una resolución temporal diaria (24h) donde la dispersión del contaminante máximas fue zonificada de acuerdo a las prescritas con anterioridad (figura 24), de acuerdo a los resultados las concentraciones máximas alcanzadas fueron de $6.51 \mu\text{g}/\text{cm}^3$, seguidamente de $4.19 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ y $3.55 \mu\text{g}/\text{cm}^3$.

De acuerdo a los estándares nacionales de calidad ambiental D.S. 003-20017-MINAM, descritas en la tabla 2 las concentraciones de PM10 total (tabla 26) no excedieron los $100 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ para un periodo de 24 horas, es decir las concentraciones de dispersión estimadas no implican ningún problema sanitario como cardiovasculares, respiratorias, etc. Sin embargo, las presentes modelizaciones están en base a la emisión vehicular por parte de la Av. la Cultura – Cusco sin considerar las diferentes vías de circulación vehicular próximas a la zona de estudio, por consiguiente, el incremento de contaminante es indiscutible considerando estas vías de circulación vehicular.

Tabla 26

Primeros 3 Valores Altos de PM10 para un Periodo de 1 hora y 24 horas, Evaluado para la Emisión Total Vehicular

Periodo	Valores	UTM(x)-m	UTM(y)-m	µg/cm³
1 hora	1	179642.91	8503019.02	79.39
1 hora	2	178142.91	8503519.02	75.45
1 hora	3	180142.91	8503019.02	59.26
24 horas	1	179642.91	8503019.02	6.51
24 horas	2	178142.91	8503519.02	4.19
24 horas	3	180142.91	8503019.02	3.55

Figura 24

Dispersión de PM10 Total (1h) de la Av. La Cultura-Cusco

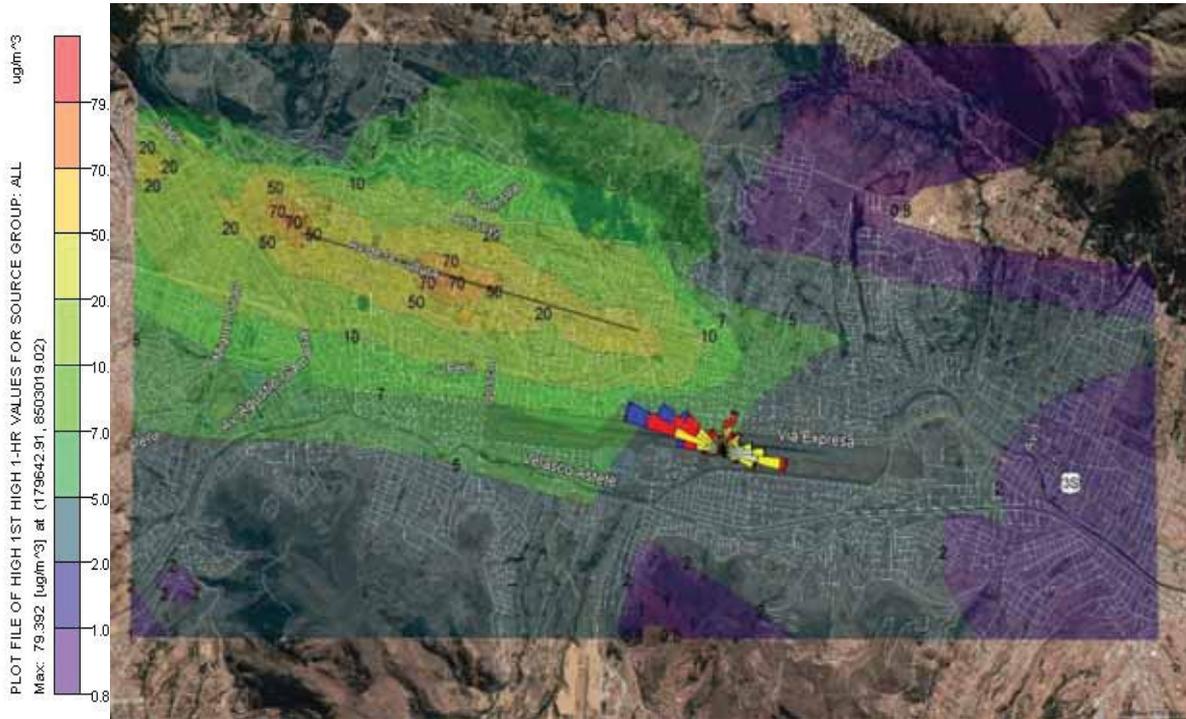
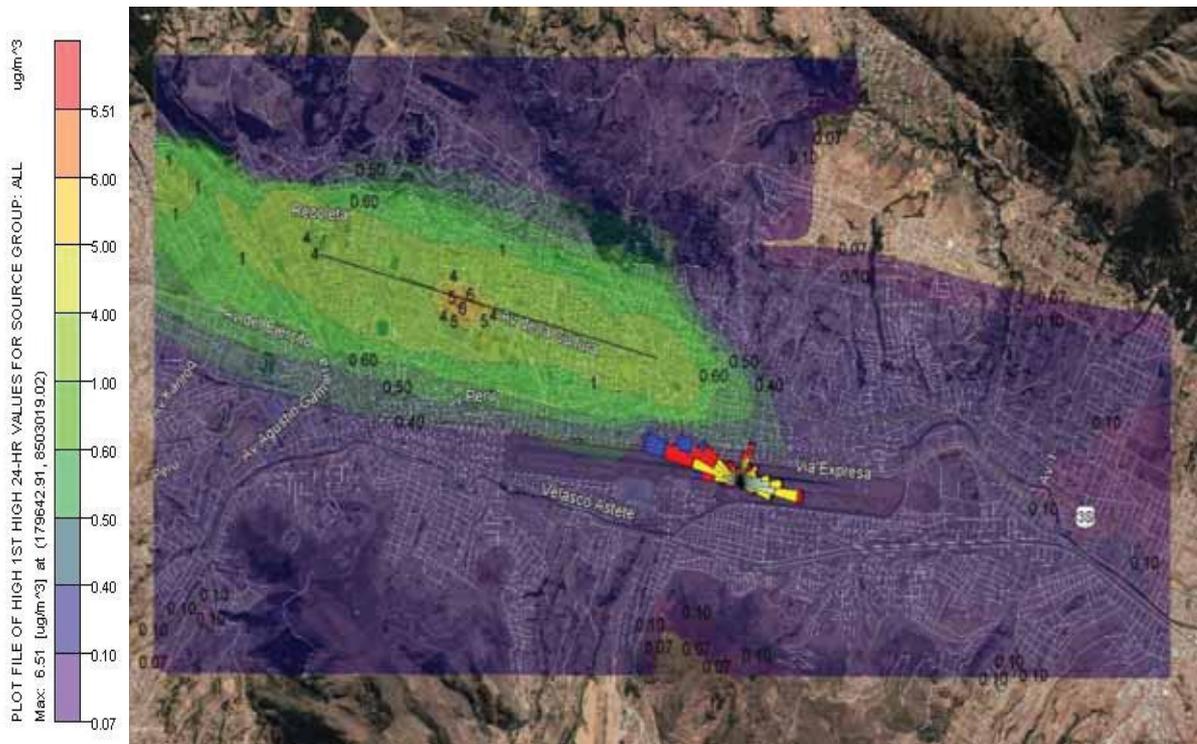


Figura 25

Dispersión de PM10 Total (24h) de la Av. La Cultura-Cusco



4.4.1 DISPERSIÓN DE PM10 POR TUBO DE ESCAPE

En la tabla 27 se aprecia los 3 primeros valores altos, resultados de la modelización de dispersión de PM10 (fig.26) y (fig.27) para un periodo de 1 hora y 24 horas correspondiente a la emisión por tubo de escape vehicular.

Las concentraciones máximas alcanzadas son de 55.25 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, seguidamente de 52.51 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ y 41.24 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ para un periodo de 1 hora, por otra parte, se obtuvo concentraciones máximas de 4.53 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, 2.92 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ y 2.47 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, evaluados para un periodo de 24 horas.

Los resultados máximos (tabla 27) para un periodo de 24 horas comparados con los Estándares de Calidad Ambiental del D.S. 003-2017-MINAM descrita en la Tabla 2 no exceden los 100 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$.

Tabla 27

Primeros 3 Valores Altos de PM10 para un Periodo de 1 hora y 24 horas, Evaluado para Emisión por Tubo de Escape

Periodo	Valores	UTM(x)-m	UTM(y)-m	$\mu\text{g}/\text{cm}^3$
1hora	1	179642.91	8503019.02	55.25
1hora	2	178142.91	8503519.02	52.51
1hora	3	180142.91	8503019.02	41.24
24 horas	1	179642.91	8503019.02	4.53
24 horas	2	178142.91	8503519.02	2.92
24 horas	3	180142.91	8503019.02	2.47

Figura 26

Dispersión de PM10 (1 h) de la Av. La Cultura-Cusco, emitido por tubo de escape vehicular.

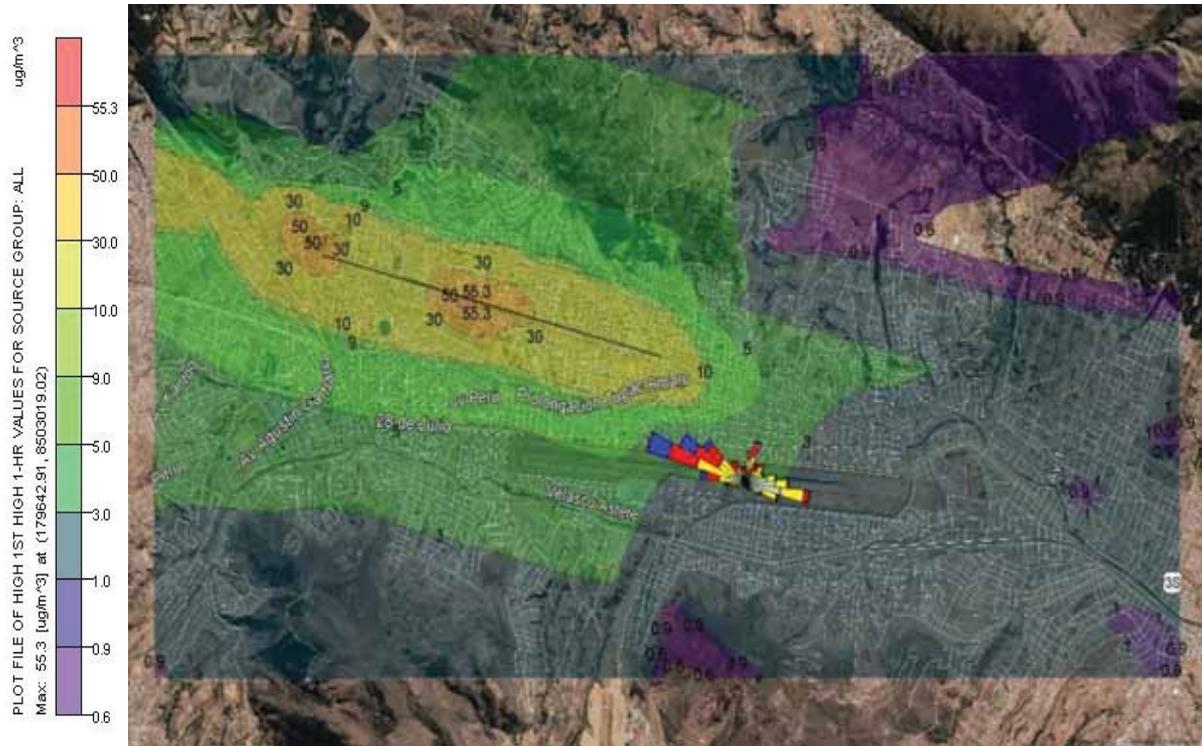
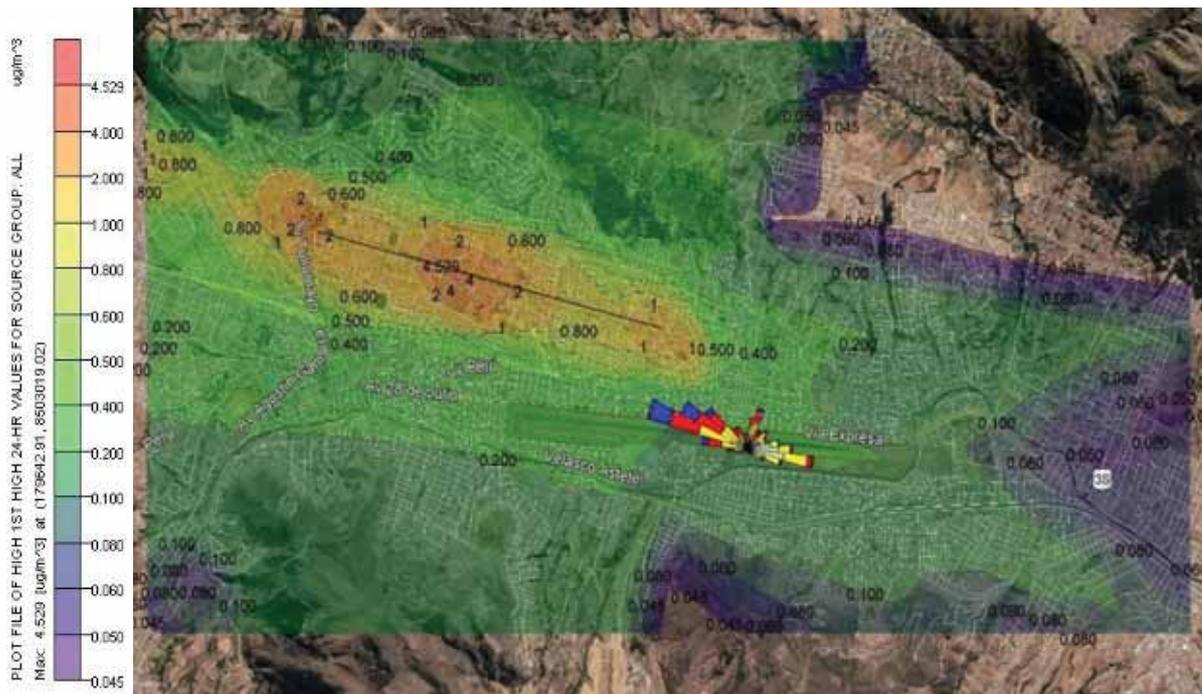


Figura 27

Dispersión de PM10 (24h) de la Av. La Cultura-Cusco, emitido por tubo de escape vehicular.



