

1-1-2014

Desarrollo de un método para determinar el área de influencia por emisiones de material particulado de vías no pavimentadas

Natalia Ester Daza Pulido
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria

Citación recomendada

Daza Pulido, N. E. (2014). Desarrollo de un método para determinar el área de influencia por emisiones de material particulado de vías no pavimentadas. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/972

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Ambiental y Sanitaria by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

DESARROLLO DE UN MÉTODO PARA DETERMINAR EL ÁREA DE INFLUENCIA POR
EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO DE VÍAS NO PAVIMENTADAS

NATALIA ESTER DAZA PULIDO

UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
BOGOTÁ D.C.
2014

DESARROLLO DE UN MÉTODO PARA DETERMINAR EL ÁREA DE INFLUENCIA POR
EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO DE VÍAS NO PAVIMENTADAS

NATALIA ESTER DAZA PULIDO

Trabajo de tesis para optar por el título de Ingeniero Ambiental y Sanitario

Director

JORGE EDUARDO PACHÓN QUINCHE

Co-Director

JOSE IGNACIO HUERTAS CARDOZO

Asesora

MARIA ELENA HUERTAS BOLAÑOS

UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
BOGOTÁ D.C.
2014

1 Tabla de contenido

Glosario	9
Acrónimos	12
1 Resumen.....	13
2 Abstract	14
3 Introducción	15
4 Justificación	17
5 Objetivos	18
5.1 Objetivo General	18
5.2 Objetivos específicos.....	18
6 Marco de referencia	19
6.1 Marco teórico general.....	19
6.2 Marco Legal	29
6.3 Marco de antecedentes	30
7 Diseño metodológico	42
7.1 Fase 1. Recopilación información base	44
7.2 Fase 2. Datos de entrada al modelo AERMOD	46
7.3 Fase 3 Post-procesamiento de resultados arrojados por el modelo	47
8 Desarrollo de la investigación	50
8.1 Fase 1. Recopilación información base	50
8.2 Fase 2. Datos de entrada al modelo AERMOD	56
8.3 Fase 3. Post-procesamiento de resultados arrojados por el modelo	61
9 Resultados	67
9.1 Determinación función que representa el perfil de concentración de PST y PM10 en las vías analizadas.....	67
9.2 Cálculo de incertidumbre	81
9.3 Comparación datos experimentales con datos AERMOD	85
10 Limitaciones del método propuesto	88
11 Protocolo para determinar el área de influencia en vías no pavimentadas	89
11.1 Método de aproximación inicial.....	89

11.2	Método Refinado	90
12	Aplicación del método propuesto.....	92
13	Conclusiones.....	96
14	Recomendaciones	98
15	Trabajo futuro	98
16	Bibliografía	99
	Anexo 1. Antecedentes del proyecto	103
	Anexo 2. Información valores calculados de emisión para PM10 y PST	113
	Anexo 3. Información de receptores sensibles	141
	Anexo 4. Archivos SFC y PFL	146
	Anexo 5. Concentraciones PM10 y PST arrojadas por AERMOD	149
	Anexo 6. Resultados EasyFlt.....	156
	Anexo 7. Información tramo vial ubicado en el departamento de Meta	169
	Anexo 8. Información complementaria de la aplicación del método propuesto	175

2 Lista de tablas

Tabla 1. Valores de constantes empíricas- Factores de emisión de vías no pavimentadas	22
Tabla 2. Rango de condiciones que deben cumplir las fuentes para el uso de Ec. 1.....	22
Tabla 3 Ecuaciones para estimar las variables meteorológicas secundarias usadas dentro de los modelos de calidad del aire	26
Tabla 4 Normas de calidad de aire e impacto ambiental involucradas para el presente proyecto	29
Tabla 5. Coordenadas UTM de los puntos inicial y final para el tramo vial evaluado	44
Tabla 6 Variables para el cálculo de la velocidad perpendicular	48
Tabla 7 Equipos de Monitoreo, Quebrada Seca, Casanare	50
Tabla 8. Mediciones Equipos Hi-Vol, Quebrada Seca-Casanare. Concentraciones PM10 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	51
Tabla 9 Mediciones Equipos Hi-Vol, Quebrada Seca-Casanare. Concentraciones PST en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	51
Tabla 10 Concentraciones experimentales PM10 y PST vía departamentos de Casanare.....	52
Tabla 11. Coordenadas UTM de los puntos inicial y final para el tramo vial evaluado	53
Tabla 12 Estaciones empleadas para la determinación del perfil de concentraciones	55
Tabla 13. Factores de emisión para PST y PM10 por categoría vehicular	57
Tabla 14 Emisiones promedio de PST y PM10 en la vía	59
Tabla 15 Velocidades anuales promedio y perpendiculares de cada estación.....	65
Tabla 16 Resultados ajustes de las concentraciones a la función Gamma.....	67
Tabla 17 Ajuste distribución Beta.....	69
Tabla 18 Parámetros de la distribución Beta.....	69
Tabla 19 Ajuste distribución Beta para concentraciones de PST a partir del software EasyFit.....	70
Tabla 20 Ajuste distribución Beta para concentraciones de PM10 a partir del software EasyFit	70
Tabla 21. Parámetros distribución beta PST y PM10 para cálculo de concentraciones anuales.	74
Tabla 22 Desviación estándar, valores mínimo, máximo y promedio de los parámetros a_1 y a_2 que definen la función beta para PM10 y PST	74
Tabla 22 Vía Departamento de Casanare. Comparación datos experimentales (valores observados) vs. Valores pronosticados por la función propuesta sin factor de corrección en función de la distancia.....	76
Tabla 23 Vía Departamento de Meta. Comparación datos experimentales (valores observados) vs. Valores pronosticados por la función propuesta sin factor de corrección en función de la distancia.....	76
Tabla 24 Porcentajes de error para promedios anuales y máximos diarios de PM10 y PST en función de la distancia	77
Tabla 25 Error medio cuadrático y porcentajes promedio de error.....	77
Tabla 26 Factores F_d para cada caso evaluado	79
Tabla 27 Parámetros función propuesta	80
Tabla 29 Incertidumbre en el área de influencia por emisiones de PST y PM10	81
Tabla 30 Valores de incertidumbres estimados para peso y porcentaje de sólidos	83
Tabla 31 Incertidumbre de parámetros α_1 y α_2 de la función Beta.....	83
Tabla 32 Incertidumbre área de influencia para concentraciones de PST a diferentes distancias con respecto a la vía.....	84
Tabla 33 Incertidumbre área de influencia para concentraciones de PM10 a diferentes distancias con respecto a la vía.....	84
Tabla 34 Concentraciones AERMOD y concentraciones experimentales a 8, 63 y 128m con respecto a la vía85	
Tabla 35 Comparación diferentes métricas.....	86
Tabla 36 Parámetros función propuesta	89

Tabla 37 Emisiones para Peor escenario y Escenario extremo.....	92
Tabla 38 Distancias asociadas al área de influencia para PM10 y PST en los escenarios peor y extremo	92
Tabla 39 Áreas de influencia por resuspensión de material particulado bajo peor escenario y escenario extremo.	93

3 Lista de Ilustraciones

Ilustración 1 Desviación de los receptores de la velocidad del viento promedio (Venkatram, Isakov, yuan, & Pankratz, 2004).....	32
Ilustración 2 Bosquejo de la vía analizada por Levitin et al (2005).....	33
Ilustración 3 Bosquejo del área evaluada por Kentya et al (2006)	33
Ilustración 4 Bosquejo de la zona urbana evaluada. En esta se presentan tres receptores ubicados a 45° de la vía principal. (Yura, Kear, & Niemieier, 2007)	34
Ilustración 5 Perfil de concentraciones para monóxido de carbono a partir del modelo propuesto en el estudio y datos experimentales (Sahdolina, Sotudeh-Gharebagha, & Zhub, 2006)	35
Ilustración 6 Comparación de concentraciones de NO obtenidas a partir del modelo y sus correspondientes observaciones en campo. (Venkatram, Snyder, Isakov, & Kimbrough, 2013).....	36
Ilustración 7 Variación de las concentraciones normalizadas a diferentes direcciones del viento con respecto a una línea perpendicular a la vía (Venkatram, Snyder, Isakov, & Kimbrough, 2013).....	37
Ilustración 8 Análisis de datos experimentales por medio de diferentes funciones.....	40
Ilustración 9 Campaña de medición realizada 13 a 23 de abril de 2013 en vías no pavimentadas de Meta y Casanare.	44
Ilustración 10 Rosa de vientos para el periodo de Campaña Casanare.....	45
Ilustración 11 Promedio horario de temperaturas reportadas por las estaciones en el departamento de Casanare	45
Ilustración 12. Esquema ángulo de proyección de velocidad respecto a centro de vía.....	48
Ilustración 13. Equipos Hi-Vol instalados en estaciones de monitoreo	51
Ilustración 14 Ubicación Corregimiento de Quebrada Seca- Casanare.....	53
Ilustración 15 Tramo vial corregimiento de Quebrada Seca- Casanare	54
Ilustración 16 Datos de entrada al modelo de dispersión AERMOD	56
Ilustración 17 Aforo vehicular tramo vial Quebrada Seca-Algarrobo, departamento de Casanare.....	57
Ilustración 18 Visor AERMOD de los receptores sensibles perpendiculares a la vía.	59
Ilustración 19 Visor preprocesador AERMAP	60
Ilustración 20 Ejemplo archivos SFC y PFL cargados en AERMOD	61
Ilustración 21 Modelación de la vía en Aermod. Puntos azules: Ubicación de las mediciones experimentales. Puntos amarillos: Receptores sensibles perpendiculares a la vía.	62
Ilustración 22 Ejemplo perfil de concentraciones para PST/Emisión	63
Ilustración 23 Perfil concentración PST/Emisión para las 12 estaciones meteorológicas analizadas	64
Ilustración 24 Perfil concentración PM10/Emisión para las 12 estaciones meteorológicas analizadas	64
Ilustración 25 Velocidad promedio vs. Velocidad perpendicular	66
Ilustración 26 Resultados correlación parámetros α y β de la función Gamma y la velocidad anual promedio del viento.....	68
Ilustración 27 Representación gráfica de la función Beta para concentraciones de PST	72
Ilustración 28. Parámetros de la distribución Beta vs velocidad del viento para PST.	73
Ilustración 29 Parámetros de la distribución Beta vs velocidad del viento para PM10.	73
Ilustración 30 Distribución direcciones del viento para escenarios cuyo perfil de concentraciones para PST no es representado por una función Beta	75
Ilustración 31 Distribución direcciones del viento para escenarios cuyo perfil de concentraciones para PST sí puede ser representado por una función Beta	75

Ilustración 31 Izquierda: concentración de primeros máximos PST vs. Distancia. Derecha: concentración de primeros máximos PM10 vs. Distancia	79
Ilustración 34 Simulación de la dispersión de material particulado desde una vía no pavimentada usando un paquete computacional de mecánica de fluidos	85
Ilustración 35 Procedimiento para utilizar método Screening	89
Ilustración 36 Procedimiento método Refinado	90
Ilustración 37 Delimitación área de influencia. a) Área de influencia por PST para periodo anual. b). Área de influencia por PM10 para periodo anual.....	93
Ilustración 38 Distancia que delimita el área de influencia con escenarios Peor y Extremo.	95
Ilustración 39 Distancia que delimita el área de influencia con escenarios Peor y Extremo.	95

4 Glosario

AERMAP: Preprocesador del terreno del modelo AERMOD

AERMET: Preprocesador meteorológico del modelo AERMOD

AERMOD: Modelo de dispersión gaussiana de la U.S EPA

Área de influencia ambiental: Área en la que se manifiestan los impactos ambientales ocasionados por el desarrollo de un proyecto, obra o actividad sobre los medios abiótico, biótico y socioeconómico, en los componentes aire, agua, suelo (ANLA, 2012).

Concentración de una Sustancia en el Aire: Es la relación que existe entre el peso o el volumen de una sustancia y la unidad de volumen de aire en la cual está contenida (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010).

Contaminación Atmosférica: Fenómeno de acumulación o de concentración de contaminantes en el aire (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010).

Contaminante atmosférico: La Agencia de protección ambiental (EPA) estableció que un contaminante del aire se define como cualquier sustancia aerotransportada de composición natural o artificial que, en concentraciones elevadas, podría hacerle daño a seres humanos, animales, vegetación u otro material (EPA, 2012). Según la ley Colombiana, Resolución 610 de 2010, los contaminantes atmosféricos son fenómenos físicos o sustancias, o elementos en estado sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana que, solos o en combinación, o como productos de reacción, se emiten al aire como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de éstas.

Contaminante criterio: Contaminantes estudiados extensivamente y considerados para definir la calidad del aire, durante varias décadas fueron utilizados como indicadores creyendo que de encontrarse estos dentro del valor permisible por la norma de calidad de aire no habría riesgo para la salud humana en la zona, sin embargo hoy se ha comprobado que tal hipótesis no se cumple en todos los casos. Este grupo de contaminantes está compuesto por dióxido de azufre, monóxido de carbono, material particulado menor a 10 μ m, óxidos de nitrógeno y ozono (UNAD, 2013).

Distribución de probabilidad: Distribución teórica de frecuencias que describe cómo podrían llegar a ser los resultados de un experimento o muestra. Existen diferentes tipos de distribuciones que permiten describir el comportamiento estadístico de los datos (Hernández J. L.). Dentro de las distribuciones de probabilidad más conocidas se encuentran la distribución normal, Weibull, Gamma, Beta, entre otros.

Emisión: Descarga de una sustancia en estado sólido, líquido o gaseoso al aire, proveniente de una fuente fija o móvil (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010). Cabe resaltar que las emisiones no son únicamente productos o residuos de la actividad humana, sino que también pueden provenir de fuentes y procesos naturales (animales, vegetales, y fenómenos naturales) (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2008).

Factor de emisión: Es un valor representativo que relaciona la cantidad de un contaminante que es emitido a la atmósfera y la actividad asociada a la emisión de ese contaminante. Generalmente se expresan como el peso del contaminante dividido por unidad de peso, volumen, distancia o la duración de la actividad (US EPA, 2014).

Fuente de Emisión: Es toda actividad, proceso u operación, realizado por los seres humanos, o con su intervención, susceptible de emitir contaminantes al aire (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2008).

Fuente Móvil: Es la fuente de emisión que, por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza.

Método Screening: Es un método que permite tener una aproximación de las concentraciones en una zona evaluando si la emisión de una determinada fuente tiene el potencial de generar o no un impacto en la calidad del aire (US EPA, 1992).

Norma Anual: Establece la concentración máxima anual permisible de un contaminante, definida como el promedio aritmético de los valores de las muestras diarias cuando se trata de contaminantes en estado gaseoso, o el promedio geométrico de los valores de las muestras diarias cuando se refieran a partículas suspendidas totales – PST. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010).

Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión: Es el nivel de concentración legalmente permisible de sustancias contaminantes o fenómenos contaminantes presentes en el aire, establecido por el Ministerio del Medio Ambiente, con el fin de preservar la buena calidad del medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010)

Norma Diaria: Establece la concentración máxima diaria permisible de un acontaminante, definida como el promedio aritmético de los valores de las muestras horarias, que podrá excederse sólo una vez en un año (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010).

PST (Partículas Suspendidas Totales): Material particulado que incluye tanto a la fracción inhalable como a las mayores de 10 micras, que no se sedimentan en periodos cortos sino que permanecen suspendidas en el aire debido a su tamaño y densidad (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010).

PM10 (Material Particulado Menor a 10 Micras): Material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros nominales (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2008).

PM2.5 (Material Particulado Menor a 2,5 Micras): Material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 micrómetros nominales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010).

Promedio Aritmético: Es la sumatoria de todos los datos a promediar, dividido por el número total de datos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010).

Promedio Geométrico: Es la raíz enésima del producto de todos los datos a promediar (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010). Para su cálculo se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$G = \sqrt[n]{X_1 * X_2 * X_2 * ... X_n} \quad \text{Ec. 1}$$

En donde:

G: Promedio Geométrico y $X_1 * X_2 * X_3 * \dots * X_n$: Datos a promediar

Receptores discretos: También conocidos como receptores sensibles son puntos definidos por coordenadas específicas sobre los cuales se obtendrán valores de concentración y o flujos de deposición o remoción de contaminantes emitidos (Fonseca, Turtos, & Pire, 2010).

5 Acrónimos

AERMOD	Atmospheric Dispersion Modeling System (Sistema de Modelamiento de Dispersión Atmosférica)
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
EPA	Environmental protection Agency
PST	Partículas suspendidas totales
PM10	Material particulado menor a 10 micras

6 Resumen

La emisión por resuspensión de material particulado en vías afecta las concentraciones de este contaminante en el aire generando impactos sobre la salud de las poblaciones que se encuentren cercanas a este tipo de fuentes de emisión (Venkatram, Snyder, & Isakov, 2013). Dentro de sus efectos se encuentra la afectación del sistema respiratorio y enfermedades cardiovasculares. Especialmente el material particulado es un contaminante que puede viajar hasta la zona traqueo bronquial y hasta los alveolos pulmonares provocando enfermedades como asma, bronquitis, infecciones respiratorias, entre otras (Grahame y Schlesinger, 2010; Venkatram et al, 2013).