4.4.2 DISPERSIÓN DE PM10 POR DESGASTE

En la tabla 28 se aprecia los 3 primeros valores altos, resultados de la modelización de dispersión de PM10 por desgaste (neumáticos y frenos) (fig.28) y (fig.29) para un periodo de 1 hora y 24 horas.

Las concentraciones máximas alcanzadas son de 14.37 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, 13.66 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ y 10.73 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ para un periodo de 1 hora, por otra parte, se obtuvo concentraciones máximas de 1.18 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, seguidamente de 0.76 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ y 0.64 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, evaluados para un periodo de 24 horas.

Los resultados máximos (Tabla 28) para un periodo de 24 horas comparados con los Estándares de Calidad Ambiental del D.S. 003-2017-MINAM descrita en la Tabla 2 no exceden los 100 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$.

Tabla 28

Primeros 3 Valores Altos de PM10 para un Periodo de 1 hora y 24 horas, Evaluado para Emisión por Desgaste

Periodo	Valores	UTM(x)-m	UTM(y)-m	$\mu\text{g}/\text{cm}^3$
1hora	1	179642.91	8503019.02	14.37
1hora	2	178142.91	8503519.02	13.66
1hora	3	180142.91	8503019.02	10.73
24 horas	1	179642.91	8503019.02	1.18
24 horas	2	178142.91	8503519.02	0.76
24 horas	3	180142.91	8503019.02	0.64

Figura 28

Dispersión de PM10 (1h) de la Av. La Cultura-Cusco, Emitido por el Desgaste (Neumáticos y Frenos)

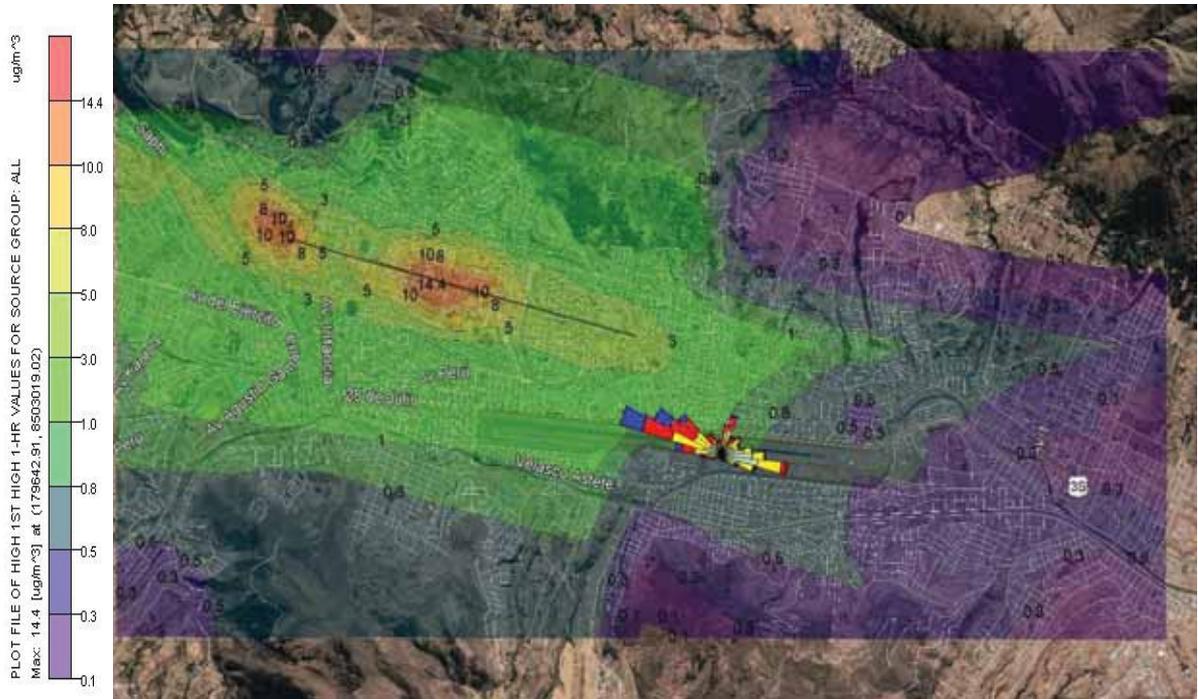
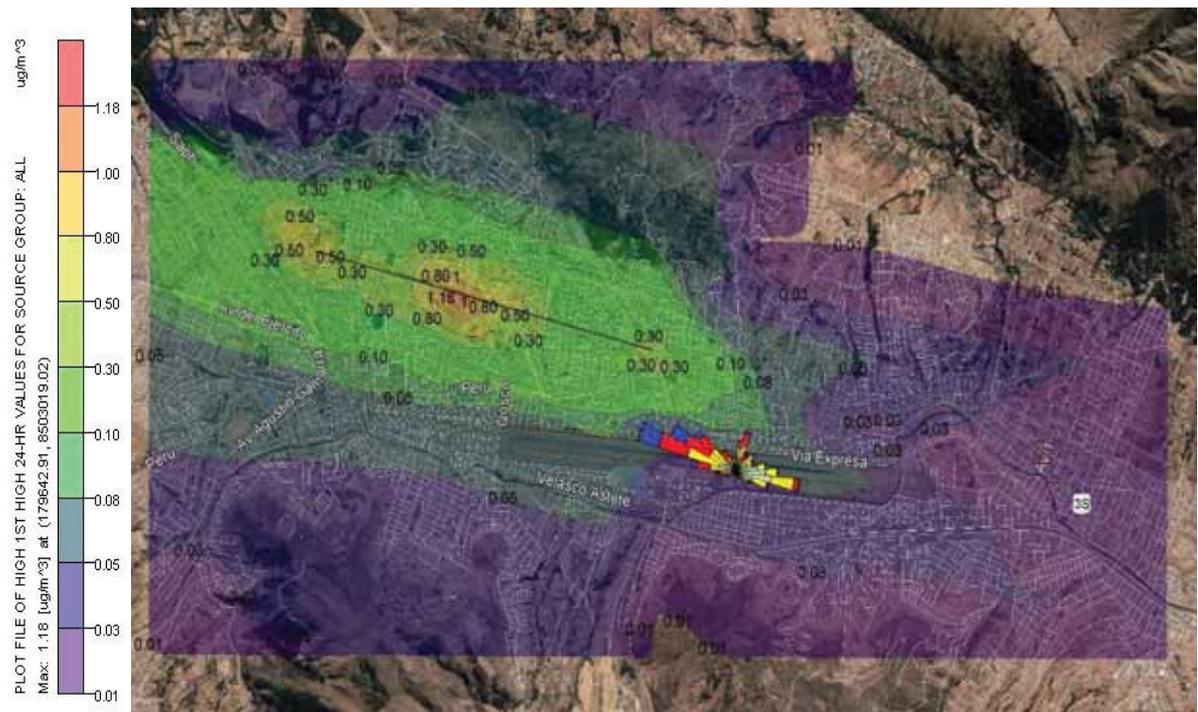


Figura 29

Dispersión de PM10 (24h) de la Av. La Cultura-Cusco, Emitido por el Desgaste (Neumáticos y Frenos)



4.4.3 DISPERSIÓN DE PM10 POR RESUSPENSIÓN DE POLVO

En la tabla 29 se aprecia los 3 primeros valores altos, resultados de la modelización de dispersión de PM10 por resuspensión de polvo (fig.30) y (fig.31) para un periodo de 1 hora y 24 horas respectivamente.

Las concentraciones máximas alcanzadas son de 9.76 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, 9.28 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ y 7.29 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ para un periodo de 1 hora, por otra parte, se obtuvo concentraciones máximas de 0.80 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, seguidamente de 0.52 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ y 0.44 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, evaluados para un periodo de 24 horas.

Los resultados máximos (Tabla 29) para un periodo de 24 horas comparados con los Estándares de Calidad Ambiental del D.S. 003-2017-MINAM descrita en la Tabla 2 no exceden los 100 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$.

Tabla 29

Primeros 3 Valores Altos de PM10 para un Periodo de 1 hora y 24 horas, Evaluado para la Resuspensión de Polvo

Periodo	Valores	UTM(x)-m	UTM(y)-m	$\mu\text{g}/\text{cm}^3$
1hora	1	179642.91	8503019.02	9.76
1hora	2	178142.91	8503519.02	9.28
1hora	3	180142.91	8503019.02	7.29
24 horas	1	179642.91	8503019.02	0.80
24 horas	2	178142.91	8503519.02	0.52
24 horas	3	180142.91	8503019.02	0.44