Por otro lado, existen actividades industriales que en su desarrollo utilizan vías no pavimentadas, como lo son el sector hidrocarburos y de explotación minera, generando resuspensión del material particulado que compone la vía. Este permanecerá en el aire tanto como peso del material y condiciones meteorológicas se lo permitan, por lo que se generará un área de influencia sobre el espacio geográfico en que se encuentre. En muchos casos no se delimita correctamente dicha área ni se toman las medidas correspondientes para que las empresas respondan por el impacto que generan. Razón por la cual, se propone en el presente proyecto un método que permite, en forma simple, estimar la extensión del área de influencia generada por la resuspensión de material particulado debido al paso de vehículos sobre una vía no pavimentada.

El desarrollo de este fue posible mediante el uso de información experimental de una vía no pavimentada del oriente Colombiano, modelando la dispersión de material particulado utilizando AERMOD bajo diferentes condiciones meteorológicas a fin de identificar el comportamiento del perfil de concentraciones perpendicular a la vía y se propuso una función que lo representara. Se encontró que la concentración de PST y PM10 en función de la distancia a la vía es descrita por una función beta. A partir de dicha función y del ajuste a valores experimentales se propuso un método tipo screening para determinar el área de influencia en vías no pavimentadas.

El método propuesto, el protocolo para su utilización y una aplicación del mismo bajo un peor escenario son presentados en este documento. Si bien este método posee limitaciones que se describen en este documento, se espera que tenga aplicabilidad en regiones similares a la región del área de estudio, para lo cual será necesario continuar evaluando su veracidad en otras regiones.

7 Abstract

Emissions by resuspension of particulate matter on unpaved roads has an effect on the concentrations of this pollutant in the air, generating impacts on human health, especially on the populations living close to this type of emission sources (Venkatram, Snyder, & Isakov, 2013). Among the effects caused by air pollutants are respiratory and cardiovascular diseases. In special, particulate matter is a pollutant that can travel to the tracheal and bronchial area or to the pulmonary alveoli causing diseases such as asthma, bronchitis, respiratory infections, among others (Secretaría Distrital de Ambiente, 2010).

On the other hand, there are industrial activities that use unpaved roads, such as hydrocarbons and mining sectors, generating large resuspension of the particulate matter from the road. This will remain on the air as long as weight and moisture of the material and weather conditions permit, generating an area of influence in the zone of the project. In many cases, that area is not properly delimited neither strategies are taken to demand companies to respond for the impact they are producing. For that reason, it is proposed in this project a method to estimate in a simple way the extension of the area of influence generated by the pass of vehicles on an unpaved road.

This was made possible by using experimental data from an unpaved road in eastern Colombia, modelling the dispersion of particulate matter using AERMOD under different weather conditions in order to identify the behavior of the concentration profile perpendicular to the road and set a function to represent it. It was found that concentrations of TSP and PM10 in function of the distance to the road are described by a beta function. From this function and the experimental data fit a screening method was proposed to determine the area of influence on unpaved roads.

The development of this method, the protocol for its use and an application under a worst case scenario are presented in this document. Even though this method has limitations, it is expected to applicate it in areas similar to the area of this study, for that reason it will be necessary to further evaluate its accuracy in other regions.

8 Introducción

El tránsito sobre vías no pavimentadas es una fuente representativa de emisiones de material particulado. Especialmente el paso de vehículos de carga pesada sobre vías no pavimentadas produce que la grava compactada que conforma la vía sea pulverizada por la fuerza que imparten las ruedas y de esta manera el material superficial sea resuspendido (Gillies et al, 2004).

Kuhns et al (2000) indican que cerca del 20% de material particulado presente en varias ciudades al oeste de Estados Unidos proviene de la emisión por resuspensión del polvo de vías pavimentadas y no pavimentadas. De igual forma, el transporte de materiales por vías no pavimentadas en el desarrollo de megaproyectos como proyectos de explotación minera, resulta ser una de las principales causas de la presencia de material particulado en el aire. Huertas et al (2011) desarrollaron una metodología de inventario de emisiones para minas a cielo abierto, encontrando que cerca del 26% de PST y el 13% de PM10 presente en el aire proviene de la resuspensión del material de la vía.

La emisión de material particulado aumenta las concentraciones de este contaminante en el medio excediendo las normas establecidas de calidad del aire. Tal conducta deriva un efecto sobre la salud de las poblaciones cercanas a este tipo de fuentes de emisión (Grahame y Schlesinger, 2010; Venkatram et al, 2013) como enfermedades respiratorias y cardiovasculares, ataques de asma, bronquitis aguda y restricciones en actividad (Cheng et al, 2013), resultando en incrementos en tasas de mortalidad y morbilidad (Novi, 2011; Cheng et al, 2013).

Diversos estudios formulan modelos para estimar concentraciones de contaminantes emitidos por fuentes vehiculares en vías pavimentadas bien sea a partir de modelación de dispersión como el uso del modelo CALINE para estimar la dispersión de contaminantes en vías pavimentadas (Levitina et al, 2005; Kentya et al, 2006; Yura et al, 2007), modelos determinísticos en el desarrollo de ecuaciones para la determinación de concentraciones a un ángulo y distancia específico con respecto a la vía (Venkatram y Horst, 2005; Barrett y Britter, 2009), modelos estadísticos en el desarrollo de ecuaciones para estimar concentraciones de una fuente lineal partiendo de análisis estadístico (Mikkelsen, Troen, & Larsen, 1982), modelos numéricos empleando CFD en el desarrollo de modelos para evaluar dispersión de contaminantes en vías validados a partir de datos experimentales de CO (Sahdolina, Sotudeh-Gharebagha, & Zhub, 2006). En algunos casos los modelos numéricos terminan siendo utilizados como punto de comparación para determinación de otros métodos propuestos (Venkatrama & Horstb, 2005). También se encuentra la combinación de modelos, Venkatram et al (2007) proponen una metodología a partir de una función estadística y la ecuación de dispersión gaussiana.

Si bien los estudios anteriores han sido validados a partir de un solo contaminante algunos autores mencionan que sus métodos pueden ser utilizados para diferentes contaminantes, aun así estos han sido diseñados para concentraciones que salen del tubo de escape;

Venkatram et al (2007) proponen una función para estimar concentraciones a partir de las concentraciones medidas en campo de NO.

Por lo anterior es posible decir que no se encuentra una función específica para el cálculo de material particulado por resuspensión en vías y tampoco metodologías para la determinación del área de influencia por concentraciones de material particulado provenientes de la resuspensión de material particulado por el flujo vehicular en una vía no pavimentada, ya que los estudios realizados hasta ahora se enfocan en desarrollar un modelo mas no se presentan aplicaciones de los mismos. Por lo tanto ¿Cómo determinar el área de influencia generada por la resuspensión de material particulado en vías no pavimentadas?

En Colombia, la necesidad de definir métodos que permitan estimar el área de influencia por resuspensión de material particulado en vías no pavimentadas es notoria, más si no se cuenta con información y herramientas al alcance, y aún más si la salud pública y ambiental está de por medio, el aumento del desarrollo de proyectos y megaproyectos en el país ha causado fuertes impactos en salud y población. Especialmente, para el caso de material particulado, empresas de sector hidrocarburos y sector minero desarrollan proyectos en áreas de difícil acceso, lo que les conlleva a construir vías no pavimentadas y a utilizar transporte de carga pesada para el transporte de materiales, generando la resuspensión del material que compone la vía.

El presente trabajo presenta el desarrollo de un método que permite determinar el área de influencia ambiental generada por resuspensión de material particulado PM10 y PST en vías no pavimentadas y se propone una función que determina el perfil de concentraciones de material particulado transversal a una vía no pavimentada de modo que sea posible estimar la extensión del área de influencia generada por la emisión de dicho contaminante.

Por último se presenta la aplicación de la metodología en una vía no pavimentada con alto flujo vehicular y vehículos de carga pesada utilizada para el transporte de hidrocarburos como ejemplo de aplicación del método. Se revisan también las principales limitaciones que tiene este método y se dan recomendaciones para su mejoramiento.

9 Justificación

El artículo 49 de la ley 99 de 1993 especifica que “la ejecución de obras, el establecimiento de industrias o el desarrollo de cualquier actividad, que de acuerdo con la ley y los reglamentos, pueda producir deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente o introducir modificaciones considerables o notorias al paisaje requiriere de una licencia ambiental”.

La decisión en el otorgar o negar una licencia ambiental, como bien es sabido va ligada a la evaluación de impacto que genere el proyecto u obra, pero ¿De qué manera tal impacto puede ser estimado si no se encuentran estipulados ni definidos métodos que permitan calcular el área de influencia directa de los proyectos que se realizan?

El uso de modelos de dispersión resulta ser una herramienta para conocer la dispersión de contaminantes en un área determinada, sin embargo en muchos casos el uso de estos modelos resulta ser limitado debido a que significa un alto requerimiento computacional, existe complejidad en adquirir y procesar información de entrada (Campañas de monitoreo, aforos vehiculares, inventarios de emisiones, etc), o no se cuenta con suficiente personal capacitado, lo que evidencia la necesidad de que se desarrollen y propongan métodos que faciliten la evaluación de la dispersión de contaminantes.

Por otro lado no se encuentran métodos específicos para determinar el área de influencia por material resuspendido en vías no pavimentadas. Por lo tanto mediante el presente proyecto se busca proponer un método que permita conocer el área de influencia de una determinada vía. No con esto queriendo reemplazar la modelación a partir de una función sino proponiendo un método complementario a fin de realizar un estimativo inicial de la tendencia de las concentraciones.

El contar con un estimativo inicial de concentraciones a lo largo de una vía, permitirá por ejemplo ahorrar recursos en casos en los que las emisiones no sean significativas y ello se vea reflejado en concentraciones muy por debajo de la norma de calidad de aire, en tales casos no sería necesario el uso de un modelo de dispersión, por el contrario, sí lo sería en el caso en que al evaluar un peor escenario utilizando un método de aproximación inicial se sobrepasen las concentraciones de calidad de aire.

La propuesta de este método nace con el fin de ser de utilidad al momento de evaluar proyectos por entidades estatales y empresas privadas, de forma tal que al implementarse existan más herramientas para determinar áreas de influencia en zonas donde no se cuente con recursos ni información y como se mencionó anteriormente sea un complemento a los modelos de dispersión, de forma tal que haya un mayor control los proyectos que se desarrollan en todo el país protegiendo la salud de aquellas personas que reciben directa e indirectamente el impacto por material particulado.

10 Objetivos

10.1 Objetivo General

Desarrollar un método que permita estimar el área de influencia ambiental generada por resuspensión de material particulado en vías no pavimentadas.

10.2 Objetivos específicos

- Estimar la emisión de material particulado PST y PM10 utilizando los factores de emisión recomendados por la agencia de protección ambiental EPA aplicables a vías no pavimentadas usadas por vehículos de carga pesada.
- Establecer el comportamiento de las concentraciones de material particulado PST Y PM10 perpendiculares a la vía utilizando el modelo de dispersión AERMOD.
- Deducir una función que represente el comportamiento de la concentración de material particulado PST y PM10 en una distancia perpendicular a la vía.

11 Marco de referencia

11.1 Marco teórico general

La mayoría de vías no pavimentadas cuentan con una capa de grava compacta, usualmente proveniente de suelo parental. Una vez los vehículos transitan sobre estas ejercen una fuerza sobre la superficie de la grava pulverizándola y esparciendo partículas al exterior, las cuales se mantendrán en el aire tanto como su peso y condiciones atmosféricas se lo permitan. El volumen de partículas que finalmente llegue al aire dependerá principalmente del contenido de finos de la vía, contenido de humedad, velocidad y peso del vehículo (Gillies, Etyemezian, & Kuhns, 2004).

La problemática generada por material resuspendido es cada vez más evidente, haciendo más urgente su estudio. En especial la modelación de contaminantes a escala local se analiza aún más para desarrollar políticas públicas, evaluar efectos y riesgos sobre la salud humana (Barrett & Britter, 2009).

- **Área de influencia ambiental**

Un área de influencia ambiental está definida como el área que se ve afectada por las actividades de un proyecto dentro del espacio en que se desarrolla e incluso fuera de los límites de este. Dicha área de influencia dependerá del tipo de proyecto que se desarrolle, de la etapa en la que se encuentre el mismo y de las condiciones de la zona afectada como patrones meteorológicos, terreno y naturaleza del contaminante a evaluar.

Lo recomendado por la Agencia Nacional de Licencias Ambientales ANLA, es que se defina un área de influencia preliminar del proyecto sobre la cual se puedan identificar y evaluar los impactos ambientales, dicha área de influencia deberá ser ajustada tantas veces como sea necesario a fin de cumplir con los criterios establecidos por la ANLA, es decir, que se consideren impactos sobre medio abiótico, biótico y socioeconómico teniendo en cuenta los medios agua, aire, suelo. Además de incluir el área en el que se desarrolla el proyecto, también se deben incluir las vías de acceso del proyecto, bien sean nuevas (construidas por el proyecto) o vías privadas utilizadas por el mismo (ANLA, 2012).

Generalmente el método más usado para definir un área de influencia ambiental por contaminación atmosférica es a partir de la estimación de la dispersión de contaminantes en un área a partir de un modelo de dispersión (TEEIC, 2014). La EPA propone un procedimiento para estimar concentraciones a partir de lo que se conoce como método screening (método de aproximación inicial) y método refinado (explicados a continuación); si bien estos métodos están principalmente enfocados en fuentes fijas, su modelo podría ser adoptado para desarrollar nuevos métodos que apliquen a más tipos de fuentes y a la vez ser utilizados en la determinación del área de influencia.

- **Método de aproximación inicial**

El método de aproximación inicial, más conocido como método screening es un método que permite hacer estimativos iniciales o aproximaciones del comportamiento de concentraciones. Existen dos tipos de método Screening, el detallado y el simple (US EPA, 1992). El detallado hace referencia a la modelación básica de contaminantes, mientras que el método screening simple es un método utilizado para calcular las concentraciones más altas que se puedan llegar a presentar bajo las peores condiciones meteorológicas (ITESM, 2008).

El método Screening simple es recomendado como una primera fase para la evaluación de impactos en la calidad de aire ya que su uso permite el ahorro de recursos en modelaciones más detalladas para fuentes que posiblemente no contribuyen a sobrepasar la norma de calidad de aire ni tienen potencial de generar fuertes impactos en la calidad de aire a corto plazo (US EPA, 2005). Algunas de las características de este tipo de métodos son:

- Permiten tener una rápida aproximación de la dispersión de contaminantes.
- No consideran reacciones ni meteorología
- No predicen hora ni lugar en el que se presenta la concentración más alta
- Evalúan las concentraciones emitidas por la fuente en un terreno plano

El método Screening propuesto por la EPA, clasificado hoy en día por el centro de medición de emisiones EMC por sus siglas en inglés (Emission Measurement Center) como un método condicional está enfocado a la estimación de concentraciones provenientes de chimeneas y fuentes industriales.

Algunos modelos han sido desarrollados siguiendo el principio del método Screening, como por ejemplo AERSCREEN, COMPLEXI, CTSCREEN, VALLEY, entre otros (US EPA, 2014), más no se encuentra alguno asociado a la resuspensión de material particulado en vías no pavimentadas.

○ **Método refinado**

La modelación refinada consiste en realizar una estimación mucho más precisa y exacta de la dispersión de contaminantes en un área determinada trayendo como resultado una mejor estimación del impacto generado por la fuente y proporcionando información de la efectividad de las medidas de control, por lo cual demandan un tratamiento más minucioso de procesos físicos y químicos que ocurren en la atmósfera, al igual que datos de entrada más detallado(US EPA, 2005).

Dentro de los métodos recomendados por la US EPA para implementar el método refinado se encuentran AERMOD, CALPUFF, CALINE3 entre otros (US EPA, 2014). Se recomienda utilizar métodos refinados cuando (ITESM, 2008):

- ✓ Los valores de monitoreo sobrepasan las normas de calidad de aire
- ✓ La topografía es compleja
- ✓ El área afectada tiene como receptores zonas que involucran parques naturales
- ✓ Múltiples fuentes de emisión alrededor de la fuente de estudio

En la mayoría de los casos es deseable que se pueda utilizar un método refinado, sin embargo hay situaciones en las que el procedimiento tipo screening resulta ser la única opción para estimar el impacto de una fuente, razón por la cual es necesario esforzarse por crear, actualizar, completar y mejorar las bases de datos necesarias para implementar siempre las técnicas analíticas más apropiadas (US EPA, 2005).

- **Modelos de dispersión**

Para utilizar un modelo dispersión se debe contar con información meteorológica y geografía del lugar a evaluar e información que permita determinar las emisiones como factores de emisión, aforos vehiculares del lugar, características de la vías, entre otros. De forma tal que el modelo pueda llegar a evaluar fenómenos físicos como lo son el movimiento de fluidos gaseosos de varias especies y de partículas suspendidas, la transferencia de calor que ocurre al interior del fluido, la transferencia de masa que ocurre a la salida de la fuente, en la atmósfera y en los receptores, entre otros y así determinar la dispersión de la emisión.

Los modelos describen la dispersión de los contaminantes atmosféricos en el aire mediante técnicas matemáticas y estadísticas. Debido a la complejidad de estas ecuaciones, no se conocen soluciones analíticas para el caso de dispersión de contaminantes. Como alternativa se ha optado por acudir a soluciones simplificadas que proveen información referente a un aspecto específico del fenómeno de dispersión de contaminantes alrededor de la fuente de emisión. Sin embargo resultan ser aproximaciones con supuestos algunas veces poco aceptables (ITESM, 2008).

Algunos de los modelos que se han propuesto involucran modelos determinísticos, analíticos, numéricos, estocásticos y de redes neuronales (S.M.S & Khare, 2002). En donde su uso dependerá de aspectos como la exactitud con que se quiera trabajar, la capacidad de procesar gran número de datos, el requerimiento computacional, la aplicabilidad a diferentes condiciones geográficas, costo y accesibilidad, entre otros.