Figura 30

Dispersión de PM10 (1h) de la Av. La Cultura-Cusco, por Resuspensión de Polvos

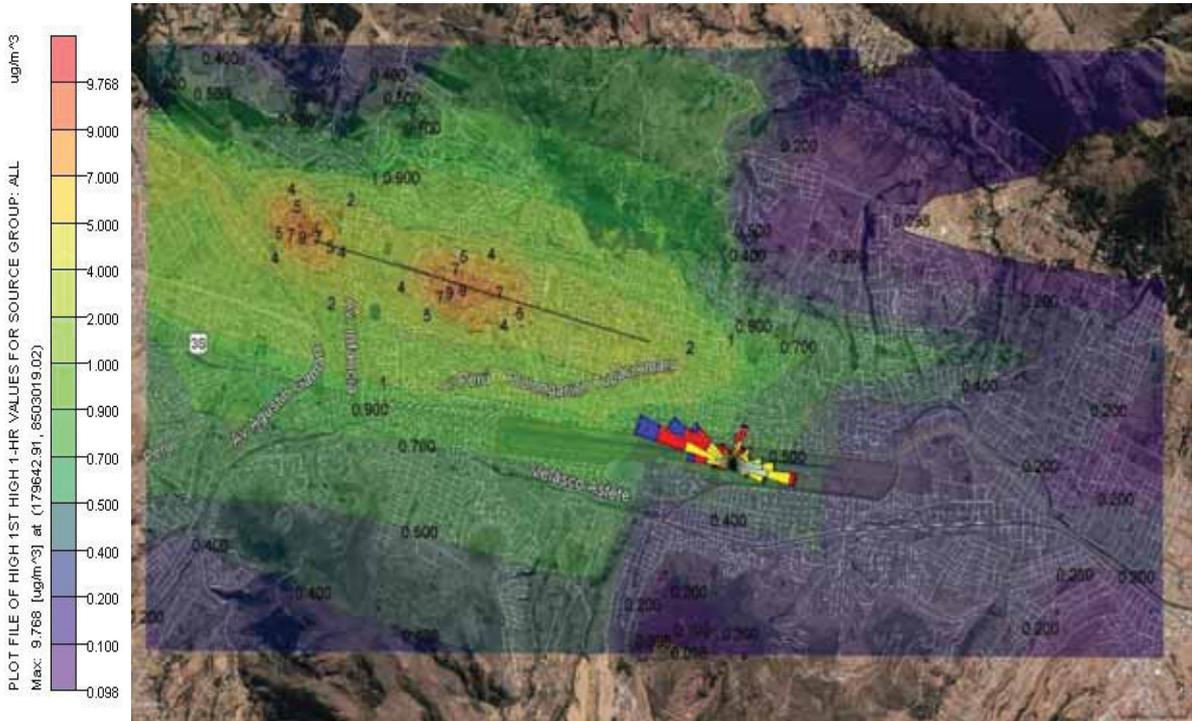
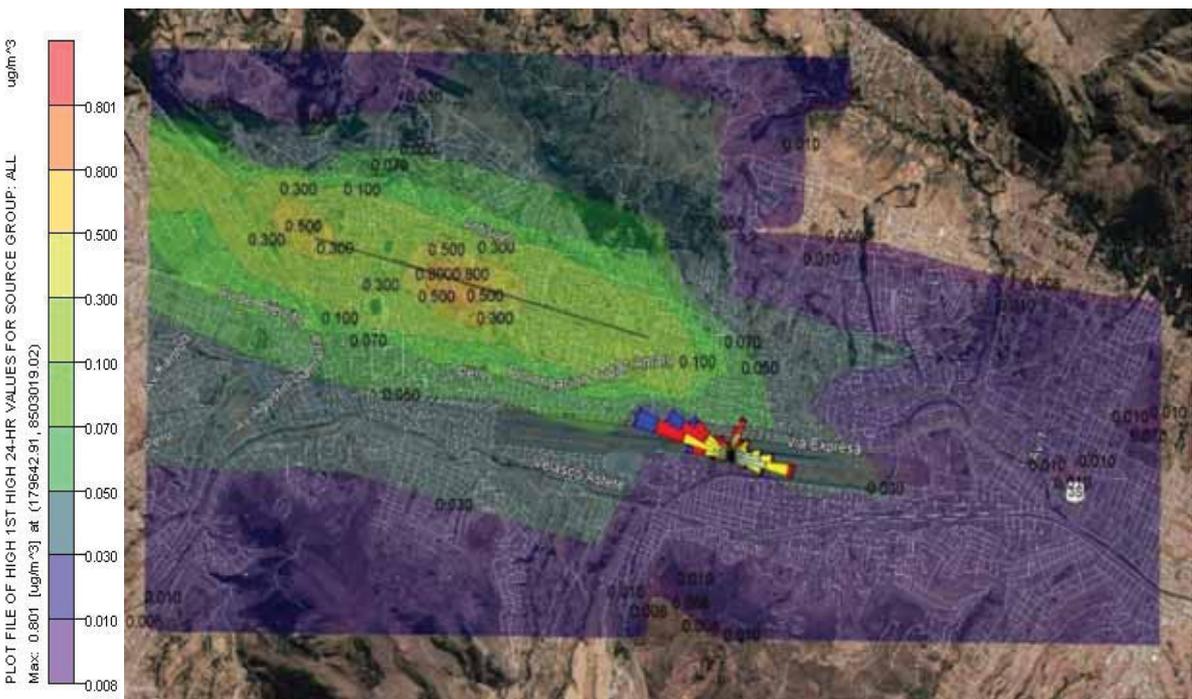


Figura 31

Dispersión de PM10 (24h) de la Av. La Cultura-Cusco, por Resuspensión de Polvos



4.5 DISPERSIÓN DE PM2.5 TOTAL

El modelado de dispersión de material particulado PM2.5 Total está expresado en $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, se analizaron 231 puntos con esparcimientos de 500 m. En la tabla 30 se aprecia los 3 primeros valores altos, resultados del modelado de dispersión de PM2.5 Total (fig.32) y (fig. 33) para un periodo de 1 hora y 24 horas respectivamente, así mismo las figuras de dispersión muestran las representaciones de las concentraciones limitadas mediante isolíneas.

Las concentraciones máximas alcanzadas son de $57.04 \mu\text{g}/\text{cm}^3$, $54.20 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ y $42.57 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ para un periodo de 1 hora, por otra parte, se obtuvo concentraciones máximas de $4.67 \mu\text{g}/\text{cm}^3$, seguidamente de $3.01 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ y $2.55 \mu\text{g}/\text{cm}^3$, evaluados para un periodo de 24 horas.

Las concentraciones máximas de PM2.5 están situados en los lugares descritos para PM10, debido a que el material particulado PM2.5 es parte de PM10, sin embargo, las concentraciones se encuentran en menor cantidad.

Los resultados máximos (Tabla 30) para un periodo de 24 horas comparados con los Estándares de Calidad Ambiental del D.S. 003-2017-MINAM descrita en la Tabla 2 no exceden los $100 \mu\text{g}/\text{cm}^3$.

Tabla 30

Primeros 3 Valores Altos de PM2.5 para un Periodo de 1 hora y 24 horas,

Evaluado para la Emisión Total Vehicular

Periodo	Valores	UTM(x)-m	UTM(y)-m	$\mu\text{g}/\text{cm}^3$
1hora	1	179642.91	8503019.02	57.04
1hora	2	178142.91	8503519.02	54.20
1hora	3	180142.91	8503019.02	42.57
24 horas	1	179642.91	8503019.02	4.67
24 horas	2	178142.91	8503519.02	3.01
24 horas	3	180142.91	8503019.02	2.55

Figura 32

Dispersión de PM2.5 Total (1h) de la Av. La Cultura-Cusco

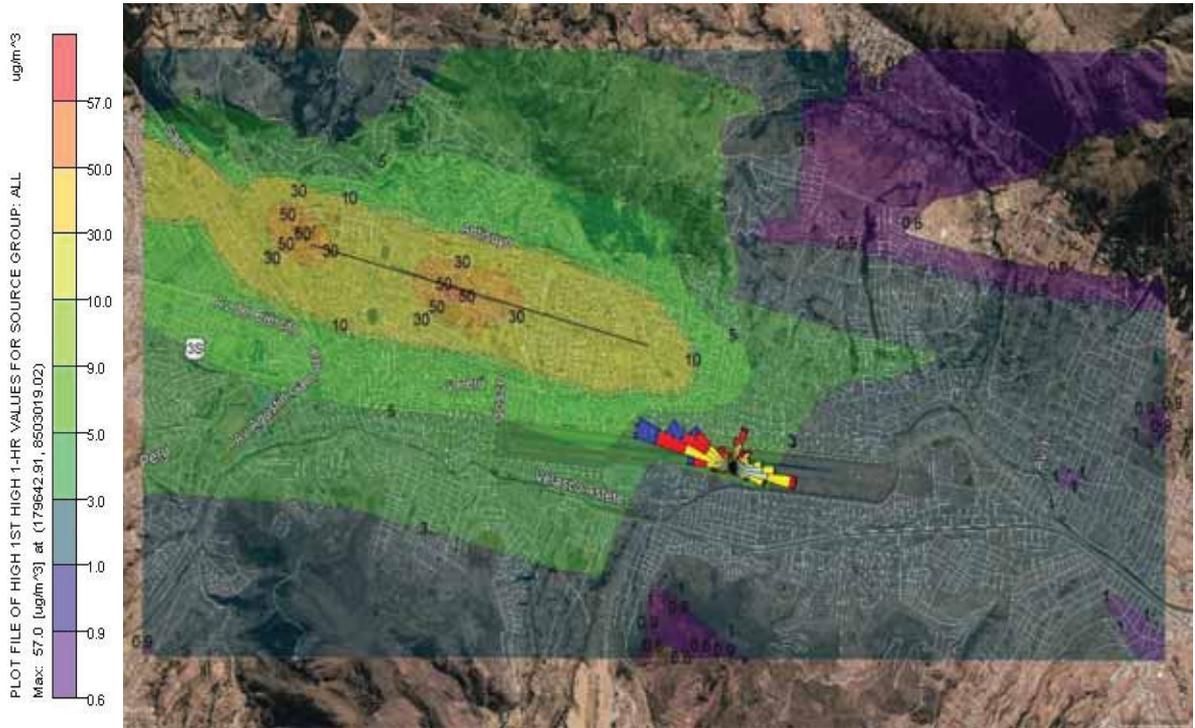
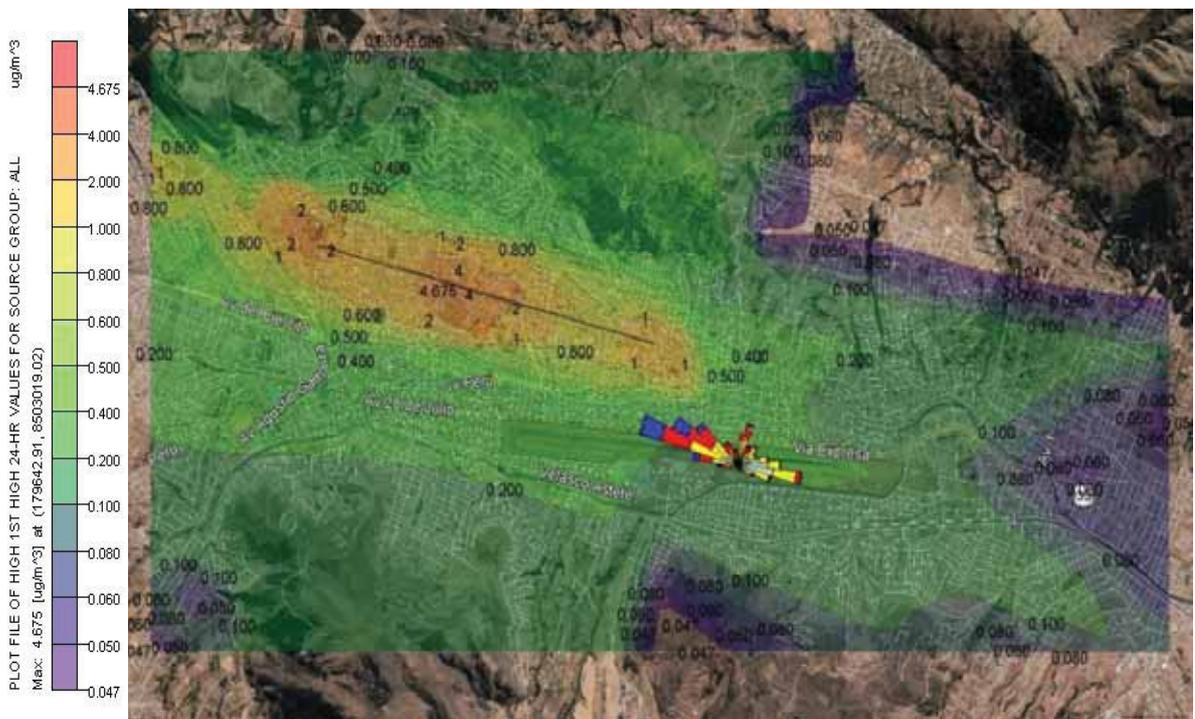


Figura 33

Dispersión de PM2.5 Total (24h) de la Av. La Cultura-Cusco



4.5.1 DISPERSIÓN DE PM2.5 POR TUBO DE ESCAPE

En la tabla 22 se aprecia los 3 primeros valores altos, resultados de la modelización de dispersión de PM2.5 (fig.34) y (fig.35) para un periodo de 1 hora y 24 horas correspondiente a la emisión por tubo de escape vehicular.

Las concentraciones máximas alcanzadas son de 54.70 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, seguidamente de 51.98 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ y 40.83 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ para un periodo de 1 hora, por otra parte, se obtuvo concentraciones máximas de 4.48 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, 2.88 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ y 2.44 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, evaluados para un periodo de 24 horas.

Los resultados máximos (tabla 31) para un periodo de 24 horas comparados con los Estándares de Calidad Ambiental del D.S. 003-2017-MINAM descrita en la Tabla 2 no exceden los 100 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$.