Como se mencionó previamente para emplear un modelo de calidad de aire se necesita información de emisiones, geografía y meteorología, es presentada en esta sección la explicación de cómo estimar emisiones a partir de los factores de emisión recomendados por la EPA, y debido a que el modelo seleccionado para el presente estudio es AERMOD se explica la forma como este permite procesar información geográfica y meteorológica.

- **Cálculo de emisiones**

El tránsito de vehículos en vías no pavimentadas conduce a la resuspensión del material que compone la vía siendo emitido a la atmósfera como material particulado. De modo que la emisión es calculada en función de la carga de sedimentos que compone la superficie de la vía y el peso promedio de los vehículos que transitan la vía, entre otros. En algunos casos se asumen las emisiones de vías no pavimentadas como fuentes de área, entendiendo fuente de área como un compendio de unidades similares dentro de un área geográfica que no pueden ser inventariadas como lo son puntos específicos, fuentes móviles o fuentes biogénicas (Chakrabarti & Devotta, 2010).

Por esta razón se presenta el procedimiento para estimar la emisión proveniente de la vía en unidades de g/sm², de forma tal que se pueda conocer independientemente del tamaño o área de la vía cuál es la emisión que se está generando.

La US EPA propone el uso de factores de emisión para estimar la contribución de contaminantes de una determinada actividad en función del tipo de fuente del que provienen y así.

La Ecuación 1 presenta el factor de emisión para vías industriales no pavimentadas en kgPST/VKT, donde k, a y b son constantes, s es el contenido de finos que pasa la malla No. 200 y w corresponde al peso de los vehículos en toneladas.

$$E_f = k \left(\frac{s}{12} \right)^a \left(\frac{w}{3} \right)^b \quad (1)$$

La Tabla 1 se presenta los valores de las constantes k, a y b tanto para PM10 como PST para vías públicas e industriales no pavimentadas.

Tabla 1. Valores de constantes empíricas- Factores de emisión de vías no pavimentadas

Constante	Vías industriales			Vías públicas		
	PM2.5	PM10	PM30 ¹	PM2.5	PM10	PM30
k (kg/VKT)	0.04	0.43	1.39	0.05	0.51	1.70
A	0.9	0.9	0.7	1	1	1
B	0.45	0.45	0.45	-	-	-
c	-	-	-	0.2	0.2	0.3
D	-	-	-	0.5	0.5	0.3

Fuente (US EPA, 2006)

Para el uso de la Ec. 1 se deben cumplir con los parámetros establecidos en la Tabla 2 de acuerdo con la US EPA.

Tabla 2. Rango de condiciones que deben cumplir las fuentes para el uso de Ec. 1

Emission Factor	Surface Silt Content, %	Mean Vehicle Weight		Mean Vehicle Speed		Mean No. of Wheels	Surface Moisture Content, %
		Mg	ton	km/hr	mph		
Industrial Roads (Equation 1a)	1.8-25.2 ✓	1.8-260	2-290 ✓	8-69 ✓	5-43	4-17 ¹ ✓	0.03-13 ✓
Public Roads (Equation 1b)	1.8-35	1.4-2.7	1.5-3	16-88	10-55	4-4.8	0.03-13

Fuente (US EPA, 2006)

¹ Asumido como el equivalente al total de partículas suspendidas PST (EPA, 2006)

Una vez se cuente con el cálculo de los factores de emisión para cada tipo de vehículo se estima la emisión a partir de la siguiente ecuación (EPA, 2006).

$$E = AE_{fi}(1 - \eta) \quad (2)$$

Donde:

E : Emisión en $\text{g/m}^2 \text{ s}$

η : Eficiencia de la medida de control

A : Factor de actividad ($\text{veh/s} \cdot \text{m}$)

E_{fi} : Factor de emisión del vehículo de tamaño i ($\text{kg PST o PM}_{10}/\text{VKT}$)

La eficiencia de las medidas de control puede ser determinada por medio de las ecuaciones 3 y 4, las cuales corresponden a la eficiencia en la medida de control por riego y eficiencia por lluvia para la reducción de emisiones.

$$\eta_r = 100 - \left(\frac{0.8pdt}{i} \right) \quad (3)$$

$$\eta_{ll} = \left(\frac{n-m}{n} \right) \quad (4)$$

Donde:

η_r Eficiencia en la medida de control por riego

p Velocidad de evaporación diaria (mm/h)

d Promedio diario de tráfico (mm/h)

t Tiempo promedio entre las aplicaciones del riego

i Intensidad de la aplicación (L/m^2)

η_{ll} Eficiencia de la lluvia para mitigar las emisiones de material particulado

n Número de días en el periodo evaluado

m Número días lluvia en el periodo con niveles de precipitación que superan 0.254mm

- **AERMOD**

AERMOD (American Meteorology Society- EPA Regulatory Model) es un modelo gaussiano desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, este es un modelo de pluma, de estado estacionario que asume que las concentraciones en todas las distancias están gobernadas por la meteorología promedio de una hora (Cabreara & Grutter, 2008).

Un modelo gaussiano asume que bajo condiciones de estabilidad la distribución de concentraciones sigue una distribución normal tanto en la vertical como horizontal en un plano yz, bajo una capa límite convectiva la distribución seguirá siendo gaussiana en el eje horizontal, pero se asumirá bigaussiana en el eje vertical (US EPA, 2004). Este modelo ha tenido alta aceptación por su simplicidad pero tiene como desventaja el ser poco exacto con velocidades menores a 1m/s (ITESM, 2008).

Para aplicar el modelo AERMOD hay que tener en cuenta que este cuenta con diferentes módulos para preprocesar la información: AERMAP Y AERMET.

- **Preprocesador AERMAP**

AERMAP es el preprocesador de datos de terreno y se encarga de emplear la información topográfica para calcular la influencia del terreno en la dispersión. Es utilizado también para generar información de la altura de los receptores y crear la grilla para que las concentraciones en estos puedan ser evaluadas. Al ejecutar el modelo, AERMAP suministra la información acerca de ubicación de los receptores en coordenadas, altura promedio sobre el nivel del mar y la escala y altura del terreno para un receptor en específico (Cabreara & Grutter, 2008).

La información referente a elevación digital, uso y cobertura de suelos se encuentra disponible de manera libre online en bases de datos como WebGis y ASG (Atmospheric Studies Group). Estas cuentan con datos tipo SRTM30/GTOPO30, SRTM3, SRTM1, 7.5-min DEM, 1-deg, DEM para elevación digital y GLCC, Lambert Azimuthal LULC Data, USGS CTG LULC Data, USGS NLCD 92 Data) para información de usos de suelos (ITESM, 2008).

- **Preprocesador AERMET**

AERMET corresponde al preprocesador de información meteorológica. Este se encarga de utilizar las mediciones de parámetros como temperatura, nubosidad, velocidad y dirección del viento y radiación solar, entre otros para calcular la altura de la capa límite planetaria (US EPA, 2004).

La capa límite planetaria es la región entre la superficie de la tierra y la atmósfera, en donde su profundidad está definida en una escala local por las características como albedo, rugosidad superficial y razón de Bowen. A partir de tales valores y de variables observadas, AERMET calcula diferentes parámetros que ayudan a definir la altura de la capa límite planetaria (US EPA, 2004).

Este pre-procesador requiere como información de entrada datos diarios de radio-sondeos, más no siempre es posible contar con tal información, razón por la cual se ha optado por utilizar los algoritmos propuestos en el manual de uso de AERMET utilizados para calcular los parámetros que definen la altura de la capa límite planetaria. Dicho método para estimar parámetros secundarios ya ha sido implementado en otros estudios encontrando buenas similitudes al comparar sus resultados con la metodología implementada por el IDEAM (Huertas C, Huertas B, Izquierdo, & González, 2011).

De modo que si se organiza la información meteorológica correctamente se realicen manualmente los cálculos que realiza AERMET, procedimiento que se divide en dos aspectos conocidos como pre-procesamiento primario y pre-procesamiento secundario de parámetros meteorológicos. En dicho orden, es necesario guiarse por los siguientes aspectos (ITESM, 2008):

- ✓ Verificar la disponibilidad de datos e identificar los parámetros que registran las estaciones que se lleguen a utilizar.
- ✓ Realizar el procesamiento de los parámetros primarios a fin de obtener un valor horario.
- ✓ Calcular los parámetros secundarios como se indicará a continuación.
- ✓ Elaborar los archivos meteorológicos Surface y Profile a fin de que estos sean procesados en AERMET.

- *Disponibilidad de datos*

En cuanto a la disponibilidad de los datos, para ejecutar el modelo AERMOD se requiere información de temperatura, velocidad del viento, dirección del viento, radiación solar y nubosidad. En caso de no contar con todos los datos para cada hora de cada día del año, será necesario utilizar métodos que permitan calcular los datos faltantes.

- *Pre-procesamiento primario*

En cuanto al procesamiento de datos primarios se debe tener en cuenta que las estaciones registran datos cada 1, 5, 10, 30 y 60 minutos. De modo que se deberán procesar los datos a fin de obtener un valor horario de cada parámetro. En cuanto a los valores de velocidad del viento y temperatura se recomienda calcular el promedio geométrico de los datos. En cuanto a parámetros de nubosidad, radiación y velocidad del viento se deberán utilizar ecuaciones que permitan obtener dicho valor.

- *Pre-procesamiento secundario*

Para el procesamiento de parámetros secundarios es posible utilizar las ecuaciones propuestas en el manual del *módulo AERMET* y adicionalmente recomendadas por la *Guía de Modelación de Calidad de Aire Presentadas a Continuación* (2008), algunas de estas ecuaciones son presentadas en la Tabla 3.

- ✓ Escala de velocidad convectiva: Velocidad del viento generada por turbulencia convectiva, esta depende principalmente del flujo de calor superficial y de la altura de mezcla convectiva (ITESM, 2008).
- ✓ Velocidad de fricción superficial: Es una escala de velocidad definida como la raíz cuadrada del cociente entre el esfuerzo tangencial en la superficie y la velocidad del aire. Valores altos en la velocidad de fricción indican elevada turbulencia y mayor mezcla de contaminantes (Marrero & Kowalski, 2011).

- ✓ Flujo de calor latente: Cuando el suelo húmedo absorbe la radiación solar se produce evaporación, una eliminación del calor en forma de calor latente (Núñez & Rodriguez, 2002).
- ✓ Flujo de calor sensible: Variable que indica el transporte vertical de calor desde o hacia la superficie (US EPA, 2004).
- ✓ Altura de mezcla: Zona inferior de la atmósfera donde se desarrolla el proceso de dispersión y mezcla de contaminantes debido a fenómenos turbulentos asociados a desequilibrios térmicos y mecánicos (ITESM, 2008).
 - Altura de mezcla convectiva: Altura de capa generada por la acción del viento
 - Altura de mezcla mecánica: Altura de capa generada por los efectos del calor sensible.
- ✓ Longitud de Monin-Obukhov: Es una medida de estabilidad atmosférica definida como la altura sobre el terreno en el que la turbulencia producida por efectos mecánicos es contrarrestada por los efectos negativos de la flotabilidad. Valores negativos indican una atmósfera inestable y positivos estable (Marrero & Kowalski, 2011).

En el cálculo de parámetros secundarios es indispensable el uso de parámetros que definen las características de la superficie, tales como razón de bowen, albedo y longitud de rugosidad superficial explicados a continuación.

- ✓ Razón de Bowen: Variable adimensional que representa la relación entre el flujo de calor sensible y flujo de calor latente (US EPA, 2004). Depende de la humedad del suelo, razón por la cual varía temporal y espacialmente, adquiriendo valores altos cuando se trata de superficies secas y bajos para superficies húmedas (US EPA, 2004).
- ✓ Longitud de rugosidad superficial: Variable relacionada a la altura de los obstáculos al flujo libre del viento, en otras palabras corresponde a la altura promedio a la cual la velocidad del viento es cero. El rango de valores se encuentra desde 0.001m sobre una superficie de agua en calma hasta 1m o más en presencia de bosques o un área urbana (US EPA, 2004).
- ✓ Albedo: Variable que representa la fracción de radiación solar total incidente que es reflejada y dispersada por la superficie hacia la atmósfera sin absorción (US EPA, 2004). Los valores más comunes se encuentran entre 0.1 y 0.9, siendo 0.1 un bosque caducifolio y 0.9 nieve fresca (US EPA, 2004).

Tabla 3 Ecuaciones para estimar las variables meteorológicas secundarias usadas dentro de los modelos de calidad del aire

Modelo	Cálculo de parámetros secundarios
--------	-----------------------------------

Modelo	Cálculo de parámetros secundarios	
<p>Altura de la capa de mezcla</p> <ul style="list-style-type: none"> $h_{mix} = \text{Max}(h_{mec}, h_{mix})$ en horas del día) $h_{mix} = h_{mec}$ en horas de la noche 	<p>$h_{mec} = 1330 u_*$</p> <p>$h_{conv} = \sqrt{(z_i)_{t1}^2 + \frac{2.4 H_o \cdot (t2-t1)}{\Gamma \cdot (z_i)_{t1} \cdot \rho \cdot C_p}}$</p> <p>Velocidad de fricción horas diurnas</p> <p>$u_* = u_o \cdot \left[1 + a \cdot \ln\left(1 + b \frac{Q_o}{Q_*}\right) \right]$</p>	<ul style="list-style-type: none"> $u_o = k u \ln\left(\frac{z_o}{z_m}\right)$ $z_m = z_r - 4 \cdot z_o$ $Q_o = \frac{H_o}{\rho \cdot C_p}$ $H_o = 0.3 \cdot R_g + A$ $A = 2.4 \cdot N - 25.5$ $Q_* = \frac{T \cdot u_o^3}{k \cdot g \cdot z_m}$ $a = \begin{cases} 0.128 + 0.005 \ln\left(\frac{z_o}{z_m}\right) & \text{si } \frac{z_o}{z_m} \leq 0.01 \\ 0.107 & \text{si } \frac{z_o}{z_m} > 0.01 \end{cases}$ $b = 1.95 + 32.6 \cdot \left(\frac{z_o}{z_m}\right)$
	<p>Velocidad de fricción en horas nocturnas</p> <p>$u_* = \frac{C_{DN} \cdot u}{2} \cdot (1 + \sqrt{C})$</p>	<ul style="list-style-type: none"> $C_{DN} = k \ln\left(\frac{z_o}{z_m}\right)$ $C = 1 - \frac{4 \cdot u_o^2}{C_{DN} \cdot u^2}$ $u_o^2 = \frac{\Gamma \cdot z_m}{k \cdot A}$ $A = 1100$
Radiación global y neta	<p>$R_{global} = (a_1 \sin \psi + a_2) \cdot (1 + b_1 N^{b_2})$</p>	<p>$a1$ 990</p> <p>$a2$ -30</p> <p>$b1$ -75</p> <p>$b2$ 3.4</p> <p>ψ Ángulo de elevación solar</p>
	<p>$\sin \Psi = \sin \phi \cdot \sin \delta - \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \left[\left(\frac{\pi \cdot t_{utc}}{12} \right) - \lambda_e \right]$</p>	<p>ϕ latitud del lugar [rad]</p> <p>λ_e longitud del lugar [rad]</p> <p>t_{utc} Diferencia entre la hora local y la hora de la zona</p>

Modelo	Cálculo de parámetros secundarios	
		δ <i>ángulo de declinación solar</i>
	$\delta = \phi_r \cdot \cos \left[\frac{2\pi \cdot (d - d_r)}{d_y} \right]$	ϕ_r <i>Latitud del trópico de cáncer</i> d <i>día juliano</i> d_r <i>día 173</i> d_y <i>Número de días del año</i>
	$R_{neta} = \frac{(1 - \alpha) \cdot R_g + c_1 T^6 + c_2 N - \sigma T^4}{1 + c_3}$	T <i>Temperatura del aire [K]</i> α <i>Coefficiente de albedo</i> $c1$ <i>Constante de valor 5.31x10⁻¹³</i> $c2$ <i>Constante de valor 60</i> $c3$ <i>Constante de valor 0.12</i> σ <i>Constante de Stefan Boltzman 5.67x10⁻⁸</i>
<i>Longitud de monin Obukhov</i>	<i>Horas diurnas</i> $L = \frac{T \cdot u_*^2}{k \cdot g \cdot T_*}$ <i>Horas nocturnas</i> $L = A \cdot u_*^2$ $A = 1100$	$T_* = - \frac{H_o}{\rho \cdot Cp \cdot u_*}$ $H_o = 0.3 \cdot R_g + A$ $A = 2.4 \cdot N - 25.5$

Modelo	Cálculo de parámetros secundarios	
T	Temperatura del aire [K]	
g	Constante gravitacional 9.81 [m/s ²]	
T^*	Temperatura de escala	h_{mix} Altura de la capa de mezcla[m]
Ho	Flujo de calor sensible	h_{mec} Altura de la capa de mezcla generada por turbulencia mecánica [m]
u	Velocidad del viento [m/s]	h_{cov} Altura de la capa de mezcla generada por difusión convectiva [m]
u^*	Velocidad de fricción [m/s]	Z_r Altura del anemómetro [m]
ρ	Densidad del aire [kg/m ³]	Z_o Rugosidad superficial [m]
C_p	Calor específico del aire a presión constante [kJ/kg-k]	K Constante de Von Karman (valor típico 0.41)
N	Nubosidad en octas	Ho Flujo de calor sensible
$t1$	Tiempo anterior	R_g Radiación global [w/m ²]
$t2$	Tiempo actual	Γ Gradiente potencial de temperatura sobre la capa de mezcla (valor típico 10 K/km)

Fuente (ITESM, 2008)

▪ Estructura de archivos Surface y profile

El archivo Surface contiene la información de temperatura, altura de referencia y parámetros secundarios que determinarán la capa límite planetaria, por lo cual dicho archivo deberá contar con los siguientes datos: Año, mes, día, día del año, hora, flujo de calor sensible, fricción superficial, escala de velocidad convectiva, gradiente de temperatura vertical, altura de mezcla mecánica, altura de mezcla convectiva, longitud de Monin-Obukhov, rugosidad superficial, Bowen, Albedo, velocidad del viento, dirección del viento, medida de altura de velocidad y dirección, temperatura y altura de medición de la temperatura.