Tabla 31

Primeros 3 Valores Altos de PM2.5 para un Periodo de 1 hora y 24 horas, Evaluado para la Emisión por Tubo de Escape

Periodo	Valores	UTM(x)-m	UTM(y)-m	$\mu\text{g}/\text{cm}^3$
1hora	1	179642.91	8503019.02	54.70
1hora	2	178142.91	8503519.02	51.98
1hora	3	180142.91	8503019.02	40.83
24 horas	1	179642.91	8503019.02	4.48
24 horas	2	178142.91	8503519.02	2.88
24 horas	3	180142.91	8503019.02	2.44

Figura 34

Dispersión de PM2.5 (1h) de la Av. La Cultura Cusco, Emitido por Tubo de Escape Vehicular

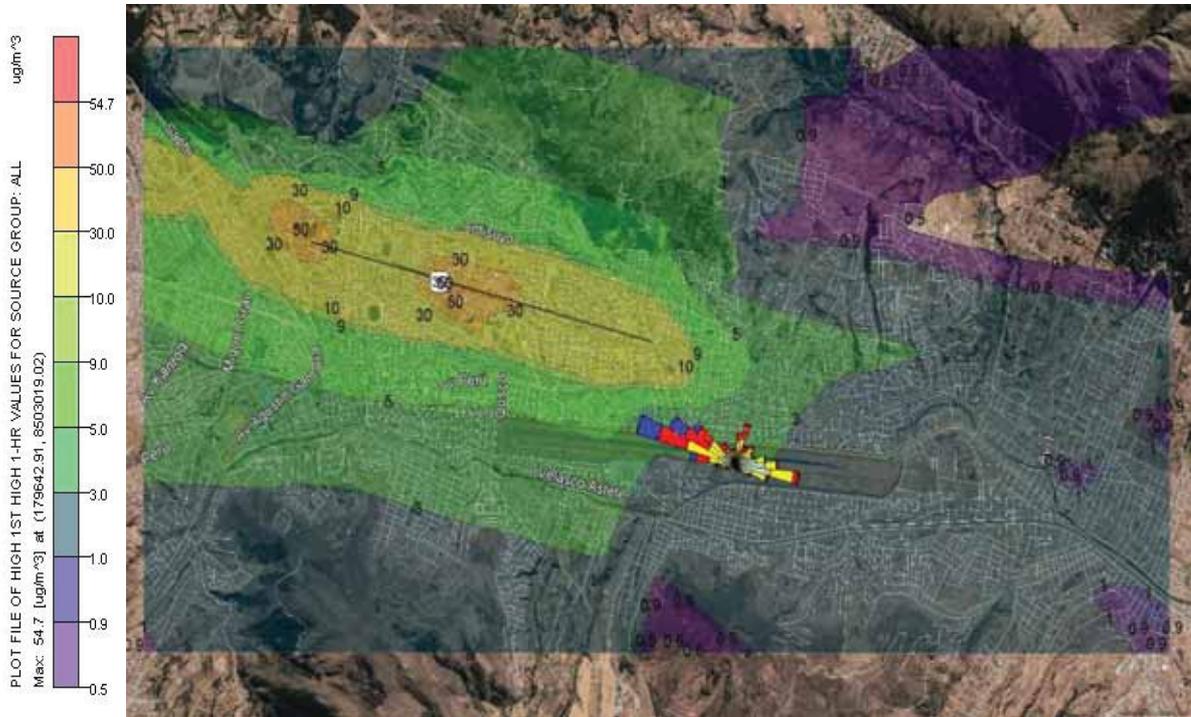
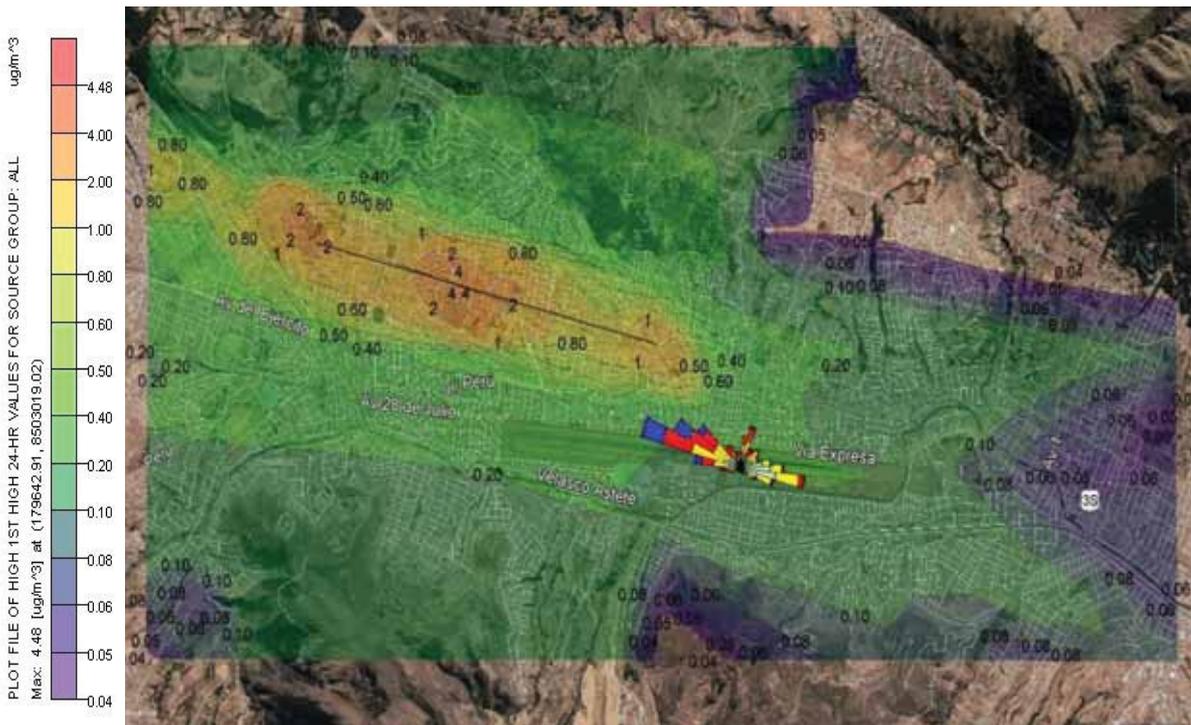


Figura 35

Dispersión de PM2.5 (24h) de la Av. La Cultura Cusco, Emitido por Tubo de Escape Vehicular



4.5.2 DISPERSIÓN DE PM2.5 POR RESUSPENSIÓN DE POLVO

En la tabla 32 se aprecia los 3 primeros valores altos, resultados de la modelización de dispersión de PM2.5 por resuspensión de polvo (fig.36) y (fig.37) para un periodo de 1 hora y 24 horas respectivamente.

Las concentraciones máximas alcanzadas son de 2.34 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, 2.22 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ y 1.74 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ para un periodo de 1 hora, por otra parte, se obtuvo concentraciones máximas de 0.19 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, seguidamente de 0.12 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ y 0.10 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, evaluados para un periodo de 24 horas.

Los resultados máximos (Tabla 32) para un periodo de 24 horas comparados con los Estándares de Calidad Ambiental del D.S. 003-2017-MINAM descrita en la Tabla 2 no exceden los 100 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$.

Tabla 32

Primeros 3 Valores Altos de PM2.5 para un Periodo de 1 hora y 24 horas, Evaluado para la Resuspensión de Polvo.

Periodo	Valores	UTM(x)-m	UTM(y)-m	$\mu\text{g}/\text{cm}^3$
1 hora	1	179642.91	8503019.02	2.34
1 hora	2	178142.91	8503519.02	2.22
1 hora	3	180142.91	8503019.02	1.74
24 horas	1	179642.91	8503019.02	0.19
24 horas	2	178142.91	8503519.02	0.12
24 horas	3	180142.91	8503019.02	0.10

Figura 36

Dispersión de PM2.5 (1h) de la Av. La Cultura Cusco, por Resuspensión de Polvo.

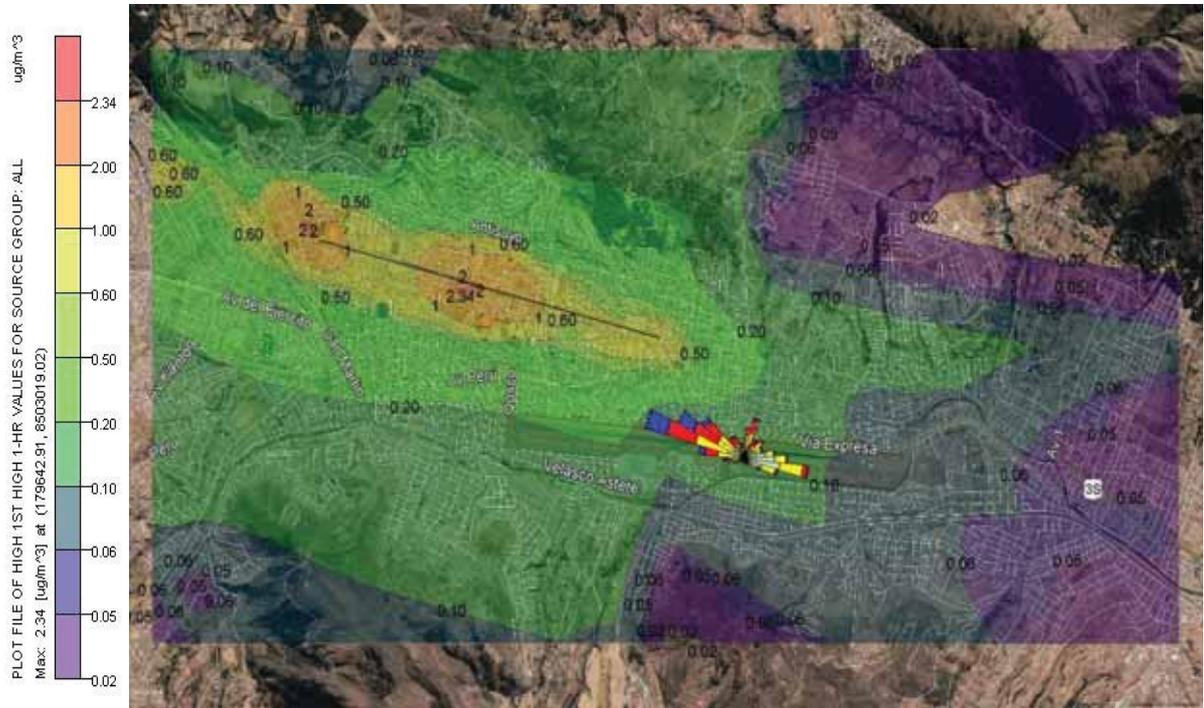
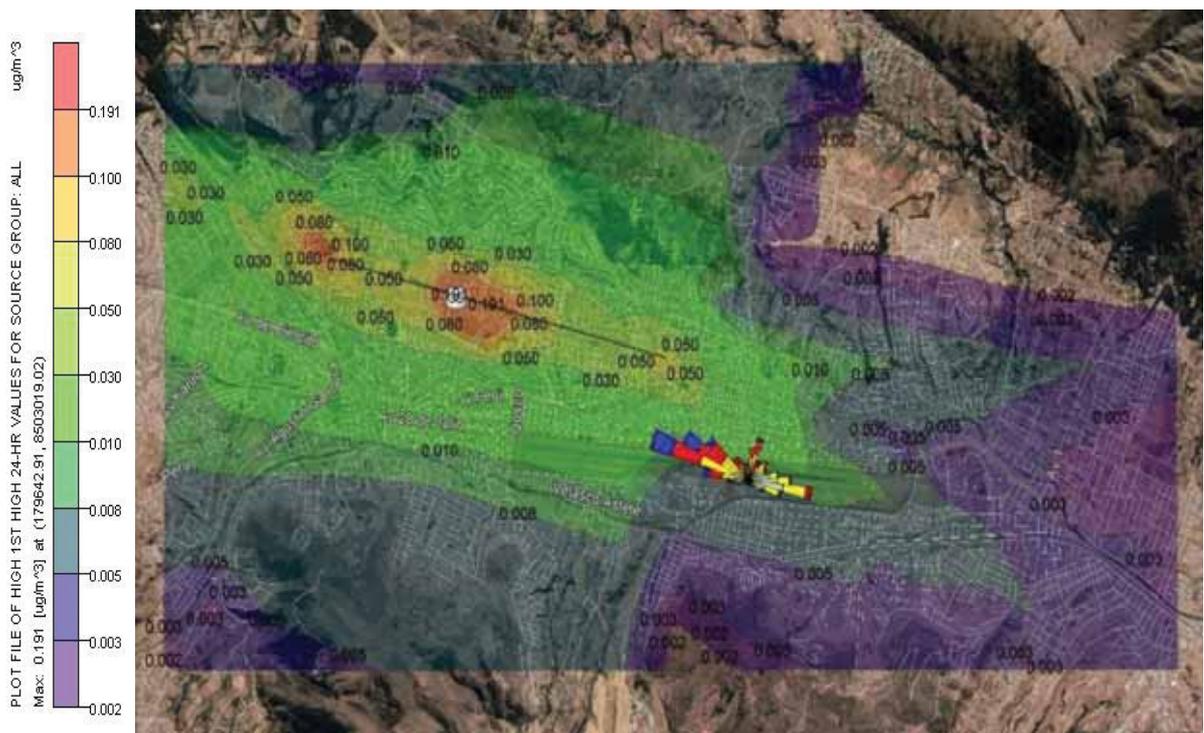


Figura 37

Dispersión de PM2.5 (24h) de la Av. La Cultura Cusco, por Resuspensión de Polvo.