El archivo Profile contiene la información de uno o más niveles (perfiles) de vientos, temperatura y desviación estándar. Por lo anterior el archivo profile deberá contener datos de: Año, mes, día, hora, altura de medición, flanco (altura de medición más alta), dirección del viento en el nivel, velocidad del viento en el nivel, temperatura en el nivel, desviación estándar de la dirección del viento en el nivel y desviación estándar de la velocidad del viento en el nivel.

11.2 Marco Legal

Tabla 4 Normas de calidad de aire e impacto ambiental involucradas para el presente proyecto

NORMA	CONTENIDO	RELACIÓN
Decreto Ley 2811 –	Regulación del uso y manejo de	Es responsabilidad del Gobierno

NORMA	CONTENIDO	RELACIÓN
1974 (Código RN)	los recursos naturales renovables, definición de los componentes de la política ambiental	mantener la atmósfera en unas condiciones especiales que no generen molestias o perjuicios a los recursos naturales renovables.
Resolución 601 de 2006 (Modificada por la Resolución 610 de 2010)	Medición de contaminantes criterio según Protocolo IDEAM	Definición límite PM10, inicio medición TSP y PM 2.5
Resolución 910 de 2008	Reglamentación de niveles permisibles de emisión de contaminantes para fuentes móviles terrestres	Definición límites emisiones CO y HC y opacidad,
Resolución MAVDT 0650 de 2010 Protocolo Nacional	Adopción del Protocolo para el Monitoreo y cSeguimiento de la Calidad del aire	Definición de las directrices, metodologías y procedimientos de seguimiento y monitoreo de la calidad del aire.

11.3 Marco de antecedentes

Muchos de los estudios realizados por algunos autores en el tema de vías no pavimentadas han estado enfocados en proponer factores de emisión que permitan la estimación de emisiones a partir de diferentes métodos ya que según algunos estudios los factores de emisión de la EPA tienden a sobreestimar las emisiones (Venkatram, Fitz, Bumiller, Du, & Boeck, 1998).

Sin embargo, pocos autores se han dedicado a estimar el perfil de concentraciones alrededor de una vía sin pavimentar o generar métodos que permitan estimar su área de influencia. Algunos de los estudios propuestos para estimar emisiones tanto para vías pavimentadas como no pavimentadas son mencionados a continuación. Estos además de permitir conocer diferentes métodos de estimación de emisiones también permiten conocer el comportamiento de las emisiones, las variables a las cuales dependen y la forma en que son generadas.

Métodos se han desarrollado para estimar emisiones, más pocas veces se evalúa cuál es el más apropiado para un determinado contaminante o unas condiciones dadas. Partiendo desde registros de 1990, Clairborn et al (1995) evalúan las concentraciones de vías pavimentadas y no pavimentadas vientos abajo por medio del uso de concentraciones conocidas de un trazador inerte teniendo en cuenta las características del flujo vehicular y meteorología del lugar, encontrando que el comportamiento de estos es muy similar al comportamiento de las partículas de PM10, por lo cual se concluye que el uso de trazadores resulta útil para conocer la dispersión de emisiones de PM10 y puede ser útil para mejorar inventarios de emisiones

No contentos con el uso de trazadores, Venkatram et al (1998) se encargan de realizar mediciones de material particulado en una vía pavimentada de California con el fin de estimar emisiones de PM10 incluyendo mediciones de perfiles verticales de PM10 vientos arriba y vientos abajo a fin de proponer un modelo que incorpora análisis micro-meteorología y dispersión. A partir de dicho estudio se pudieron determinar factores de emisión para avenidas y calles de ciudad, determinando que cerca del 30% del total de emisiones de PM10 proviene de vías pavimentadas.

Dos años después, Kuhns et al (2000) proponen un novedoso método conocido como TRAKER por sus siglas en inglés (Testing Re-entrained Aerosols Kinetic Emissions from Roads) a fin de desarrollar una metodología para medir la concentración de PM10 en caminos y así obtener una estimación espacial del potencial de una vía para emitir polvo más representativa que la propuesta por la EPA en el método AP-42. Tal metodología se basa en la evaluación de la cinética de las emisiones con enfoque en aerosoles y permite la medición en tiempo real de las emisiones a partir de sensores colocados dentro de un vehículo en movimiento.

Si bien, a partir del uso de TRAKER se concluye que permite tener una perspectiva de las fuentes de material particulado en el camino y su distribución espacial, para representar el potencial de la emisión se necesita un alto número de muestras debido a que la distribución del material suspendido en avenidas es altamente variable.

Por lo tanto, continuando el mismo estudio Etyemezian et al (2003), emplean el método TRAKER para determinar el potencial de las emisiones y realizar un inventario en el área evaluada. A partir de este se determinó que sí hay dependencia de las emisiones con la velocidad de vehículos, ubicación del área de estudio, volumen de tráfico y estación. Si bien no fue posible medir el impacto por volumen de tráfico, sí se pudo determinar que la variable velocidad del vehículo era más relevante al momento de evaluar el potencial de la emisión que la variable volumen de vehículos en la vía. De igual forma se determinó que vías de alta velocidad tienen un menor potencial de emisiones, lo que implica que las emisiones por kilómetro recorrido en una vía limpia con vehículos viajando a alta velocidad es comparable con una vía sucia y vehículos viajando a velocidad.

Años más tarde, buscando obtener mayor precisión en el cálculo de emisiones de material particulado Gillies et al (2004) continúan el desarrollo de factores de emisión, en este caso para distintas categorías vehiculares evaluando especialmente la influencia del vehículo en las emisiones sobre la vía. Para esto, desarrollaron un estudio en el estado de Texas en el cual se evalúa la advección del material particulado PM10, alrededor de una vía no pavimentada determinando que las emisiones dependen principalmente del peso del vehículo y de su velocidad, más no de características físicas como número de ruedas, tren de aterrizaje, área, altura, entre otros.

Gracias a estudios como los mencionados anteriormente es posible conocer los factores de los que depende una emisión y a su vez diferentes métodos de estimación, sin embargo ¿De qué manera conocer su destino y el tiempo promedio que permanece dicha emisión en el aire?

Khare et al (2002) presentan un resumen de diferentes modelos desarrollados por la EPA y otras instituciones de investigación que permiten evaluar la distribución temporal y espacial de emisiones vehiculares provenientes principalmente del exhosto. Estos modelos se resumen en determinísticos, numéricos, estadísticos y de redes neurales artificiales. En cuanto a los modelos estadísticos o estocásticos se menciona que son aquellos obtenidos a partir del procesamiento de información meteorológica, tráfico vehicular y concentraciones experimentales obteniendo una relación estadística luego de realizar múltiples regresiones. Se presentan algunos ejemplos de trabajos realizados a partir de modelos estocásticos y mencionan que las limitaciones de este tipo de modelos es que suelen aplicarse para un lugar específico, suelen estar basados en flujo vehicular homogéneo (lo que reduce su exactitud) y suelen funcionar erróneamente con datos altamente no lineales.

Algunos autores se han dedicado a aplicar y comparar modelos propuestos por la EPA u otras organizaciones, evaluando qué tanto puede un modelo llegar a sobreestimar o subestimar las concentraciones. Venkatram et al (2004) realizan la comparación de los modelos AERMOD-PRIME y ISC-PRIME contra mediciones experimentales encontrando que estos tienden a sobreestimar las concentraciones cuando la desviación del viento tiende a ser cero sobre la línea de receptores y a subestimar las concentraciones a ángulos mayores.

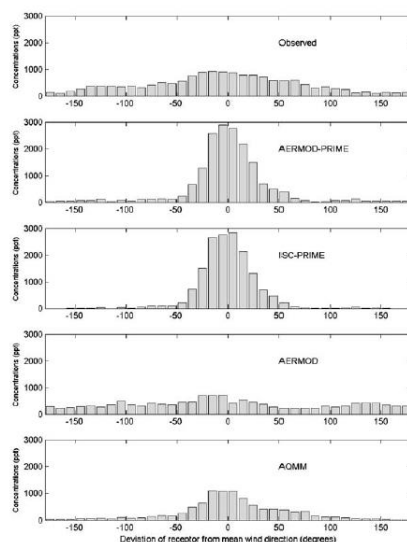


Ilustración 1 Desviación de los receptores de la velocidad del viento promedio
(Venkatram, Isakov, Yuan, & Pankratz, 2004)

Levitin et al (2005) realizan la comparación de los modelos CALINE y CAR-FMI contra datos experimentales, evaluando NO_2 , NO y O_3 , los resultados de ambos modelos fueron mejores a 34m y no a 17m de la vía. Los modelos fueron también analizados en términos de velocidad y dirección del viento, encontrando en ambos casos que cuando la velocidad del viento disminuía y cuando la dirección del viento era paralela a la vía los resultados eran poco confiables. El área de estudio se presenta en la Ilustración 2, y está caracterizada por ser terreno plano y homogéneo con pocas construcciones y obstáculos.

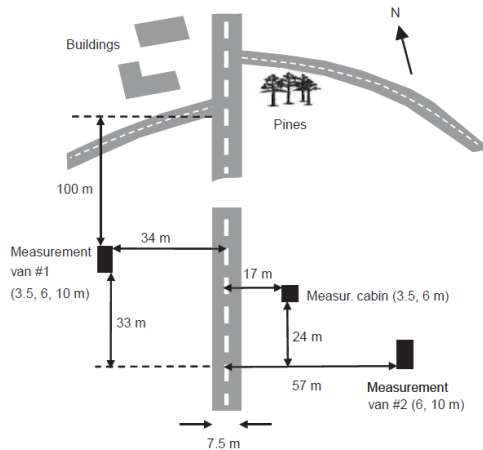


Ilustración 2 Bosquejo de la vía analizada por Levitin et al (2005)

Otros autores emplean únicamente el modelo CALINE y lo verifican con datos experimentales (Kenty et al, 2006; Yura et al, 2007), Snyder et al (2013) reemplazan CALINE por RLINE, evaluando en todos los casos fortalezas, ventajas y desventajas de los modelos. Estos estudios son resumidos a continuación. Kenty et al (2006) aplican CALINE para evaluar las concentraciones de NO y NO₂ alrededor de una vía cerca del puente Gandy en Tampa, Florida. A partir de esto se obtuvo que el modelo representaba correctamente concentraciones de NO_x, pero sub-predice concentraciones de O₃ y NO. La zona y puntos de estudio se representan en la Ilustración 3.

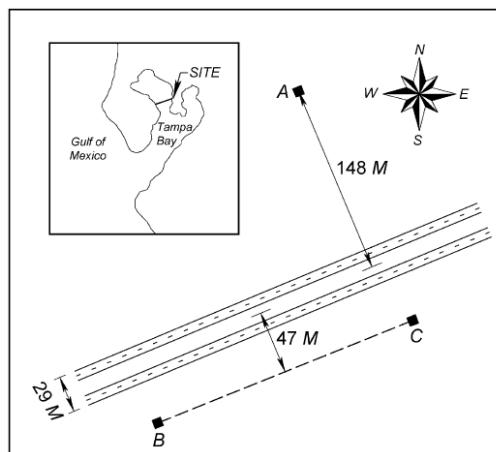


Ilustración 3 Bosquejo del área evaluada por Kenty et al (2006)

Yura et al (2007) comparan datos modelados utilizando CALINE con datos experimentales de PM₁₀ en un área urbana y otra rural. A partir de este se observó que hay correlación entre los datos observados y los que arroja el modelo. Se menciona que CALINE no es exacto al momento de predecir concentraciones en áreas muy pobladas, que es un modelo que se ve afectado por variaciones en la topografía, y que no resulta ser útil en la modelación de áreas

de alto tráfico. Se sugiere realizar más estudios a fin de evaluar la utilidad de CALINE para predecir PM_{2.5}. La representación de la vía evaluada en este estudio se presenta en la Ilustración 4.

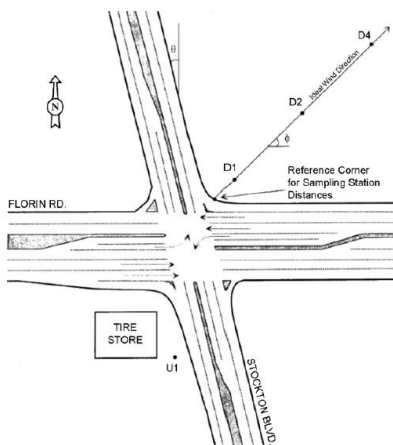


Ilustración 4 Bosquejo de la zona urbana evaluada. En esta se presentan tres receptores ubicados a 45° de la vía principal. (Yura, Kear, & Niemieier, 2007)

Bajo las condiciones topográficas tenidas no se obtuvieron buenos resultados para el área urbana evaluada. Para el área rural se encontró que el modelo era útil cuando el receptor se ubicaba cerca a la fuente y al suelo, no se obtuvieron buenos resultados fuera de estas condiciones. Por lo tanto CALINE puede ser útil en la predicción de emisiones en áreas rurales más no en áreas urbanas ni en áreas con alta turbulencia de viento y topografía accidentada.

Snyder et al (2013) utilizan el modelo de dispersión para fuentes lineales RLINE con el fin de evaluar concentraciones cercanas a la superficie. Este modelo fue evaluado en el año 2008 en el estado de Idaho, se encontró que el modelo arrojaba buenos resultados para la mayoría de condiciones meteorológicas con tendencia a sub-predecir concentraciones. En este estudio se comparó este modelo con puntos observados sobre una avenida en Sacramento California a partir de trazadores encontrando que el modelo es útil para predecir concentraciones vientos abajo con tendencia a sobre predecir datos. Se pudo determinar también que el modelo no representa correctamente concentraciones vientos arriba ni condiciones ligeras de viento ya que presenta tendencia a sobre-predecir datos. Este modelo se desarrolló para carreteras planas y sin ningún tipo de construcciones alrededor; sin embargo este se podría adaptar a otras condiciones. Investigaciones se están desarrollando para poder evaluar algunas configuraciones complejas en carretera como vegetación, barreras de ruido y carreteras con depresiones.

Buscando mejorar, suplir y corregir falencias de los modelos evaluados, otros autores han empezado a desarrollar modelos que permitan al igual que un modelo de dispersión estimar las emisiones en una vía.

En el año 2005, Venkatram et al evalúan expresiones analíticas propuestas por otros autores y proponen una ecuación mejorada que permita conocer concentraciones en un punto y ángulo dado con respecto a la vía evaluada. La vía es asumida como fuente lineal y resulta ser un conjunto de muchas fuentes puntuales, de forma que la concentración se pueda representar dentro de una expresión analítica. Si bien aún no se ha podido determinar una expresión exacta que permita conocer las concentraciones provenientes de una fuente lineal a un ángulo arbitrario a la fuente se evalúan las bases de las expresiones propuestas por Calder (1973), Luhar (1989) y Esplin (1995) y el comportamiento del perfil de concentraciones normalizadas se compara con método numérico y el método propuesto por los autores. Encontrando que en comparación con el método numérico el método propuesto por los autores presenta mejores resultados ya que solo se obtienen errores mayores a 1% cuando se presentan concentraciones menores a 10^{-2} y errores que exceden el 10% con concentraciones menores a 10^{-3} .

Un año más tarde, Sahlodina et al desarrollan un modelo matemático de dispersión en vías empleando como herramienta el software CFD (computational fluid dynamics) incluyendo la turbulencia inducida por el vehículo y tomando como base el modelo de dispersión gaussiana. Como se presenta en la Ilustración 5, el modelo fue validado contra datos experimentales de monóxido de carbono a diferentes puntos vientos debajo de la vía. Se propone el uso del modelo para predecir la dispersión y deposición de material para cualquier tipo de vía y tráfico.

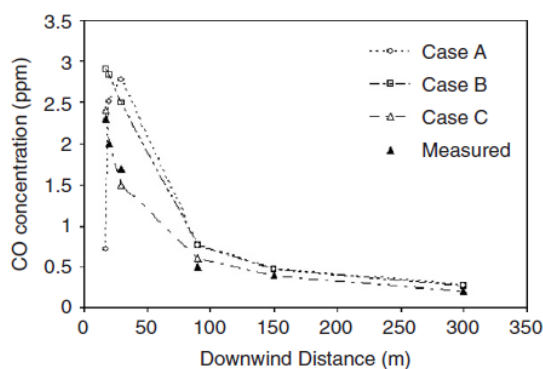


Ilustración 5 Perfil de concentraciones para monóxido de carbono a partir del modelo propuesto en el estudio y datos experimentales (Sahdolina, Sotudeh-Gharebagha, & Zhub, 2006)

Barrett et al (2009) se encargan de desarrollar algoritmos computacionales eficientes que permitan evaluar la dispersión de contaminantes de largo plazo provenientes de fuentes lineales y de área. Debido a la necesidad de modelar grandes áreas, como aeropuertos, se hace necesaria la presencia de herramientas que permitan rapidez en las modelaciones y tengan un menor gasto computacional en comparación con algunos modelos de dispersión ya existentes. Las soluciones analíticas halladas están basadas en la función hipergeométrica de Gauss, con las cuales se obtuvieron muy buenos resultados. Se menciona que para algunas modelaciones realizadas las aproximaciones analíticas planteadas han resultado ser 99.98%

más rápidas en el cálculo que softwares como AERMOD. Este nivel de eficiencia computacional permite análisis de contaminantes a mayor escala.

Sin embargo los estudios se han enfocado en su mayoría en la estimación de concentraciones provenientes del tubo de escape y no en la resuspensión del material particulado. Por otro lado se enfocan principalmente en desarrollar un modelo mas no se presentan aplicaciones de los mismos

Por otro lado, autores mencionan que sus métodos pueden ser utilizados para diferentes contaminantes a pesar de ser diseñados para concentraciones que salen del tubo de escape. Venkatram et al (2007) proponen una función para estimar concentraciones a partir de las concentraciones medidas en campo de NO más no se encuentra una función específica para el cálculo de material particulado por resuspensión en vías.

El estudio que más se acerca a la evaluación de un perfil de concentraciones en la distancia a la vía es el realizado por Venkatram et al (2013) en el cual se evalúa la influencia de la dirección del viento en la dispersión de contaminantes. Teniendo en cuenta tres casos evaluados en tres vías de Estados Unidos. Para estos se registran las concentraciones a lo largo de las vías por medio de trazadores, mediciones en campo y uso de modelos de dispersión. En primer lugar se valida el modelo con los datos de campo, y en segundo lugar se utiliza el modelo para realizar estudios de sensibilidad y evaluar la influencia de la dirección del viento. Las Ilustraciones 6 y 7 ejemplifican el procedimiento llevado a cabo en el estudio.

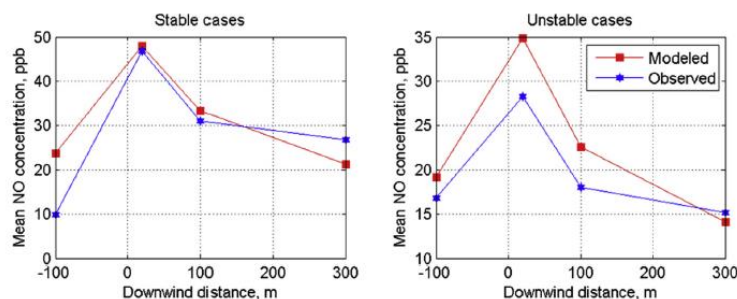


Ilustración 6 Comparación de concentraciones de NO obtenidas a partir del modelo y sus correspondientes observaciones en campo.
(Venkatram, Snyder, Isakov, & Kimbrough, 2013)

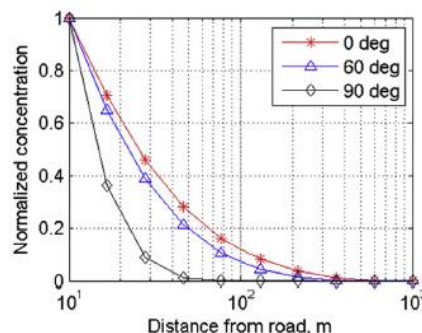


Ilustración 7 Variación de las concentraciones normalizadas a diferentes direcciones del viento con respecto a una línea perpendicular a la vía
(Venkatram, Snyder, Isakov, & Kimbrough, 2013)

A partir del anterior estudio se encontró que las concentraciones de los contaminantes incrementaban cuando la dirección del viento se acercaba a ser paralela a la vía. Únicamente se encontró que para contaminantes de vida corta las concentraciones tendían a ser máximas cuando la dirección del viento era perpendicular a la vía. De igual forma se llegó a la conclusión de que los modelos de calidad de aire son útiles al momento de querer conocer la dispersión de contaminantes.

▪ Antecedentes en Colombia

En Colombia no se encuentran estudios documentados para determinar el área de influencia en vías no pavimentadas por resuspensión de material particulado. La normatividad colombiana estipula la necesidad en la evaluación de impactos ambientales a proyectos del sector infraestructura y aunque en estos se estipule la importancia de la delimitación del área de influencia ambiental, no hay una metodología estandarizada ni se proponen metodologías que permitan determinarla.

Por ejemplo la guía de impacto ambiental del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible menciona los tipos de control que deben llevar a cabo las empresas al construir vías para mitigar los impactos que se generen; también menciona la necesidad de tener un inventario de puntos de contaminación en el AID (área de influencia directa) y de haber presentes centros poblados realizar monitoreos de calidad de aire especificando cantidad y tipo de contaminantes.

Por otro lado, en los términos de referencia del sector infraestructura se define el área de influencia como “aquella donde se manifiestan los impactos generados por las actividades de construcción y operación de mismo un proyecto y está relacionada con el corredor vial y su infraestructura asociada” (Ministerio de ambiente y Desarrollo Sostenible, 2009).

En cuanto a estudios realizados para estimar la resuspensión de material particulado en vías no pavimentadas en Colombia se encuentran estudios realizados en zonas mineras. Huertas et al (2011) realizaron el inventario de emisiones para 7 de 8 empresas mineras que operan al norte de Colombia. A partir de dicho estudio se encontró que cerca del 26% de PST y 13%

de PM10 en el aire proviene de la resuspensión de material particulado en vías, tales porcentajes clasificaron el transporte en vías no pavimentadas como la actividad minera que más aporta emisiones a la atmósfera.

Más específicamente en la ciudad de Bogotá Rojas et al (2012) estimaron las emisiones de material particulado PM10 y PM2.5 por resuspensión de polvo y abrasión en Bogotá, encontrando que cerca del 40% de PM2.5 emitido en la ciudad proviene de este tipo de fuentes en donde cerca del 80% es aportado por vehículos de carga pesada.

En cuanto a la evaluación de emisiones de material particulado se encuentran evaluaciones a planes de manejo ambiental realizados por la Universidad de La Salle en proyectos de vías en construcción, donde generalmente uno de los mayores impactos resulta ser el aumento de las concentraciones en la zona por la emisión de contaminantes.

Romero et al (2010) realizan la evaluación y seguimiento al plan de manejo ambiental del proyecto doble calzada en el tramo Altos de Zaragoza-Triana-Quebrada limones, Departamento del valle del cauca presentan propuestas para prevenir, controlar y mitigar impactos no previstos en el plan de manejo ambiental. En esta evaluación se consideraron las condiciones socio-ambientales dentro del área de influencia, se identifican comunidades indígenas asentadas en el área como Nasa Kiwi y Embera Chami y áreas de reserva forestal. De igual forma se identifica que uno de los impactos más significativos es el incremento de concentraciones en la zona debido a emisiones de material particulado, monóxido y dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno entre otros, por la presencia de maquinaria y equipos necesarios para las actividades constructivas. Sin embargo, a pesar de que se mencionan monitoreos de calidad de aire no se menciona cómo tales emisiones pueden llegar a variar el área de influencia propuesta inicialmente. Considerar tales aspectos debe ser importante para que al momento de proponer medidas de control estas sean eficientes.}

Más adelante, Velasquez et al (2011) conociendo los impactos generados en la construcción de vías como emisiones de material particulado y ruido, desarrollan la evaluación técnico ambiental del plan de manejo ambiental para la fase de construcción del proyecto construcción de la calzada sur de la avenida San José, desde la avenida Boyacá hasta Avenida Cota. A partir de esta evaluación se identifica que con la construcción de la vía sí se genera incremento en la emisión de material particulado e incremento en las emisiones de gases por fuentes móviles; se menciona que se realizó el análisis de los impactos del proyecto considerando escenarios con proyecto, sin proyecto, con medidas ambientales y sin medidas ambientales, mas no se presentan resultados ni se justifica de qué manera tales escenarios influyeron en la delimitación del área de influencia. En cuanto al área de influencia directa (AID) se menciona que esta involucra el área donde se desarrolla la fase de construcción y que se evaluaron los componentes geosférico y biótico definiendo así un AID de 1.8 Ha.

Por otro lado, Gamboa (2008) desarrolla un software a partir de modelos, algoritmos y ecuaciones matemáticas para evaluar el impacto que el desarrollo de un proyecto puede causar en el ambiente. A partir de este software el evaluador selecciona el recurso que se

requiera analizar y puede determinar los valores del impacto ambiental. En cuanto a recurso aire el software incluye ecuaciones que definen modelos sencillos para fuentes específicas, modelo de caja fría, modelo gaussiano, modelo pasquill-gifford, entre otros. La información para solucionar tales ecuaciones se solicita al usuario; el programa desarrolla la ecuación y a partir del valor hallado el software otorga un puntaje dentro de rangos definidos para estimar el grado de impacto. Si bien en este estudio se desarrolla una metodología para estimar cuantitativamente el impacto ambiental generado por un determinado proyecto, no se incluye dentro de este la delimitación del área de influencia a partir de los índices y concentraciones que se calculan.

- **Antecedentes del proyecto a realizar**

El presente proyecto cuenta con una trayectoria desarrollada por la empresa de consultoría CAIA, la Asociación Colombiana del Petróleo ACP y el Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz del Tecnológico de Monterrey CIMA en dirección del doctor José Ignacio Huertas y la doctora María Elena Huertas, quienes inicialmente desarrollaron un estudio para estimar las concentraciones de material particulado a lo largo de la vía y determinar el área de influencia de este contaminante en la zonas evaluadas utilizando el modelo de dispersión AERMOD. Sin embargo a fin de dar continuidad y ampliar el proyecto, se han encargado de pre-procesar y procesar la información de entrada al modelo de calidad de aire, procesar los datos experimentales con los cuales comparar los resultados del modelo y fundamentar los pasos para hallar la metodología que permita llegar a determinar el área de influencia.

En este estudio, se toman como casos de evaluación dos tramos viales de Meta y Casanare ubicados en el municipio de Puerto Gaitán, departamento del Meta y Municipio de Quebrada Seca, departamento del Casanare. Para el presente estudio se tomará únicamente el tramo ubicado en el departamento de Casanare.

La propuesta de desarrollar una metodología que estimara el área de influencia por material particulado en una vía no pavimentada inició tiempo atrás, para lo cual se había hecho uso del perfil de concentraciones perpendicular a la vía partiendo de los datos experimentales de la zona.

- **Tendencia de las concentraciones experimentales**

El comportamiento de las concentraciones fue analizado con la ayuda de Excel, en donde por medio del análisis de diferentes funciones, se llegó a la conclusión que la función que mejor se ajustaba a los datos experimentales era la función Gamma, como se presenta en la Ilustración 8.

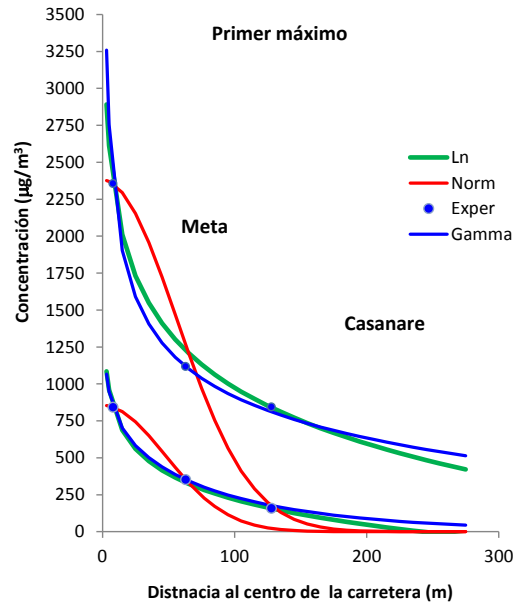


Ilustración 8 Análisis de datos experimentales por medio de diferentes funciones
Fuente (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

○ Propuesta método screening

La función que se llegó a proponer para estimar el perfil de concentración se presenta a continuación en la ecuación 5:

$$C(\mu\text{g}/\text{m}^3) = E \cdot F_d \cdot \text{Gamma}(\alpha, \beta) \quad (5)$$

En donde la concentración C depende de la emisión de la zona, F_d de un factor de dispersión obtenido a partir de datos experimentales y de una función Gamma que representa la tendencia de los datos y depende de unos parámetros α y β .

Sin embargo al desear desarrollar un método era necesario evaluar que bajo diferentes circunstancias (como condiciones meteorológicas) dicha función continuara siendo la misma o se pudiera definir en términos de alguna otra variable, para lo cual se decidió desarrollar el presente estudio, en el que se asume un caso con geografía constante, emisiones constantes y parámetros meteorológicos variables como se explicará más a fondo en la metodología.

Dentro de los avances realizados se encuentran:

- Procesamiento de datos experimentales de concentraciones PST y PM10. Estos datos fueron obtenidos a partir de dos campañas realizadas con medidores automáticos y equipos Hi-Vol en los tramos viales de Meta y Casanare ubicados en el municipio de Puerto Gaitán, departamento del Meta y municipio de Quebrada Seca, departamento del Casanare. Esta información fue suministrada por una entidad externa.

- Procesamiento de datos de aforos vehiculares para las vías que se evaluarán. Estos se tomarán como punto de partida para la estimación de las emisiones. Información suministrada por una entidad externa.
- Ubicación de receptores discretos perpendiculares a la vía. Sobre estos se estimará el perfil de concentraciones de material particulado.
- Procesamiento de información meteorológica en Colombia. Sin embargo a fin de que la metodología pueda llegar a ser aplicable en otras regiones del mundo con características similares a las del área evaluada se realizará el pre-procesamiento y procesamiento de información meteorológica de otras zonas del mundo.

De esta manera, queriendo analizar la tendencia del perfil normalizado de concentraciones a partir de diferentes escenarios meteorológicos, se tiene como hipótesis inicial que la velocidad promedio anual del viento es el parámetro que más influye sobre dicho perfil. Otros antecedentes del proyecto son presentados en el Anexo 1.

12 Diseño metodológico

La metodología propuesta para el presente proyecto consta de tres fases: Recopilación información base, datos de entrada para modelación en AERMOD y post-procesamiento de resultados arrojados por el modelo, cada una de estas es explicada a continuación.

El procedimiento general del proyecto se basa en la determinación de una función que permita estimar concentraciones a un determinado punto sobre una línea normal a una vía. Para ello se utiliza el modelo de dispersión AERMOD y se evalúa el perfil de concentraciones en la distancia sobre una línea perpendicular a la vía. A partir de dicho perfil de concentraciones se determina cuál función representa mejor la tendencia de los datos y se evalúa si hay algún tipo de correlación entre la velocidad del viento y los parámetros que componen la función determinada. De esta forma se espera que la función final llegue a ser de la forma:

$$C(x) = E * F_d * \text{función} \quad (6)$$

Donde la concentración C en ug/m³ depende de la emisión E estimada en el área evaluada en ug/s*m², la función que se identifique y un factor de dispersión F_d en unidades de s/m obtenido de la comparación de la función con valores experimentales. Si bien las variables independientes resultan ser la meteorología y la emisión, vale la pena resaltar que los parámetros que definan la función que se llegue a definir dependerán de la meteorología, específicamente del análisis de correlación que se realice con la velocidad del viento.

A continuación se presenta el diagrama de flujo propuesto para la metodología y se explica fase por fase de manera más detallada.

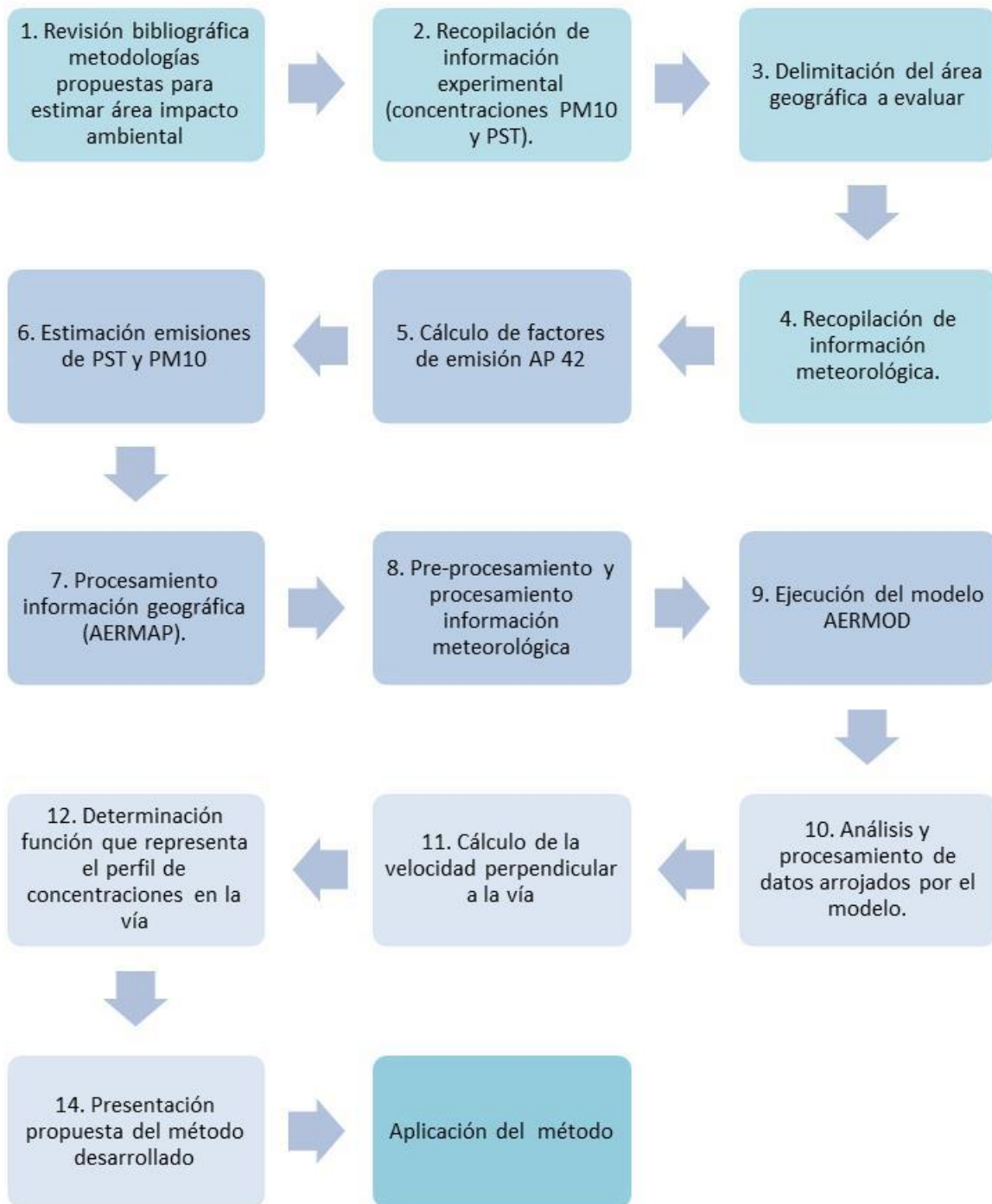


Diagrama 1 Diagrama de flujo de la metodología propuesta

Fuente Autora

12.1 Fase 1. Recopilación información base.

- **Actividad 1: Revisión bibliográfica metodologías propuestas para estimar área influencia ambiental**

Consiste en la revisión bibliográfica de metodologías para estimar el área de influencia, uso de modelos de dispersión y desarrollo de modelos para estimar concentraciones de contaminantes, especialmente de material particulado, en vías no pavimentadas.