4.6 DISPERSIÓN DE PM10 Y PM2.5 EN DÍAS TÍPICOS Y ATÍPICOS

El anexo 1 muestra figuras de dispersión de PM10 (fig. 38 y fig. 39) y PM2.5 (fig. 40 y fig. 41) en una resolución temporal horario y diario perteneciente a lunes – jueves, días típicos, los resultados señalan que la máxima concentración alcanzada de PM10 es de $82.6 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ y $6.77 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ para 1 hora y 24 horas respectivamente, así mismo se tiene $59.7 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ y $4.88 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ de PM2.5 para 1 hora y 24 horas respectivamente,

Por otra parte, se tienen los resultados concernientes a los días atípicos – Anexo 2, 3, y 4 días viernes (fig. 42 – fig.45), sábado (fig. 46 – fig.49), y domingo (fig. 50 – fig.53), respectivamente los cuales muestran las figuras de dispersión de PM10 y PM2.5, como era de esperarse las concentraciones máximas alcanzadas se dieron los días sábados, día atípico en la cual el flujo vehicular se incrementa, alcanzando emisiones de PM10 máximas de $92.9 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ y $7.61 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ para 1 hora y 24 horas respectivamente, así mismo $66.6 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ y $5.46 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ de PM2.5 para 1 hora y 24 horas respectivamente. Por otra parte, las concentraciones mínimas estimadas se dieron los días domingos con concentraciones máximas de PM10 de $41.7 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ y $3.42 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ y de PM2.5 $29.3 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ y $2.4 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ para 1 hora y 24 horas respectivamente.

Los resultados máximos de PM10 y PM2.5 de los días típicos y atípicos evaluados para el periodo de 24 horas no excedieron los estándares de Calidad Ambiental del D.S. 003-2017-MINAM descrita en la Tabla 2 los cuales son $100 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ y $50 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ respectivamente.

4.7 ESCENARIOS DE DISPERSIÓN DE PM10 Y PM2.5

4.7.1 DISPERSIÓN DE PM10 Y PM2.5 SIN PARTICIPACIÓN DE VEHÍCULOS PARTICULARES, TAXI – TAXI COLECTIVO.

Los resultados de dispersión de PM10 (fig. 54 y fig.55) – Anexo 5, muestran que la ausencia de vehículos particulares, taxi – taxi colectivo provocaron una disminución en $17.19 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ y $1.41 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ respecto a PM10 Total (fig. 24 y fig. 25) para 1 hora y 24 horas respectivamente, así mismo para PM2.5 (fig.56 y fig. 57) se presentó una disminución de $9.94 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ y $0.79 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ para 1 hora y 24 horas respectivamente respecto a PM2.5 Total (fig. 32 y fig.33).

4.7.2 DISPERSIÓN DE PM10 Y PM2.5 CON AUSENCIA DEL TRANSPORTE PÚBLICO URBANO.

Los resultados de dispersión de PM10 (fig. 58 y fig.59) – Anexo 6, muestran que la ausencia del transporte público urbano, provocaron una disminución de la concentración en $33.64 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ y $2.76 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ del PM10 Total (fig. 24 y fig. 25) para 1 hora y 24 horas respectivamente, así mismo para PM2.5 (fig. 60 y fig.61), las concentraciones disminuyeron en $25.54 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ y $2.09 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ para 1 hora y 24 horas respectivamente respecto a PM2.5 Total (fig. 32 y fig.33).

De acuerdo a los dos escenarios de dispersión de PM10 y PM2.5, los resultados muestran la reducción significativa de los contaminantes atmosféricos por la ausencia del transporte público urbano siendo la reducción en 1.95 frente a los vehículos particulares, taxi – taxi colectivo, ratificando que el mayor contribuyente de contaminación de PM10 y PM2.5 es el transporte público urbano (Deuman International & Walsh, 2005), sin embargo la ausencia de cualquier categoría vehicular o simplemente la disminución del flujo vehicular implicaría una reducción de los contaminantes atmosféricos a los alrededores de la fuente lineal de emisión (Av. la Cultura – Cusco) , este efecto implicaría una reducción en el número de personas que consultan por problemas respiratorios (Gaviria, Benavides, & Tangarife, 2011), principalmente las personas que se encuentran con frecuencia dentro de las zonas de niveles significativos de contaminación los cuales son los estudiantes , docentes , administrativos, etc., de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, médicos, enfermeras, etc., del Hospital Regional Antonio Lorena y centros médicos privados agravando enfermedades cardio respiratorios provocando muertes prematuras.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIÓN

- El flujo vehicular circulante en la Av. la cultura fue de 2789 vehículos por hora para los días lunes – jueves, seguidamente de 3026 vehículos por hora para el día viernes, así mismo la mayor afluencia vehicular fue el día sábado con 3257 vehículos por hora y por último se obtuvo el menor flujo vehicular el día domingo con 1762 vehículos por hora, teniendo un flujo vehicular total de 10834 vehículos por semana para una hora.
- La mayor participación del flujo vehicular circulante por la Av. La cultura corresponde a los vehículos particulares, taxi, taxi – colectivo con el 70.38%, seguidamente del transporte público urbano con el 8.44%.
- La emisión total estimada para el flujo vehicular circulante fue de 1023.32 g/h y 735.17 g/h para PM10 y PM2.5 respectivamente en una resolución temporal horaria
- La modelización de la dispersión de contaminantes PM10 y PM2.5, muestran que los contaminantes son transportados por los vientos provenientes de SE en dirección NO con velocidades mínimas de 0.5 m/s a 2.10 m/s y velocidades máximas de 5.7 m/s a 8.8 m/s.
- La modelización de dispersión muestra valores máximos de concentración de 79.39 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ y 6.51 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ para el periodo de 1 hora y 24 horas respectivamente evaluados para PM10, por otra parte, se alcanzaron concentraciones máximas de 57.04 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ y 4.67 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ respecto a PM2.5, para 1 hora y 24 horas respectivamente.
- La evaluación diaria de PM10 y PM2.5, mostraron que la concentración máxima y mínima alcanzada se dio el sábado respectivamente los cuales son producto del incremento y disminución del flujo vehicular vinculados a la demanda del transporte vehicular y flujo peatonal.
- La concentración por ausencia del transporte público urbano en comparación con los vehículos particulares, taxi – taxi colectivo es 1.95 veces para PM10 y PM2.5.
- Los resultados de dispersión máxima de contaminantes atmosféricos para un periodo de 24 horas de PM10 y PM2.5 fueron de 6.51 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ y 4.67 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ respectivamente los cuales no excedieron los estándares de calidad ambiental de

100 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ y 50 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ para PM10 y PM2.5 respectivamente establecido por D.S. 003-2017-MINAM

- La zona con mayor influencia de contaminación de PM10 y PM2.5 está ubicado por la Universidad Nacional de San Antonio Abada del Cusco y alrededores, seguidamente del hospital Regional y por último los alrededores de Limacpampa.

CAPÍTULO VI

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda fortalecer el fácil acceso a las informaciones públicas puesto que limitan las investigaciones.
- No existen factores de emisión vehicular adecuados a nuestra realidad local, por consiguiente, se recomienda realizar una investigación para determinar los factores de emisión propios del entorno el cual ayudaría a estimar las emisiones vehiculares muy próximas a la realidad.
- Se recomienda utilizar periodos prolongados de data meteorológica superior a 1 año de información.
- Se recomienda evaluar la dispersión de contaminantes atmosféricos para tiempos prolongados y realizar una correlación.
- Para futuros estudios se recomienda utilizar herramientas de modelización que incluyan todas las principales de la ciudad del Cusco considerando la variabilidad meteorológica de todo el dominio de la cuenca atmosférica de la ciudad.
- Actualmente existe una deficiencia en gestión ambiental - urbano, es así que se recomienda la utilización de modelos de dispersión para la toma de decisiones en la planificación del crecimiento y ordenamiento urbano.

ANEXOS

Anexo 1: Dispersión de PM10 y PM2.5 Horaria (1h) y Diaria (24h) para Días Lunes – jueves a través de la Av. La Cultura – Cusco.

Figura 38: Dispersión de PM10 – Horaria (1h) para los días Lunes - Jueves

Figura 39: Dispersión de PM10 – Diaria (24 h) para los días Lunes - Jueves

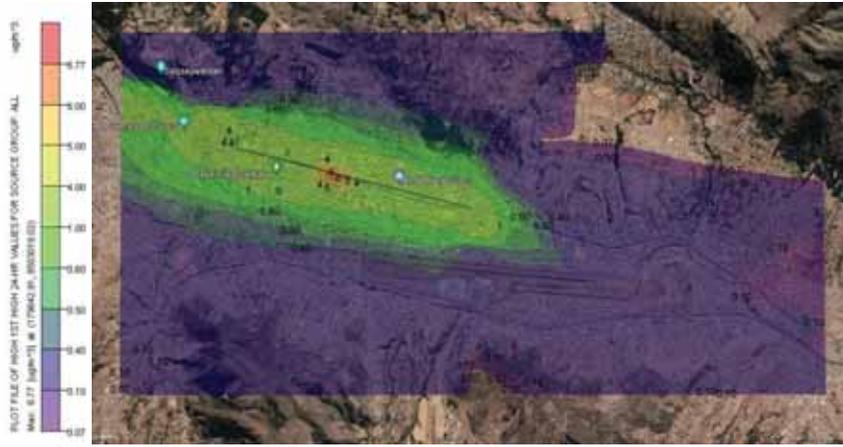
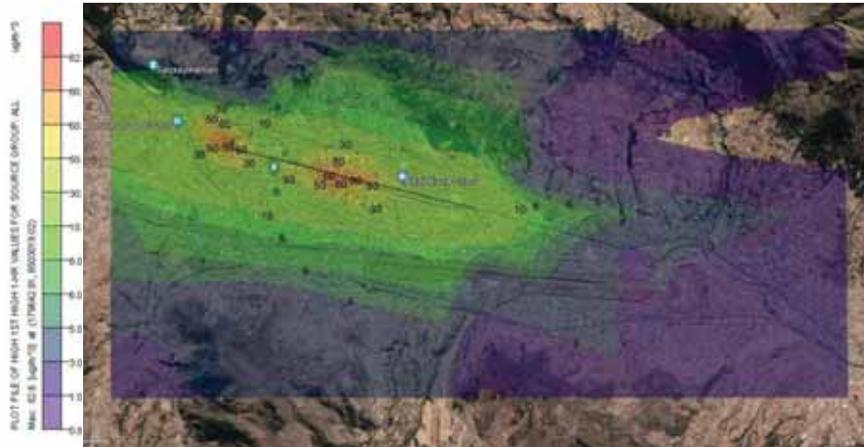
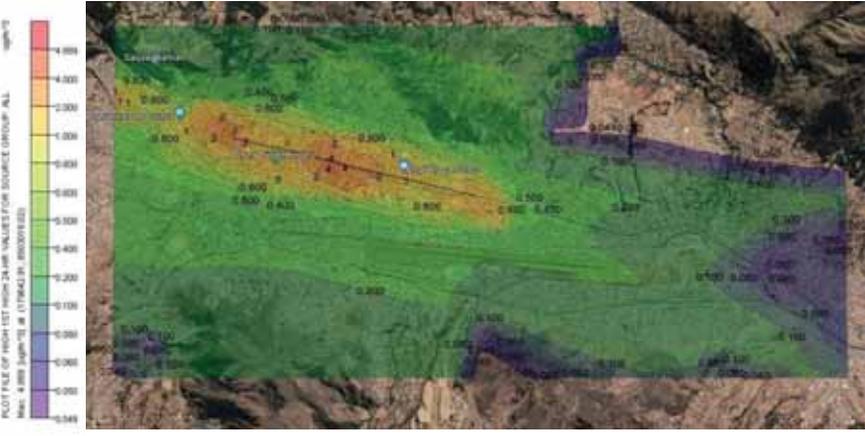
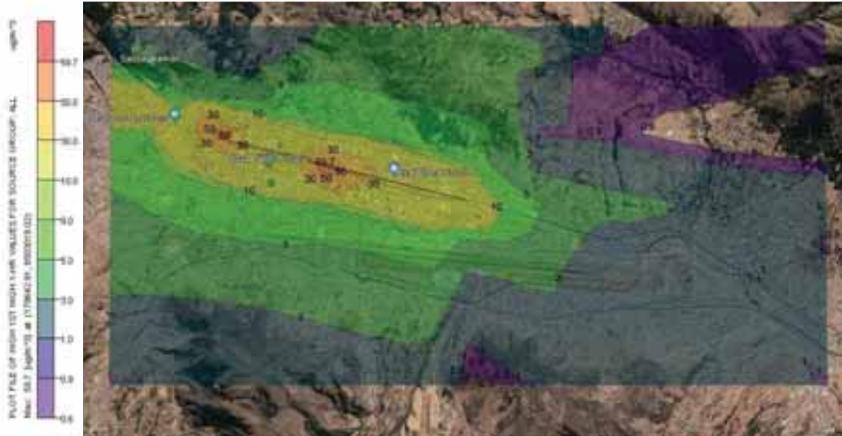


Figura 40: Dispersión de PM2.5 – Horaria (1h) para los días Lunes - Jueves

Figura 41: Dispersión de PM2.5 – Diario (24h) para los días Lunes - Jueves



Anexo 2: Dispersión de PM10 y PM2.5 5 Horaria (1h) y Diaria (24h) para viernes a través de la Av. La Cultura – Cusco.