- **Actividad 2. Recopilación de información experimental (concentraciones PM10 y PST).**

Se utiliza la información de datos experimentales de una campaña de medición realizada del 13 a 23 de Abril de 2013 por una empresa externa en el tramo vial ubicado en el corregimiento de Quebrada Seca, departamento de Casanare.

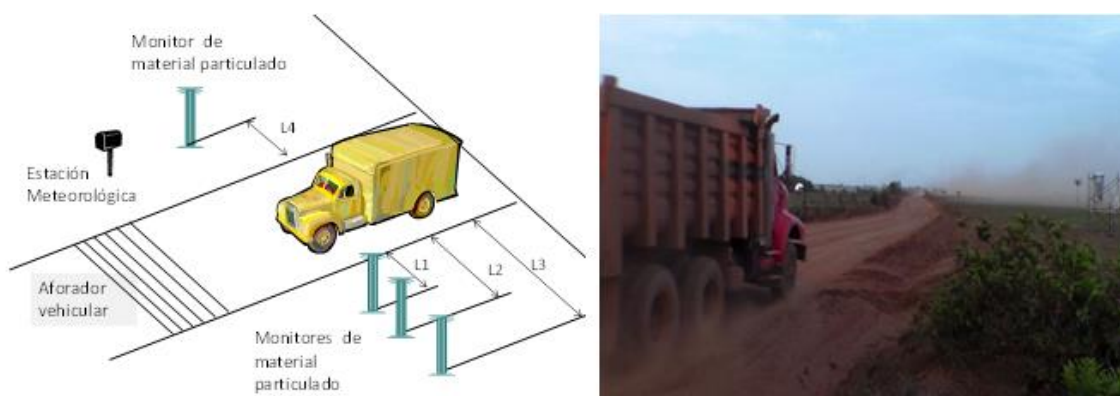


Ilustración 9 Campaña de medición realizada 13 a 23 de abril de 2013 en vías no pavimentadas de Meta y Casanare.

Fuente (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

- **Actividad 3 Delimitación del área geográfica a evaluar (Caso Casanare)**

En cuanto a la delimitación del área de estudio a evaluar se toma como punto de partida el tramo vial mencionado anteriormente. Las coordenadas UTM para los puntos iniciales y finales del tramo se presentan a continuación en la tabla 5.

Tabla 5. Coordenadas UTM de los puntos inicial y final para el tramo vial evaluado

Punto	Tramo vial Casanare	
	X	Y
Inicial	169.26 km E	560.35 km N
Final	179.88 km E	553.15 km N

Fuente (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

- **Actividad 4 Recopilación de información meteorológica.**

Se cuenta con la información meteorológica de la campaña realizada del 13 a 23 de abril de 2013. Los parámetros registrados durante el muestreo fueron velocidad y dirección del

viento, temperatura y radiación solar. La información y el análisis realizado previamente al presente estudio se muestran en el Anexo 1.

Algunos resultados encontrados del análisis se presentan en las Ilustraciones 10 y 11, de las cuales se observa que la dirección de viento predominante viene del occidente y que los vientos de mayor frecuencia se encuentran entre 0,5 y 2,1 m/s. En cuanto al promedio horario de las temperaturas reportadas por las estaciones meteorológicas (Ilustración 11) se observan temperaturas horarias relativamente constantes, cercanas a los 25 °C y no mayores a los 40°C.

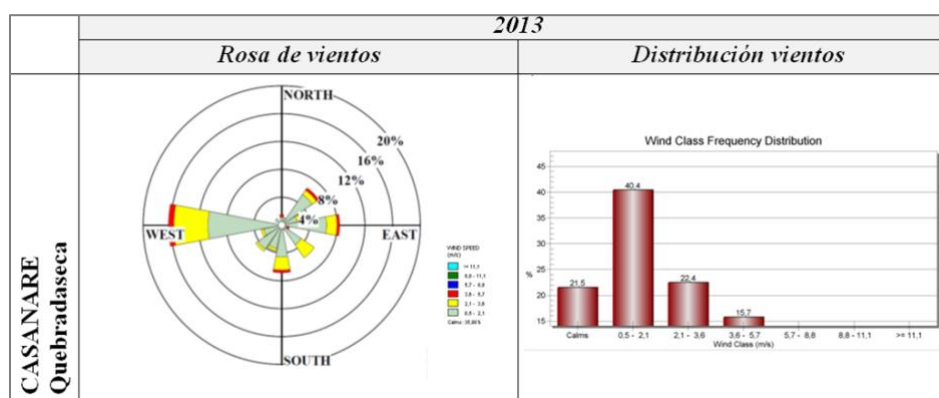


Ilustración 10 Rosa de vientos para el periodo de Campaña Casanare (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

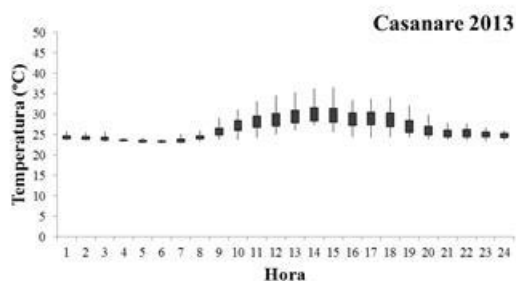


Ilustración 11 Promedio horario de temperaturas reportadas por las estaciones en el departamento de Casanare (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

Sin embargo, el contar con la información meteorológica de la campaña realizada no es suficiente debido que para realizar la modelación en AERMOD se necesita información meteorológica horaria de por lo menos un año.

Por lo cual, para cumplir el objetivo del presente estudio se recopila información horaria anual de diferentes estaciones meteorológicas en Colombia y de otros países que cuenten con información horaria de parámetros como radiación solar, temperatura, velocidad, dirección

del viento y nubosidad disponibles. Esto con el fin de comprobar que la función propuesta inicialmente para representar el perfil de concentraciones (sección 6.3) sí corresponda y para determinar que este coincida en todos los casos cuando se varían parámetros meteorológicos. De lo contrario se analizará de qué manera variaría dicho perfil a partir de la variación de la velocidad promedio anual.

Las meteorologías a utilizar podrán contar con características meteorológicas diferentes a las que se presentan en Colombia a fin de que el método a desarrollar sea aplicable para diferentes latitudes con condiciones de terreno y suelo similares a las de la zona de estudio. De igual forma se busca definir los casos en los cuales esta no sea aplicable y cuáles sus restricciones.

12.2 Fase 2. Datos de entrada al modelo AERMOD

- **Actividad 5 Cálculo de factores de emisión AP 42**

Al no contar con factores de emisión propios para el área de estudio se utilizan los propuestos por la EPA (Sección 6.1). Como información para dicho cálculo se cuenta con aforos vehiculares y evaluación del contenido de finos en la vía proporcionados por una empresa externa.

- **Actividad 6. Estimación emisiones de PST y PM10**

Una vez calculado el factor de emisión se empleará la ecuación 2 presentada en el marco teórico. No se incluirá la eficiencia por medidas de control debido a que se busca evaluar el peor escenario.

- **Actividad 7. Procesamiento información geográfica (AERMAP).**

A fin de adquirir información de terreno y la elevación y factores de escala para cada receptor que se tenga en cuenta en el estudio de dispersión de aire, se hace necesario procesar información geográfica utilizando AERMAP. Para este procesamiento se cuenta con la ubicación de 138 receptores sensibles que forman una línea perpendicular a la vía. De igual forma se cuenta con una malla sobre la zona de 4.3km x 5.9 km con resolución de 205m x 281m y total de 441 receptores cartesianos.

- **Actividad 8. Pre-procesamiento y procesamiento información meteorológica**

Una vez adquirida la información horaria anual de velocidad y dirección del viento, radiación solar, temperatura y en los casos que sea posible nubosidad se organiza la información a fin de ser procesada.

Dada la ausencia de información de radio-sondeos, se utiliza una versión adaptada del módulo de pre-procesamiento AERMET con base en la información con la que se cuenta para obtener parámetros tales como altura de capa de mezcla convectiva y mecánica. En esta se

implementan los algoritmos mencionados en el marco teórico basados en la metodología que utiliza AERMET para el cálculo de parámetros secundarios (US EPA, 2004).

Una vez calculados los parámetros secundarios se organizan y generan los archivos Surface y Profile para cargar en AERMOD, de manera tal que dicha información sea utilizada en el cálculo de concentraciones.

- **Actividad 9. Ejecución del modelo AERMOD**

Se ejecuta el modelo con las emisiones estimadas y con la información meteorológica y geográfica generando como archivos de salida concentraciones de primeros máximos diario y promedios cada 24 horas.

12.3 Fase 3 Post-procesamiento de resultados arrojados por el modelo

Esta fase consiste en el análisis de datos arrojados por AERMOD y en la determinación de la función que represente el comportamiento de los datos.

- **Actividad 10. Análisis y procesamiento de datos arrojados por el modelo.**

Una vez ejecutado el modelo se extraen las concentraciones de primeros máximos diarios y promedio de cada 24 horas para cada uno de los receptores sensibles evaluados. Es importante tener en cuenta que para el análisis de concentraciones de PST se calcula el promedio geométrico a partir de las concentraciones horarias arrojadas por AERMOD, mientras que para el análisis de concentraciones de PM₁₀ se utilizan las concentraciones obtenidas a partir del promedio aritmético.

- **Actividad 11. Cálculo de la velocidad perpendicular a la vía**

Como se ha mencionado anteriormente es necesario conocer si existe correlación entre los parámetros meteorológicos evaluados y los parámetros que definen la función que se llegue a definir, debido a que la variable que más puede llegar a influir sobre la dispersión de material particulado e implícitamente sobre el perfil de concentraciones es la velocidad del viento, se realiza una comparación de la función que se identifique con la velocidad perpendicular del viento.

Para cada una de las meteorologías evaluadas se calcula la velocidad del viento perpendicular a la vía como se presenta a continuación en la Ilustración 12. Esta ilustración representa la manera como se descompone el vector velocidad (flecha azul) para obtener la magnitud de la velocidad (flecha verde oscura) en dirección perpendicular a la vía (rectángulo verde). La Tabla 6 muestra las variables para determinar dicho valor. En donde β corresponde a la velocidad del viento para una hora dada, N_i el valor de la velocidad del viento en dicha hora, γ al ángulo a la línea perpendicular a la carretera con respecto a la línea este-oeste y θ al ángulo que el vector velocidad forma con la línea normal a la vía.

Tabla 6 Variables para el cálculo de la velocidad perpendicular

Dirección Viento	Velocidad Viento	θ	Velocidad Perpendicular a la vía
B	N_i	$\beta - (90 - \gamma)$	$V \cos(\theta)$

Fuente (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

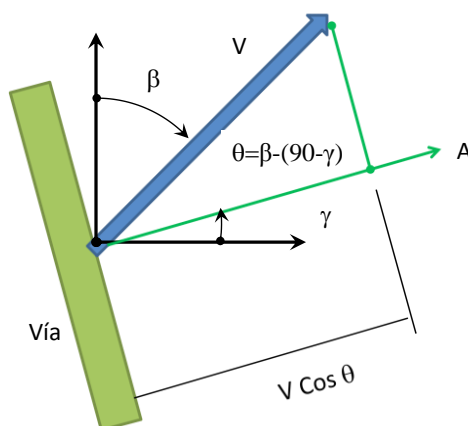


Ilustración 12. Esquema ángulo de proyección de velocidad respecto a centro de vía
Fuente (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

A partir de tal información se procede a verificar la hipótesis que indica que el perfil normalizado de concentraciones se ve influenciado principalmente con la velocidad promedio del viento.

- **Actividad 12. Determinación de la función que representa el perfil de concentraciones en la vía**

Con los valores de concentración se procede a graficar los perfiles en la distancia, para lo cual se toma el valor de la concentración sobre la emisión como variable dependiente y la distancia como variable independiente a fin de evaluar el comportamiento de las concentraciones independientemente de la emisión que se llegue a presentar.

- **Ajuste de las concentraciones obtenidas a diferentes funciones**

Analizados los datos de concentración arrojados por el modelo se compara el perfil adimensional de concentraciones contra diferentes funciones buscando de determinar la función que mejor represente el comportamiento de los datos.

- **Actividad 13. Presentación propuesta del método desarrollado**

Una vez obtenido el ajuste más cercano, se define una función matemática que permita establecer concentraciones de PST y PM10 para una distancia dada. Al contar con la función se presenta el protocolo a seguir para aplicar el método desarrollado.

- **Actividad 14. Aplicación del método**

Finalmente se realiza una aplicación del método propuesto para un caso extremo, estimando hasta qué punto se superan las concentraciones de material particulado. Tal caso es diseñado estimando la emisión máxima que se podría llegar a presentar en la vía omitiendo mecanismos de control de emisiones, precipitación y considerando el máximo flujo vehicular que pueda llegar a soportar la vía evaluada.

13 Desarrollo de la investigación

13.1 Fase 1. Recopilación información base.

Como se explicó en la metodología esta fase consta de cuatro actividades referentes a la revisión de información base para el proyecto.

- **Recopilación de información experimental (concentraciones PM10 y PST).**

Como información experimental se utiliza la información de la campaña de medición realizada del 13 a 23 de Abril de 2013 por una empresa externa en el tramo vial ubicado en el corregimiento de Quebrada Seca, departamento de Casanare proporcionada por una empresa externa.

Para dicha campaña se ubicaron cuatro estaciones de monitoreo. Los equipos instalados en cada una de ellas y su ubicación se presentan a continuación en la Tabla 7.

Tabla 7 Equipos de Monitoreo, Quebrada Seca, Casanare

# Estación	Quebrada Seca- Casanare			
	Estación 1	Estación 2	Estación 3	Estación 4
Ubicación (UTM)	X=171.13 km E Y=558.45 km N	X=171.12 km E Y=558.50 km N	X=171.11 km E Y=558.55 km N	X=171.09 km E Y=558.62 km N
Ubicación (a partir del borde de la vía)	5 m vientos arriba	5 m vientos abajo	60 m vientos abajo	125 m vientos abajo
Equipo Hi- Vol VFC PM10	X	X	X	X
Equipo Hi- Vol VFC PST	X	X	X	X
Equipo Automático	X	X		
Estación Meteorológica		X	X	

(Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

Para las mediciones manuales realizadas en campo se utilizaron muestreadores de alto volumen (equipos Hi- Vol) instalados en cada una de las estaciones de monitoreo, como se muestra en la Ilustración 13.



Ilustración 13. Equipos Hi-Vol instalados en estaciones de monitoreo
Fuente (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

Las Tablas 8 y 9 presentan los resultados entregados por la empresa encargada de las mediciones en el departamento de Casanare.

Tabla 8. Mediciones Equipos Hi-Vol, Quebrada Seca-Casanare. Concentraciones PM10 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Fecha	Estación 1. -5 metros vientos arriba	Estación 2. -5 metros vientos abajo	Estación 3. -60 metros vientos abajo	Estación 4. -120 metros vientos abajo
13/04/2013	177.78	189.35	174.07	27.16
14/04/2013	9.6	12.08	11.38	8.79
15/04/2013	1.06	108.25	60.84	15.14
16/04/2013	84.78	274.32	103.27	34.1
17/04/2013	22.26	40.75	93.12	47.75
18/04/2013	43.36	47.05	36.77	14.34
19/04/2013	12.08	65.57	96.51	13.31
20/04/2013	37.24	146.18	82.37	36.25
21/04/2013	94.46	219.86	172.7	68.56
22/04/2013	18.03	375.14	205.82	70.39

Fuente (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

Tabla 9 Mediciones Equipos Hi-Vol, Quebrada Seca-Casanare. Concentraciones PST en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Fecha	Estación 1. -5 metros vientos arriba	Estación 2. -5 metros vientos abajo	Estación 3. -60 metros vientos abajo	Estación 4. -120 metros vientos abajo
13/04/2013	561.38	252.97	112.58	41.55
14/04/2013	48.06	42.32	27.1	27.7
15/04/2013	26.84	270	92.3	47.87

Fecha	Estación 1. -5 metros vientos arriba	Estación 2. -5 metros vientos abajo	Estación 3. -60 metros vientos abajo	Estación 4. -120 metros vientos abajo
16/04/2013	276.1	553.23	156.14	71.78
17/04/2013	47.37	61.11	121.93	86.73
18/04/2013	190.14	78.67	33.72	22.9
19/04/2013	43.04	140.95	44.69	26.18
20/04/2013	92.69	309.74	138.53	74.52
21/04/2013	294.07	468.47	176.53	136.64
22/04/2013	36.05	842.17	352.5	157.16

Fuente (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

Para cada uno de los equipos se calculó promedio geométrico para concentraciones de PST y aritmético para concentraciones de PM10 con base en las mediciones diarias. De igual forma se clasificaron las concentraciones de primeros máximos diarios tanto para PST como para PM10. Los resultados se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10 Concentraciones experimentales PM10 y PST vía departamentos de Casanare

Distancia (m)	PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	Promedio geométrico	Máximo diario	Promedio aritmético	Máximo diario
5	205,2	842,2	147,9	375,1
58	96,4	352,5	103,6	205,8
123	56,5	157,2	33,6	70,4

Fuente: Autora

- **Ubicación del área geográfica a evaluar**

El área de estudio se encuentra localizado en Quebrada Seca, uno de los diez corregimientos que conforman el municipio de Yopal, se encuentra compuesto por tres veredas con un territorio aproximado de 16500 hectáreas (Alcaldía de Yopal, 2013). Las actividades que allí se desarrollan son proyectos de explotación de hidrocarburos y pastoreo permanente, territorios agrícolas cubiertos con hierba densa (Alcaldía de Yopal, 2013). La ubicación geográfica de este corregimiento se presenta a continuación en la Ilustración 14.

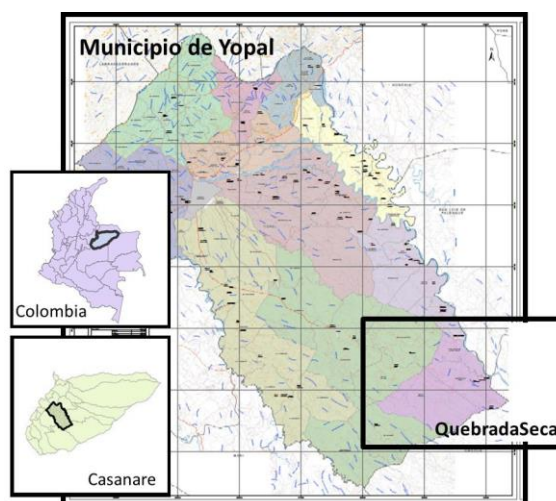


Ilustración 14 Ubicación Corregimiento de Quebrada Seca- Casanare
Fuente (Alcaldía de Yopal, 2013), adaptado por autores

Según la clasificación realizada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGACC) para el departamento de Casanare en 1991 (Alcaldía de Yopal, 2013) las clases de suelo definidas para este corregimiento son VRAa, VRDa y VRFa. Estas tres clases representan suelos con clima cálido y húmedo, muy fuertemente ácidos, de profundidad entre 80 a 120cms, drenaje pobre, encharcamientos prolongados, siendo en general suelos superficiales ya que el nivel freático se encuentra cerca de la superficie, con relieve plano, pendiente 0-3% (Alcaldía de Yopal, 2007). El uso potencial debido a la baja a moderada fertilidad de este tipo de suelos es pecuario o agrosilvopastoril (Alcaldía de Yopal, 2013).

El tramo vial de estudio de longitud 13.11km, ubicado dentro de este corregimiento es presentado en la Ilustración 15. Las coordenadas UTM para los puntos iniciales y finales del tramo se presentan en la Tabla 5 11 a continuación. Como se mencionó anteriormente, esta zona se caracteriza por ser de terreno plano y simple.

Tabla 11. Coordenadas UTM de los puntos inicial y final para el tramo vial evaluado

Punto	Tramo vial Casanare	
	X(km)	Y(km)
Inicial	169.268 E	560.351 N
Final	179.885 E	553.155 N

Fuente (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)



Ilustración 15 Tramo vial corregimiento de Quebrada Seca- Casanare

Fuente: Autora

- **Recopilación de información meteorológica.**

Para cumplir el objetivo del presente estudio se recopiló información horaria anual de diferentes estaciones meteorológicas en Colombia y de otros países que contaran con información horaria de parámetros como radiación solar, temperatura, velocidad, dirección del viento y nubosidad disponibles. De manera que al mantener constante el valor calculado de la emisión y tomar un lugar fijo se identificara cómo determinados parámetros meteorológicos influyen en la dispersión de contaminantes y así involucrarlos dentro de la función a proponer.

La información meteorológica seleccionada estuvo compuesto por 12 meteorologías de diversas partes del mundo cuyas velocidades de viento promedio anuales varían en el rango de 0.99 m/s a 7.53 m/s. Estas meteorologías fueron seleccionadas de acuerdo a la disponibilidad de la información y el valor de la velocidad del viento promedio anual. La Tabla 12 presenta el nombre, país, año y fuente de información de las doce estaciones meteorológicas, información de radiación solar, temperatura, velocidad y dirección del viento fue utilizada. Adicionalmente, para las estaciones de Reino Unido se utilizaron datos de nubosidad, para las demás estaciones se asumió un valor de constante de 0.5 (EPA, 2004) ya que no se contaba con esta información.

Tabla 12 Estaciones empleadas para la determinación del perfil de concentraciones

Nombre estación	País	Año	Fuente
Borrego	Colombia	2009	Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM
Calenturitas	Colombia	2009	Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM
Cerrolargo	Colombia	2009	Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM
Descanso	Colombia	2009	Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM
Texas	Estados Unidos	1990	Centro de recursos meteorológicos WEBMET
Corpus	Estados Unidos	1990	Centro de recursos meteorológicos WEBMET
Buffalo	Estados Unidos	1990	Centro de recursos meteorológicos WEBMET
Michigan	Estados Unidos	1990	Centro de recursos meteorológicos WEBMET
Alaska	Estados Unidos	1990	Centro de recursos meteorológicos WEBMET
UK113	Inglaterra	2012	Centro británico de datos atmosféricos BADC
UK19260	Inglaterra	2012	Centro británico de datos atmosféricos BADC
UK09	Inglaterra	2012	Centro británico de datos atmosféricos BADC

Fuente: Autora

La selección de la información meteorológica a utilizar no se limitó únicamente a características meteorológicas similares a las que se presentan en Colombia a fin de generalizar el comportamiento del perfil de emisiones para que el método a desarrollar pueda ser aplicable en más de una lugar, siempre y cuando se cuente con condiciones de terreno y suelo similares a las de la zona de estudio. De igual forma se buscó definir los casos en los cuales esta no llega a ser aplicable y cuáles sus restricciones (Ver sección 10).

Es decir, se utilizaron diferentes meteorologías con la motivación de comprobar que la función determinada inicialmente sí correspondiera y para determinar que el perfil de concentraciones coincidiera en todos los casos aun al variar parámetros meteorológicos.

Para cada una de las meteorologías anuales presentes en la Tabla 12 se ejecutó el modelo AERMOD. Como resultado, el modelo reporta la concentración promedio anual de PST y PM10 en cada uno de los receptores discretos perpendiculares a la vía. Tal información es presentada en la sección 8.3.

13.2 Fase 2. Datos de entrada al modelo AERMOD

Teniendo en cuenta que para el modelo de dispersión de aire AERMOD es necesario contar con información meteorológica, geográfica y de emisiones se deben realizar las actividades presentadas a continuación para que el modelo pueda ser ejecutado.

La Ilustración 16 es un bosquejo de la información que debe ser procesada para ingresar al modelo, cada uno de estos aspectos es explicado en las secciones que componen esta fase.

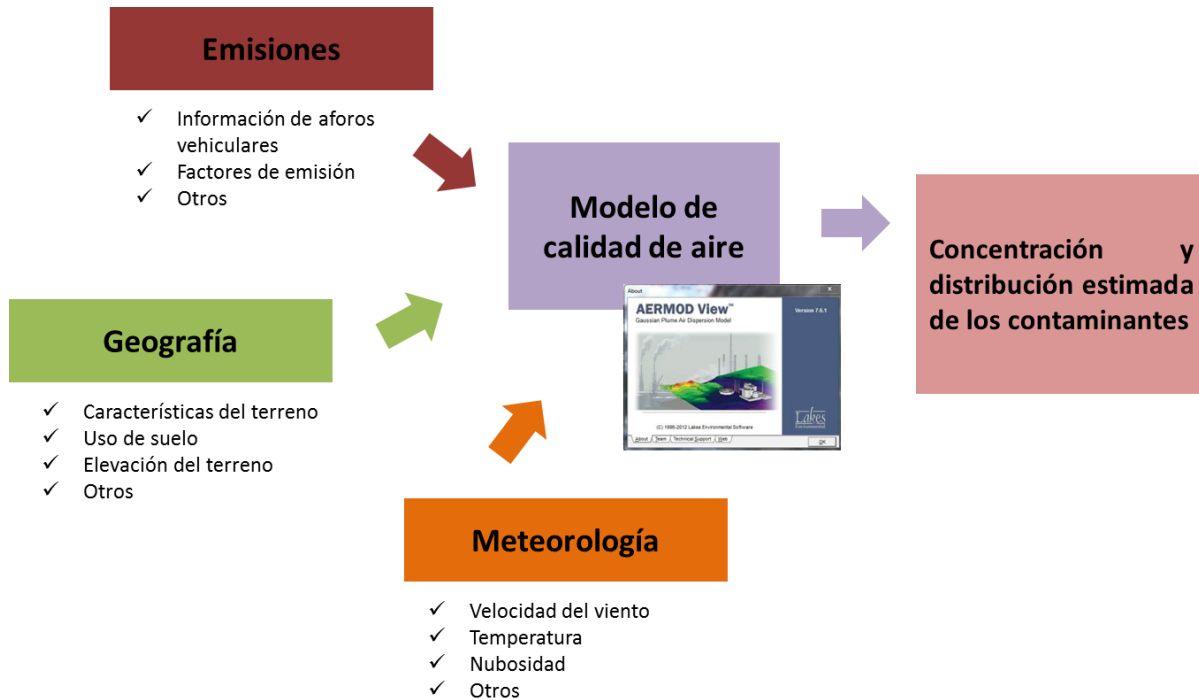


Ilustración 16 Datos de entrada al modelo de dispersión AERMOD

Fuente: Autora

• Cálculo de factores de emisión AP 42

A fin de calcular las emisiones de PM₁₀ y PST generadas en el tramo vial evaluado se hace uso de factores de emisión, estos indican la relación entre la cantidad en gramos de contaminante que es emitido por categoría de vehículo que transita la vía en un periodo de tiempo y distancia dados. Como ya se expuso en el marco teórico, la EPA (U.S. Environmental Protection Agency) presenta una metodología para determinar factores de emisión de diferentes contaminantes en función del tipo de fuente del que proviene para posteriormente conocer su emisión promedio.

De acuerdo con la EPA en las vías públicas no pavimentadas se emiten menores concentraciones de material particulado respecto a las vías industriales no pavimentadas, debido a que estas últimas suelen tener un mayor tráfico pesado. Por lo tanto, se utiliza el factor de emisión para vías industriales no pavimentadas. Ecuación 1 explicada en el marco teórico.

Los valores de las constantes empíricas a utilizar se presentaron en la Tabla 1 del marco teórico; el peso de los vehículos clasificados en categorías es presentado en la Tabla 14. El contenido de finos para la vía fue de 9.4%.

La campaña llevada a cabo entre el 13 y 23 de Abril de 2013 en el área de estudio, contó también con la medición de flujo vehicular a ambos lados del tramo vial Quebrada Seca-Algarrobo, en las coordenadas: 5°3'0.368N, 71°58'877W con una altura media sobre el nivel del mar de 171 m.s.n.m. La distribución de las categorías identificadas en este aforo se presenta en la Ilustración 17.

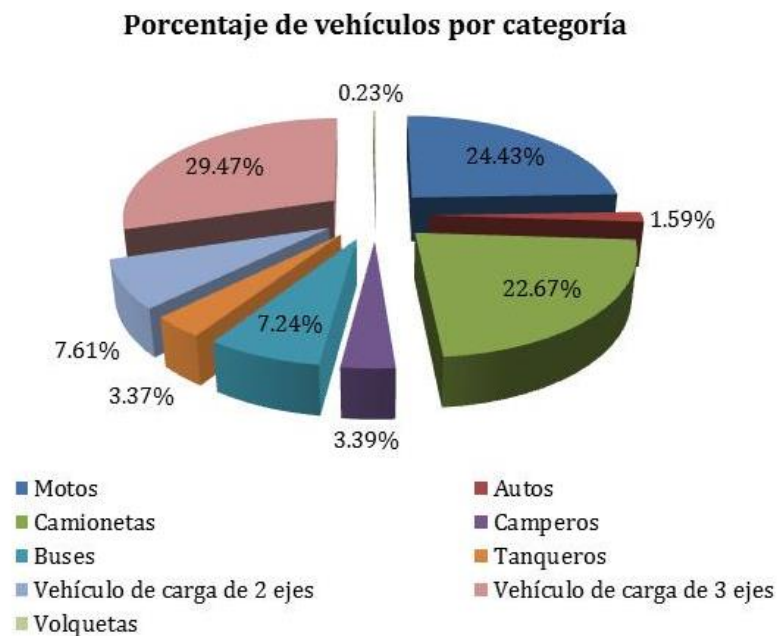


Ilustración 17 Aforo vehicular tramo vial Quebrada Seca-Algarrobo, departamento de Casanare
Fuente: Autora

A partir del número de vehículos por hora en la vía, el peso en kg para cada una de las categorías vehiculares identificadas y los valores de las constantes empíricas y el porcentaje de finos en la vía, se calcularon los factores de emisión por categoría a partir de la ecuación 1, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Factores de emisión para PST y PM10 por categoría vehicular

Categoría	Total vehículos durante la campaña de medición	Peso (Ton)	Factor de emisión (gPST/VKT)	Factor de emisión (gPM10/VKT)
Motos	1262	0.2	346.43	101.34
Autos	82	2	857.82	250.94
Camionetas	1171	2	931.16	272.39
Camperos	175	2.5	1079.51	315.79
Buses	374	17	2557.74	748.21

Categoría	Total vehículos durante la campaña de medición	Peso (Ton)	Factor de emisión (gPST/VKT)	Factor de emisión (gPM10/VKT)
Tanqueros	174	36	3585.01	1048.72
Vehículo de carga de 2 ejes	393	17	2557.73	748.21
Vehículo de carga de 3 ejes	1522	36	3585.00	1048.72
Volquetas	12	32	3399.94	994.58

Fuente: Autora

A partir de los factores de emisión calculados se evidencia en comparación con las demás categorías que las categorías que más pueden llegar a tener influencia en la resuspensión de material particulado son los vehículos de carga de tres ejes, seguidos por los vehículos de carga de dos ejes y las camionetas por su alto factor de emisión y por la cantidad de vehículos que las componen. Si bien la categoría “volquetas” cuenta con un alto factor de emisión el número total de vehículos en esta categoría hace que su emisión sea menos significativa si se le compara con las categorías mencionadas anteriormente.

De igual forma, al comparar los factores de emisión de PST y PM10, es posible decir que según la EPA, aproximadamente el 30% de las emisiones de PST están compuestas por PM10.

- **Estimación emisiones de PST y PM10**

Utilizando la ecuación 2 presentada en el marco teórico se calcula el valor de la emisión en g/s m² y se toma como factor de actividad ‘A’ la relación entre la sumatoria del número de vehículos, la longitud de la vía, tiempo y área de la vía, como se presenta en la ecuación 7.

$$A = \frac{\sum Ni * L}{3600s * \text{área}} \quad (7)$$

Ni : Número de vehículos de tamaño i

Área: Área de la vía (m²)

L : Longitud de la vía (km)

Al simplificar la anterior ecuación, la emisión se estima a partir de la ecuación (8); a partir de esta se estiman las emisiones para el presente estudio. No se incluyen eficiencias por medidas de control debido a que se busca evaluar el peor escenario.

$$E = \frac{\sum No.Veh}{B * 3.6} * E_f \quad (8)$$

E_f : Factor de emisión (kg/VKT)

B : Ancho de la vía (m)

No. Veh: Número de vehículos

Se calcularon las emisiones de PST y PM10 horarias en la vía para cada uno de los 11 días en los que se realizó el aforo vehicular (Ver Anexo 2). A fin de contar con un valor representativo de la emisión se calculó el valor promedio durante los días de campaña y se asumió dicho valor como una emisión constante a lo largo del año, tales valores se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14 Emisiones promedio de PST y PM10 en la vía

Tamaño	Emisión (g/s * m ²)
PST	1,73E-03
PM10	5.06E-04

Fuente Autora

A partir de las emisiones calculadas se observa que las emisiones de PM10 en la vía componen aproximadamente el 30% de emisiones de PST, lo que a la vez comprueba la proporcionalidad que existe entre los factores de emisión y el valor final de la emisión.

Como se mencionó anteriormente, la vía es tomada como una fuente de área, para lo cual se dividió la vía por tramos en 21 polígonos (Ver Anexo 1). A cada uno de estos tramos le es asignada la emisión estimada.