Figura 42: Dispersión de PM10 – Horaria (1h) para los días Viernes

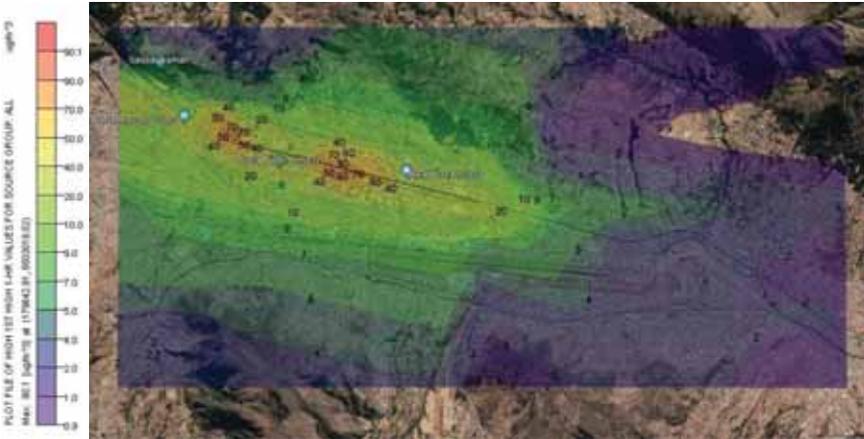


Figura 43: Dispersión de PM10 – Diaria (24h) para los días Viernes

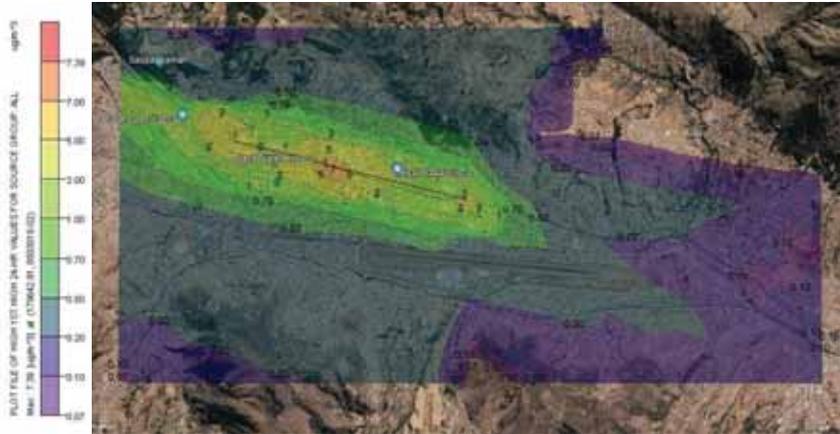


Figura 44: Dispersión de PM2.5 – Horaria (1h) para los días Viernes

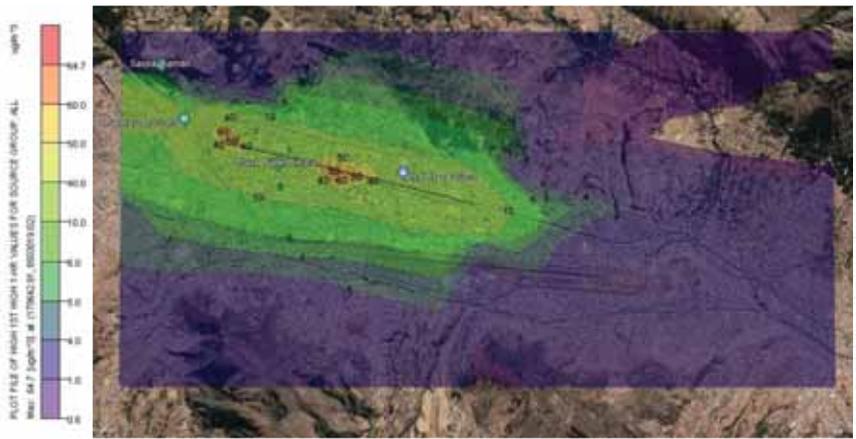
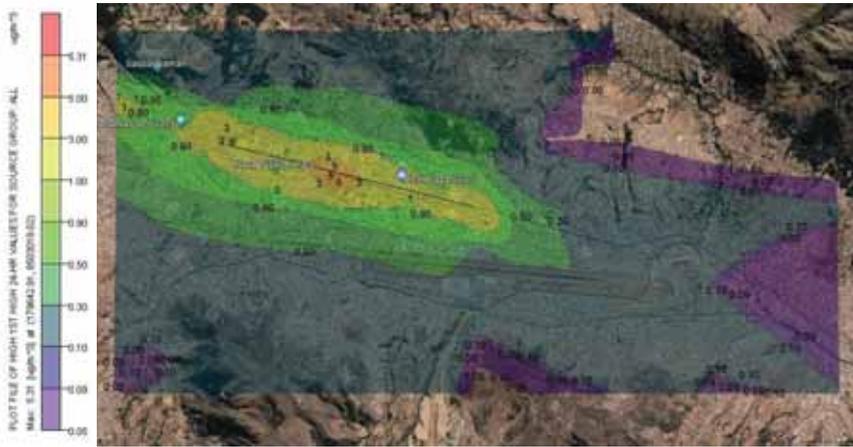


Figura 45: Dispersión de PM2.5 – Diario (24h) para los días Viernes



Anexo 3: Dispersión de PM10 y PM2.5 5 Horaria (1h) y Diaria (24h) para sábado a través de la Av. La Cultura – Cusco

Figura 46: Dispersión de PM10 – Horario (1h) para los días Sábados

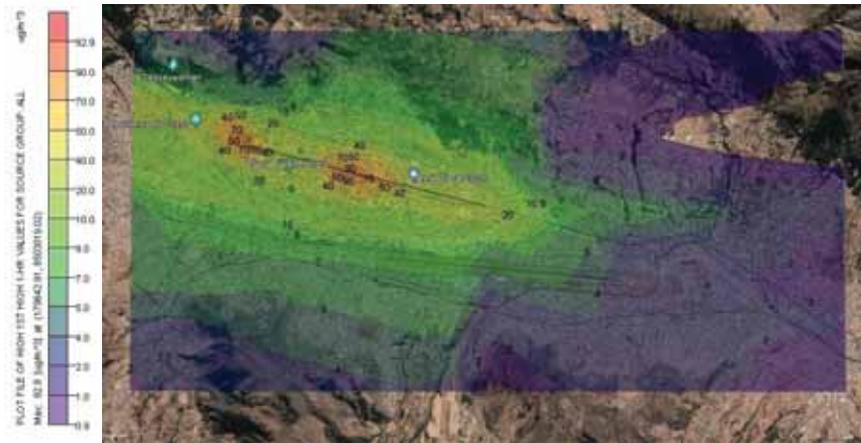


Figura 47: Dispersión de PM10 – Diario (24h) para los días Sábados

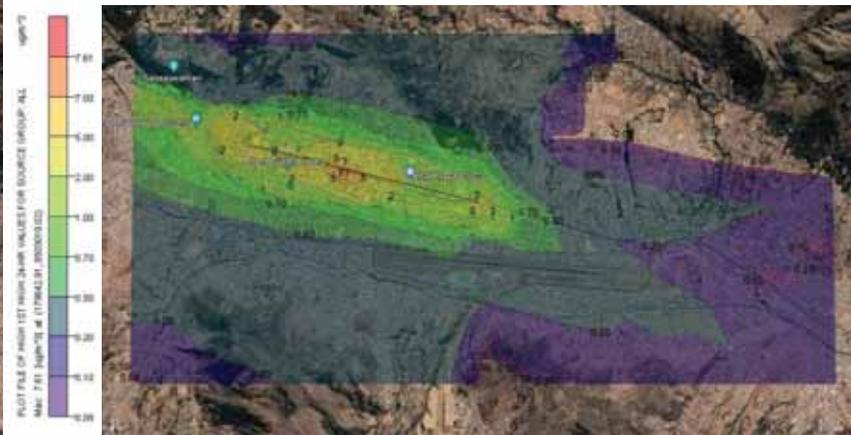


Figura 48: Dispersión de PM2.5 – Horario (1h) para los días Sábados

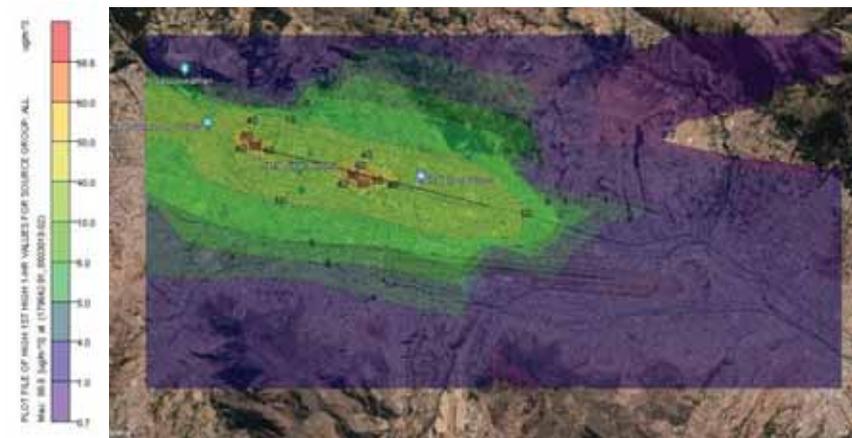
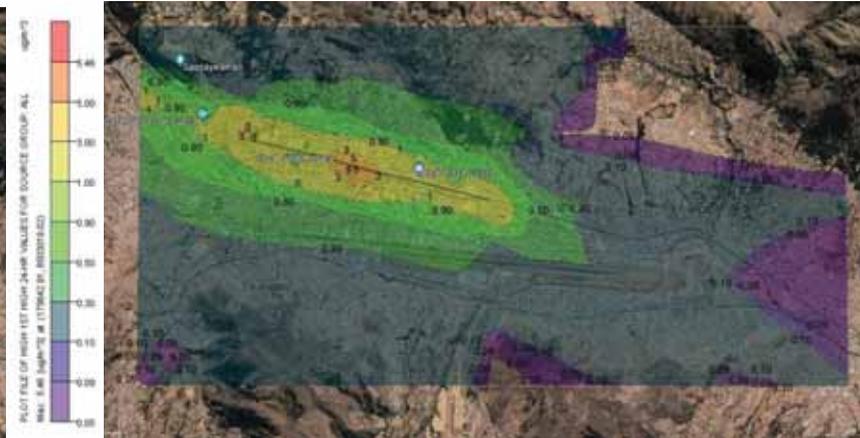


Figura 49: Dispersión de PM2.5 – Diario (24h) para los días Sábados



Anexo 4: *Dispersión de PM10 y PM2.5 Horaria (1h) y Diaria (24h) para Domingo a través de la Av. La Cultura – Cusco.*

Figura 50: Dispersión de PM10 – Horario (1h) para los días Domingo

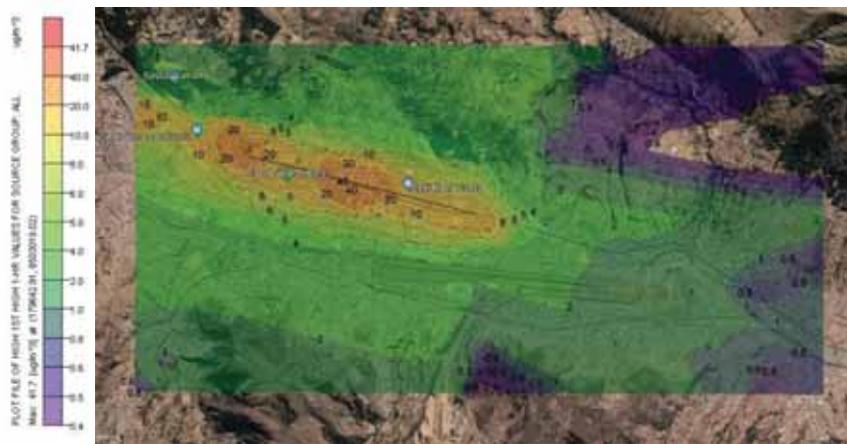


Figura 51: Dispersión de PM10 – Diario (24h) para los días Domingo

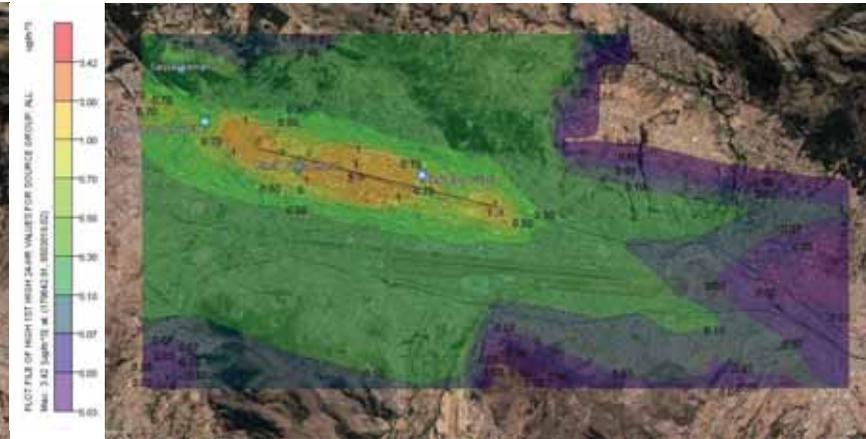


Figura 52: Dispersión de PM2.5 - Horario (1h) para los días Domingo

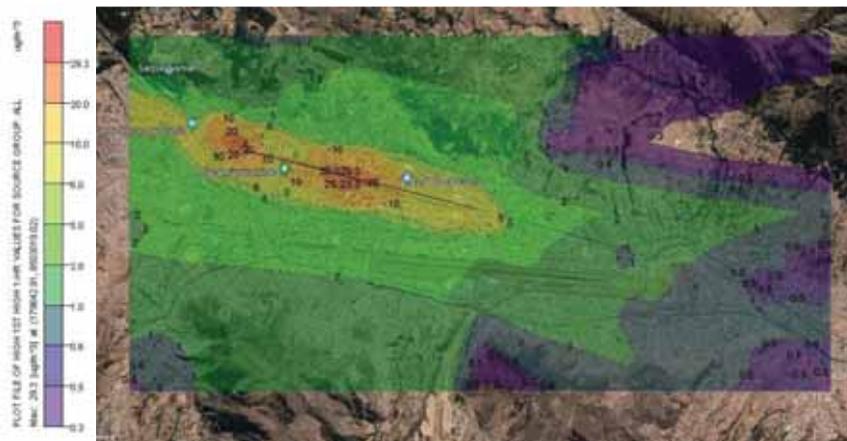
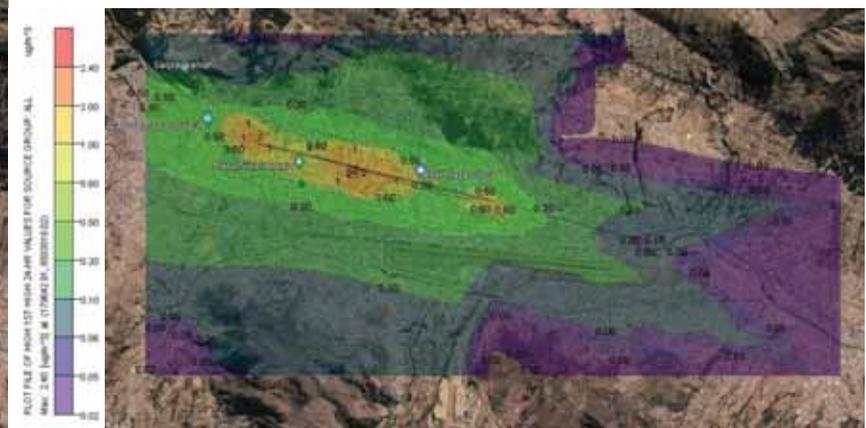


Figura 53: Dispersión de PM2.5 - Diario (24h) para los días Domingo



Anexo 5: Dispersión PM10 y PM2.5 Total Horaria (1h) y Diario (24h), Sin participación de vehículos Particulares, Taxi – Taxi Colectivo a través de la Av. la Cultura – Cusco

Figura 54: Dispersión de PM10(1h) sin vehículos particulares, taxi – taxi colectivo

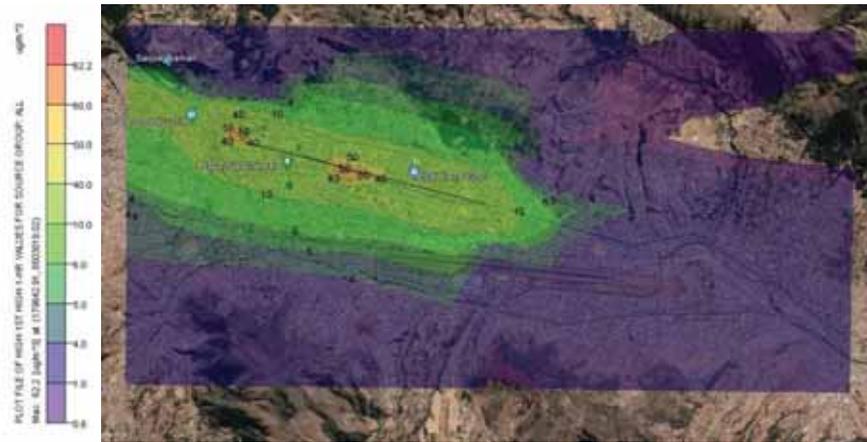


Figura 55: Dispersión de PM10(24h) sin vehículos particulares, taxi – taxi colectivo

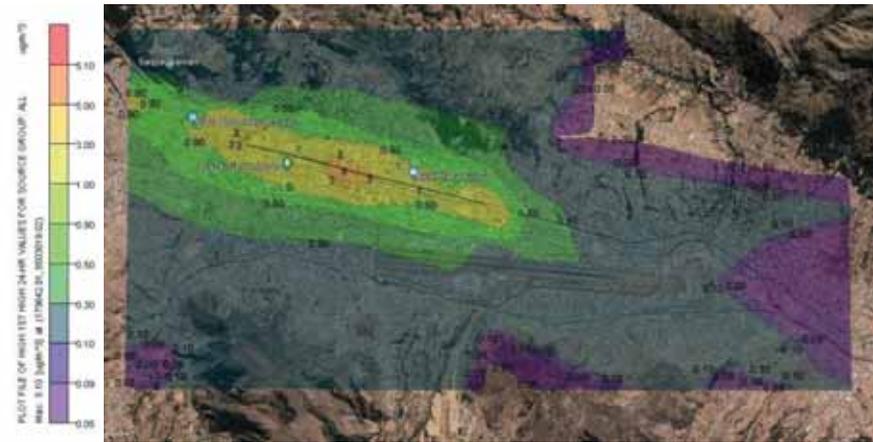


Figura 56: Dispersión de PM2.5(1h) sin vehículos particulares, taxi – taxi colectivo

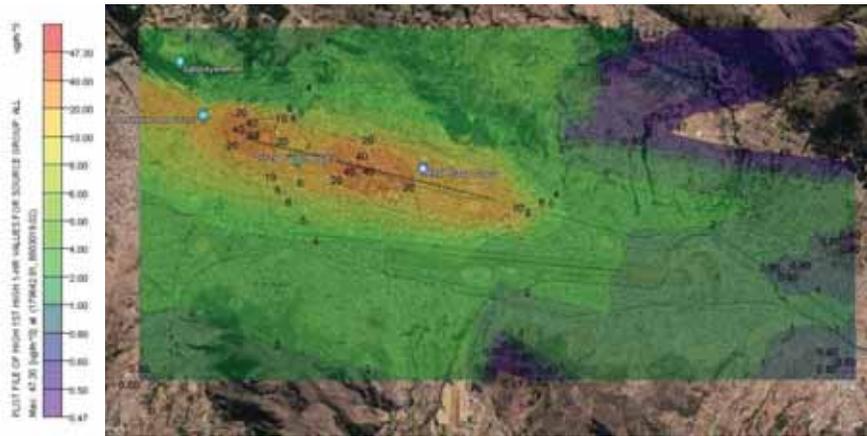
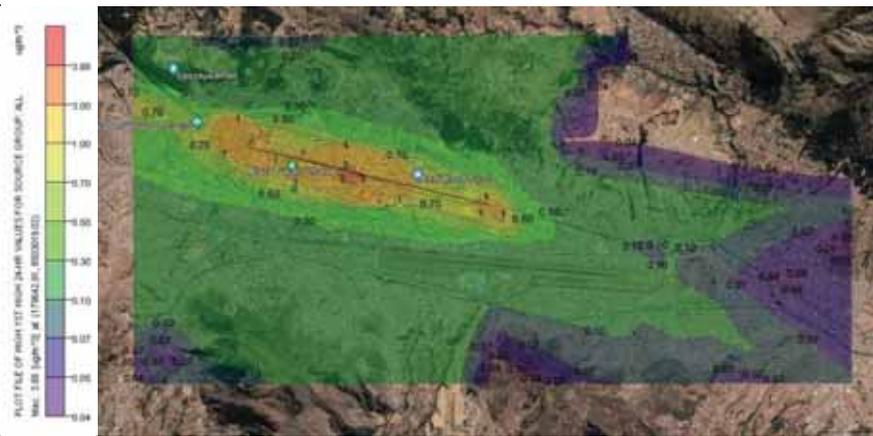


Figura 57: Dispersión de PM2.5(24h) sin vehículos particulares, taxi – taxi colectivo



Anexo 6: Dispersión PM10 y PM2.5 Total Horario (1h) y Diario (24h), Sin participación de vehículos de Transporte Público Urbano a través de la Av. la Cultura – Cusco

Figura 58: Dispersión de PM2.5(1h), Sin vehículos de Transporte Publico Urbano

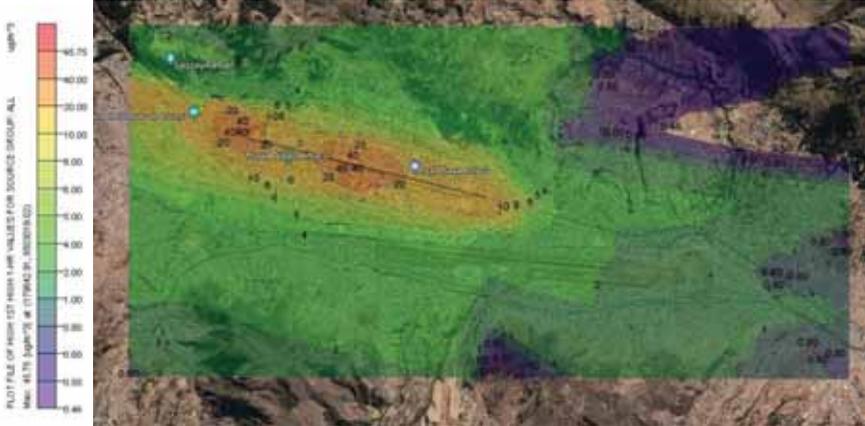


Figura 59: Dispersión de PM10(24h) Sin vehículos de Transporte Publico Urbano

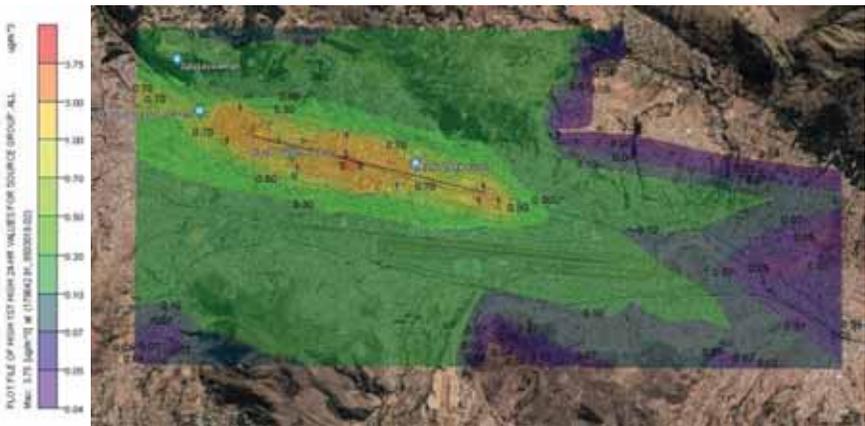


Figura 60: Dispersión de PM2.5(1h) Sin vehículos de Transporte Publico Urbano

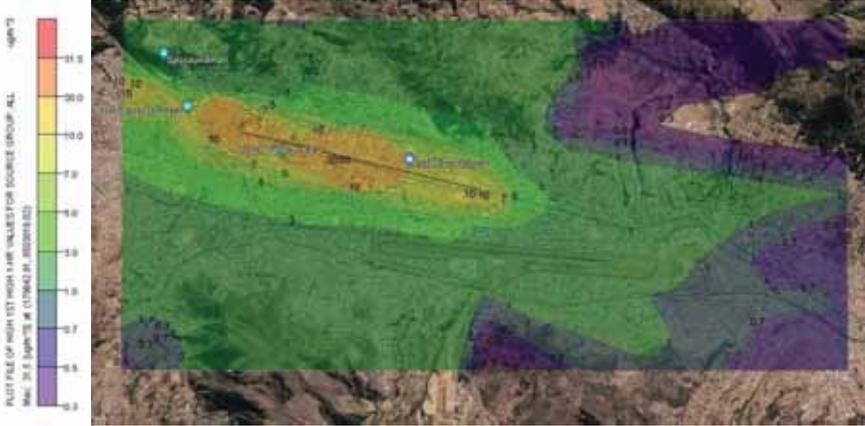
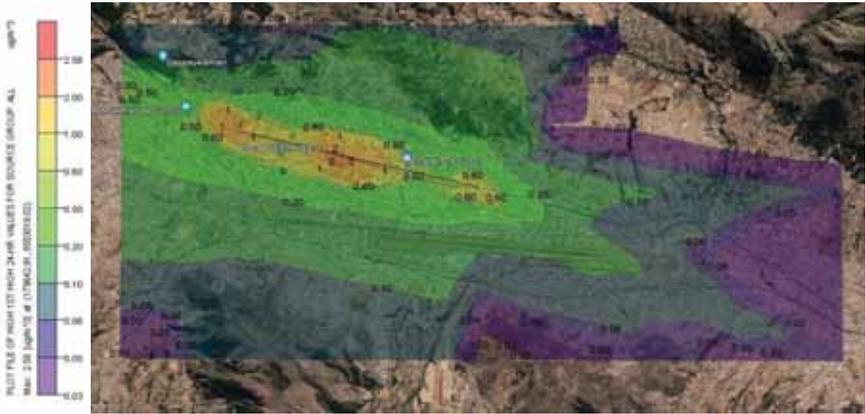
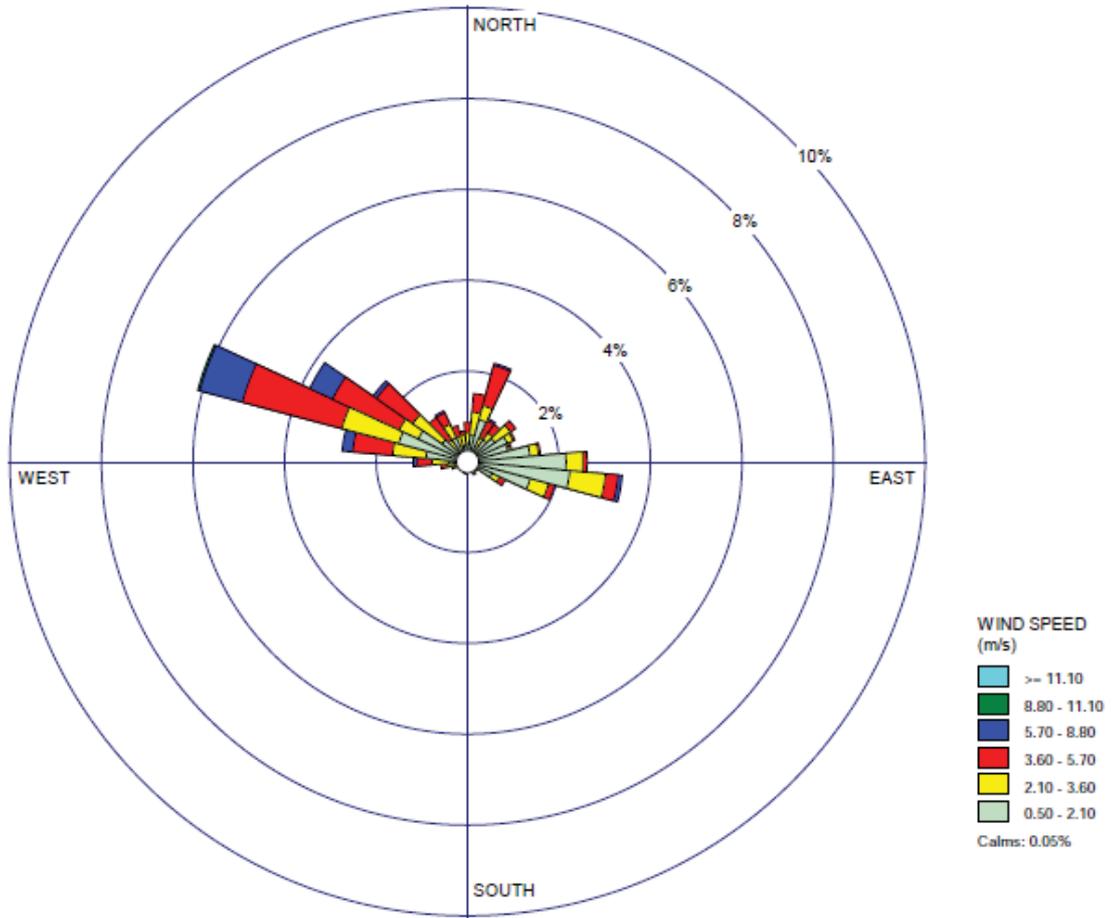


Figura 61: Dispersión de PM2.5(24h) Sin vehículos de Transporte Publico Urbano



Anexo 7: *Frecuencia, Velocidad y Dirección del Viento, monitoreado por el Aeropuerto Juan Velasco Astete.*



REFERENCIAS

- Boubel, R. W., Fox, D. L., Turner, B., & Stern, A. C. (1994). *Fundamentals of air pollution* (Vol. Third edition). Academic Press.
- Brugge, D. (2018). *Particles in the air: the deadliest pollutant is one you breathe every day*. Springer.
- Deuman International & Walsh. (2005). *Estudio de línea base ambiental COSAC I*.
<https://www.protransporte.gob.pe/pdf/biblioteca/2005/lineabaseambiental/capitulo8-9.pdf>
- Engardt, M. (2008). *Modelling of air pollution - Why? [Diapositiva PowerPoint]*.
<https://slideplayer.com/slide/8006548/>
- Espinoza, C. C. (2018). *Determinación De La Dispersión Geográfica De Los Gases NOX, CO, SO2 Y Partículas (PM10), Emitidos Por Una Central Térmica Aplicando El Modelo AERMOD*. [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Lima Sur].
<http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/237>
- European Environment Agency. (1998). *Guidance report on preliminary assessment under EC air quality directives*.<https://www.eea.europa.eu/publications/TEC11a>
- European Environment Agency. (2011). *The application of models under the European Union's Air Quality Directive: A technical reference guide*.
<https://www.eea.europa.eu/publications/fairmode>
- Gallego, P. A., González, F. I., Sánchez, G. B., Fernández, H. P., Garcinuño, M. R., Bravo, Y. J., . . . Durand, A. J. (2012). *Contaminación atmosférica*.
<https://ebookcentral.proquest.com>
- Gaviria, G. C., Benavides, C. P., & Tangarife, C. A. (2011). Contaminación por material particulado (PM_{2,5} y PM₁₀) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín (2008-2009). *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 29(3), 241-

250.http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-386X2011000300004&lng=e&nrm=iso&tlng=es

- Gil, M. J. (2021). Calidad del Aire en la Cuenca Atmosférica del Cusco. *El Antoniano*, 133(1), 27-43. doi:doi.org/10.51343/anto.v133i1.598
- Gutierrez, F. R., & Marquéz, C. J. (2020). *Análisis de los Factores Asociados al Crecimiento del Tráfico Vehicular, Mediante un Método Dinámico Intertemporal en Lima Metropolitana Período, 1990 - 2018*. [tesis de grado, Universidad San Ignacio de Loyola]. <https://repositorio.usil.edu.pe/handle/usil/10732>
- Henry, J. G., & Heinke, G. W. (1999). *Ingeniería Ambiental*. Meg Weist.
- Hussain, Z. (2013). A Review on Theoretical Air Pollutants Dispersion Models. *International Journal of Pharmaceutical, Chemical & Biological Sciences*, 3(4), 1224. <https://www.ijpcbs.com>
- IQAir. (2018). *world air quality report: Region & City PM2.5 Ranking*. <https://www.iqair.com/world-most-polluted-cities>
- Leelőssy, Á., Molnár, F., Izsák, F., Havasi, Á., Lagzi, I., & Mészáros, R. (2014). Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. *Open Geosciences*, 6(3), 257-278. doi:[10.2478/s13533-012-0188-6](https://doi.org/10.2478/s13533-012-0188-6)
- Liu, D. H., & Liptak, B. G. (1999). *Environmental Engineer's Handbook*.
- Ministerio del Ambiente. (2016). *Informe Nacional de la Calidad del Aire 2013-2014*. <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/Informe-Nacional-de-Calidad-del-Aire-2013-2014.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2017). *Estándares de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire D.S. N° 003-2017*. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-aire-establecen-disposiciones-1>

- Municipalidad del Cusco. (2013). *Plan de Desarrollo Urbano de la Provincia del Cusco 2013-2023, Calidad del aire en la Cuenca Atmosférica del Valle Cusco*.
<http://www.cusco.gob.pe/wp-content/uploads/2015/05/boletin-sgot-gmc.pdf>
- Núñez, C. S. (2002). *Altura de la capa de mezcla: Caracterización y experimentación de un modelo meteorológico para el estudio de su evolución diurna*. [tesis de doctorado, Universidad Complutense de Madrid].
<https://eprints.ucm.es/id/eprint/4622/>
- OMS. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*.
https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair_aqg/es/
- OMS Europeo. (2003). *Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone nitrogen dioxide*.
www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/112199/E79097.pdf
- OMS Europeo. (2006). *Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution*.
http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/78657/E88189.pdf
- Perú. Consejo Nacional del Ambiente. (2004). *Plan A Limpiar el Aire Cusco*.
<http://bibliotecavirtual.minam.gob.pe/biam/bitstream/id/405/BIV00070.pdf>
- Saavedra, V. J. (2014). *Análisis de nuevos escenarios de emisión de contaminantes del parque automotor generados en un ambiente de tráfico vehicular*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01>
- Sánchez, V. D., & Wilcken, L. D. (2016). *Evaluación de tres modelos de micro-escala (AERMOD, CALINE4 y R-Line) en su aplicación a las vías principales de la*

- ciudad de Bogotá*. [tesis de pregrado, Universidad de la Salle].
https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/154
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Instituto Nacional de Ecología - (INE-SEMARNAT). (2011). *Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones de PM2.5*. Mexico.
<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/225459.pdf>
- Seoáñez, C. M. (2002). *Tratado de la contaminación atmosférica : Problemas, tratamiento y gestión*. Aedos S.A. <https://ebookcentral.proquest.com>
- Soriano, R. M. (2012). *Contaminantes atmosféricos particulados: evaluación de las fuentes de origen y de su contribución a la contaminación atmosférica en el clúster cerámico de Castellón*. [Tesis de pregrado, Universitat Jaume I].
<http://repositori.uji.es/xmlui/handle/10803/96525?show=full>
- Tapia, M. S. (2017). *Determinación de emisiones vehiculares en la cuenca atmosférica de la ciudad de Arequipa utilizando la metodología de la OMS y el modelo EMOD CMAP*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de San Austin].
<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/5644>
- Tatar, A., Pasculescu, M. F., Pasculescu, D., & Romanescu, A. (2011). Modelling dispersion of pollutants from the atmosphere from thermal Rovinari.
<https://www.researchgate.net/publication/277141490>
- United States Environmental Protection Agency. (2020). *Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling (SCRAM)*. <https://www.epa.gov/scram/air-quality-models>
- Vallero, D. A. (2019). Air pollution dispersion models. Air Pollution Calculations.
doi:10.1016/b978-0-12-814934-8.00014-4

Wilson, E., & Suh, H. (1997). Fine Particles and Coarse Particles: Concentration Relationships Relevant to Epidemiologic Studies. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 47(12), 1238-1249.
doi:10.1080/10473289.1997.10464074