- **Procesamiento información geográfica (AERMAP).**

Para el procesamiento de información geográfica se empleó AERMAP a fin de adquirir la elevación y factores de escala para cada receptor tenido en cuenta.

Los receptores tenidos en cuenta para el estudio se conocen como receptores sensibles o receptores discretos y permitirán conocer una determinada concentración en un punto específico, para el presente estudio se contó con la ubicación de 138 receptores ubicados perpendicularmente en ambos lados de la vía de estudio como se presenta en la Ilustración 18, de igual forma se estipuló una malla sobre la zona con resolución de 4.3km x 5.9 km para un total de 441 receptores cartesianos.

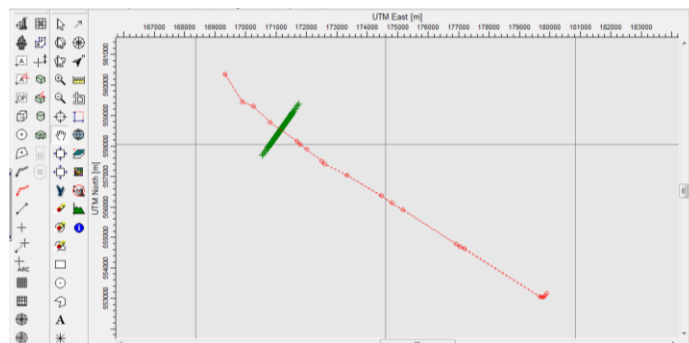


Ilustración 18 Visor AERMOD de los receptores sensibles perpendiculares a la vía. Línea roja: Tramo vial Quebrada Seca-Algarrobo. Puntos verdes: receptores sensibles.

Fuente Autora

La versión utilizada de AERMOD permite que los datos sean descargados directamente a partir de la base de datos WebGis, el tipo de datos utilizado para la zona geográfica de estudio fue SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) la cual es conocida como la base de datos topográficos más completa en el mundo hasta la fecha (Thé, Thé, & Johnson, 2009), una vez seleccionados los datos se ejecutó el preprocesador; la forma como se visualiza el terreno para la zona de estudio se presenta en la Ilustración 19, donde se observa que el terreno es plano a excepción de la zona noroccidental.

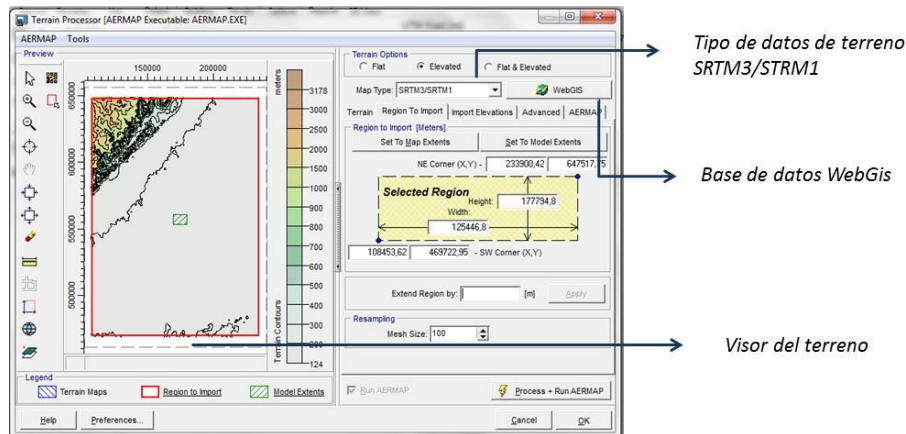


Ilustración 19 Visor preprocesador AERMAP

Fuente Autora

Una vez seleccionada la información se corre el modulo y la información seleccionada será aplicada al archivo de trabajo. Las coordenadas de cada receptor, al igual que su información de elevación se encuentran en el Anexo 3.

• Pre-procesamiento y procesamiento información meteorológica

Al no contar con información de radio-sondeos que permitieran conocer mediciones de la distribución vertical de parámetros atmosféricos no fue posible utilizar el módulo AERMET, por el contrario se emplearon los algoritmos en los que se basa la metodología implementada en AERMET (US EPA, 2004), los cuales fueron mencionados en el marco teórico para calcular los siguientes parámetros secundarios:

- Estabilidad atmosférica
- Velocidad de fricción superficial
- Logitud de Monin-Obukov
- Flujo de calor sensible
- Escala de velocidad convectiva
- Factores Bowen y Albedo

Teniendo los anteriores parámetros organizados y programados en Excel se generaron los archivos Surface (SFC) y Profile (PFL) para 3 de las 12 meteorologías seleccionadas, correspondientes a las estaciones UK113, UK09 y UK1920 de Reino Unido, la información de las 5 estaciones estadounidenses se encontró en la base de datos Webmet disponible en archivos compatibles con AERMOD por lo cual no fue necesario el pre-procesamiento meteorológico para estas estaciones;

para las 4 estaciones localizadas en Colombia ya se contaba con los archivos SFC y PFL. Estos archivos se encuentran disponibles en forma digital en el Anexo 4.

Una vez obtenidos los archivos SFC y PFL para cada una de las meteorologías a utilizar se cargaron manualmente en el modelo como se muestra en la Ilustración 20.

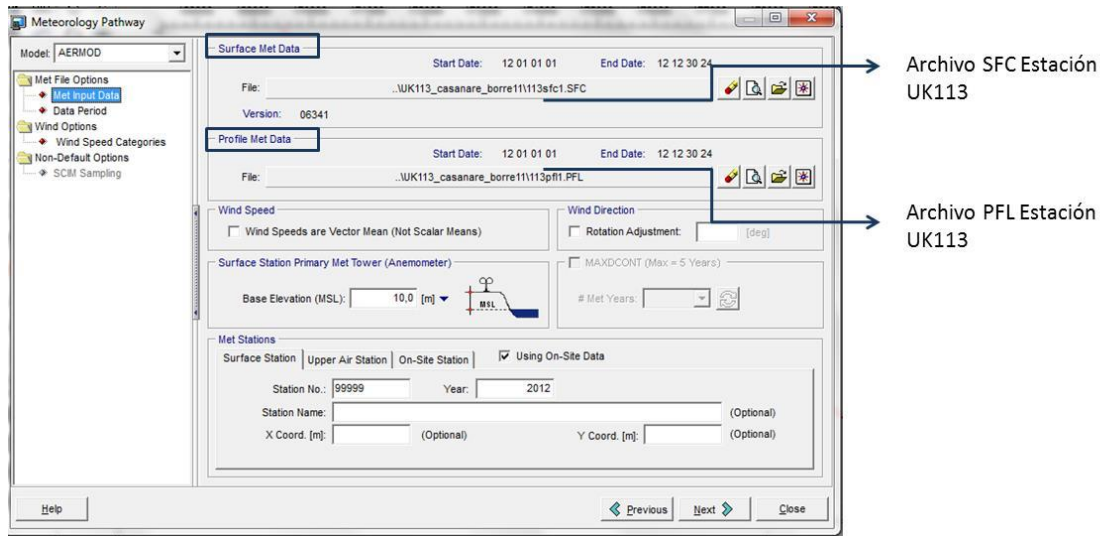


Ilustración 20 Ejemplo archivos SFC y PFL cargados en AERMOD

Fuente Autora

- **Ejecución del modelo AERMOD**

Una vez cargada la información meteorológica, geográfica e información de las emisiones calculadas para cada tipo de contaminante se ejecutó el modelo de dispersión AERMOD, los resultados obtenidos son presentados a continuación en la fase 3.

13.3 Fase 3. Post-procesamiento de resultados arrojados por el modelo

A continuación se presentan los resultados arrojados por AERMOD y el procedimiento llevado a cabo para la determinación de la función que representa el comportamiento de las concentraciones transversales a la vía.

- **Análisis y procesamiento de datos arrojados por el modelo.**

Una vez ejecutado el modelo para cada una de las 12 meteorologías propuestas, emisión y área geográfica constantes, se extrajeron las concentraciones de primeros máximos diarios y promedio de cada 24 horas para cada uno de los receptores sensibles evaluados (Ver ilustración 21).

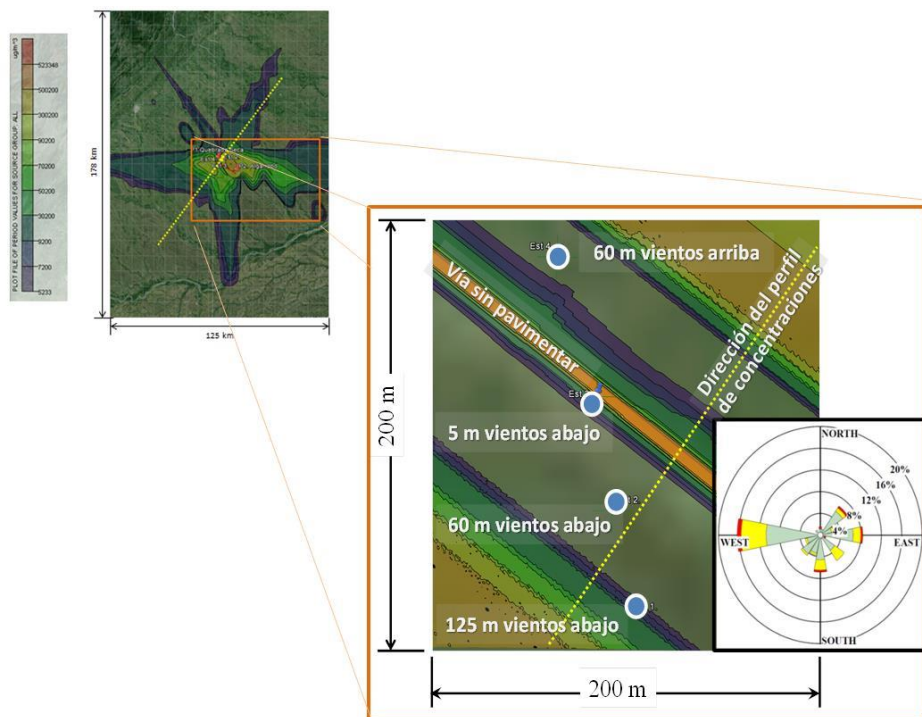


Ilustración 21 Modelación de la vía en Aermód. Puntos azules: Ubicación de las mediciones experimentales. Puntos amarillos: Receptores sensibles perpendiculares a la vía.

Fuente: Autora

Teniendo en cuenta que la normatividad colombiana estipula que las concentraciones de PST deben ser evaluadas a partir del promedio geométrico de concentraciones y las concentraciones de PM10 a partir del promedio aritmético (Resolución 610 de 2010), para el análisis de concentraciones de PST se calculó el promedio geométrico a partir de las concentraciones horarias arrojadas por AERMOD, mientras que para el análisis de concentraciones de PM10 se utilizaron las concentraciones obtenidas a partir del promedio aritmético.

Las concentraciones calculadas para cada caso evaluado se encuentran en el Anexo 5, sin embargo, queriendo identificar el comportamiento de las concentraciones, independientemente de la emisión que se llegue a presentar sobre la vía, se evaluó el cociente entre el valor de las concentraciones y el valor de la emisión (eje y de la Ilustración 22), procedimiento a partir del cual se observó que los datos parecieran seguir la forma de una curva normal.

Un ejemplo de esto se presenta en la Ilustración 22, en donde en un estudio previo se consideraron diferentes emisiones y al dividir las concentraciones calculadas para cada una de tales emisiones entre el respectivo valor de emisión, el perfil obtenido coincidía en todos los casos semejándose a una parábola.

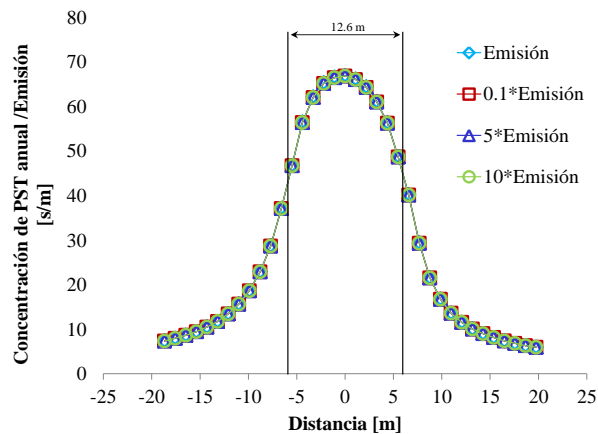


Ilustración 22 Ejemplo perfil de concentraciones para PST/Emisión

Fuente: (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

Lo anterior ejemplifica la dependencia existente entre la concentración y las emisiones, razón por la cual es de esperarse que los perfiles calculados para cada una de las estaciones tenidas en cuenta sean similares entre sí. Es decir, independientemente de la emisión las concentraciones pueden ser representadas por una misma función.

Con los valores de concentración obtenidos se graficaron los perfiles en la distancia tomando la concentración como variable dependiente y la distancia como variable independiente. Al observar que el comportamiento de las concentraciones seguía la forma de una parábola (siendo la altura máxima de la campana el centro de la vía y la altura mínima los puntos más alejados de la vía sobre una línea perpendicular a esta) se procedió a evaluar únicamente las concentraciones vientos abajo (lado derecho de la vía) asumiendo que el comportamiento a ambos lados de la vía es el mismo de modo que se facilite el procesamiento de datos, además que vientos abajo se cuenta con más puntos experimentales que vientos arriba.

Las Ilustraciones 23 y 24 para PST y PM10 respectivamente presentan el perfil de concentraciones/emisión para las 12 estaciones tenidas en cuenta, si bien, no todas las curvas coinciden en una sola, en algunos casos se observa que tienden a ser similares o de comportamiento semejante.

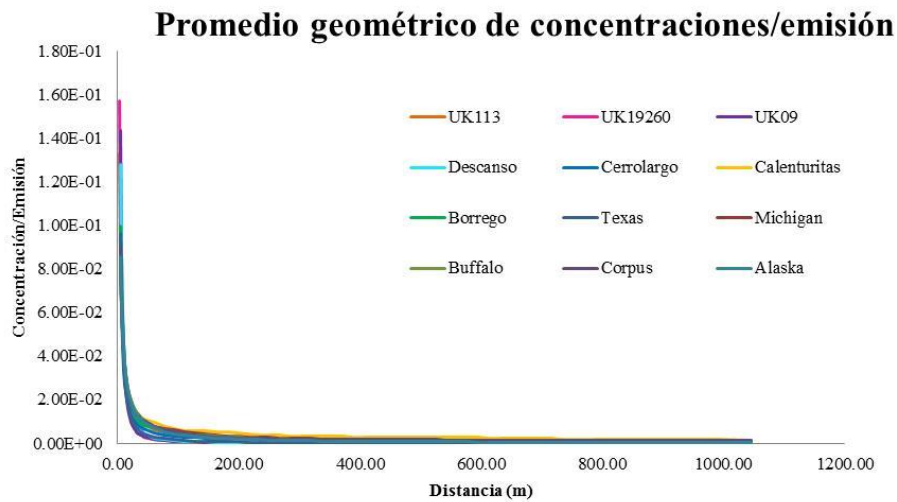


Ilustración 23 Perfil concentración PST/Emisión para las 12 estaciones meteorológicas analizadas
Fuente Autora

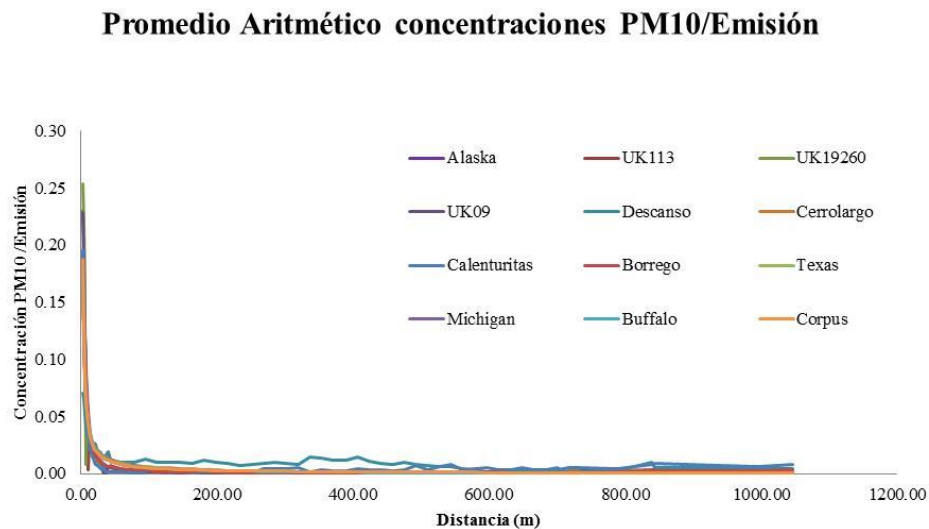


Ilustración 24 Perfil concentración PM10/Emisión para las 12 estaciones meteorológicas analizadas
Fuente Autora

A partir de las gráficas presentadas se observa que las concentraciones de PST parecen seguir el mismo tipo de comportamiento, mientras que las concentraciones de PM10 difieren en algunos casos, por lo cual se realiza un análisis individual para cada estación evaluada, buscando a la vez encontrar algún tipo de correlación entre los perfiles y las variables meteorológicas, como se presentará a continuación.

- **Cálculo de la velocidad perpendicular**

La apertura de las funciones a evaluar está por lo general determinada por los parámetros que componen la función; físicamente esta apertura corresponde a la dispersión de material particulado el cual está asociado a la velocidad del viento perpendicular a la vía. Por tanto para cada meteorología evaluada se determina dicha velocidad siguiendo el procedimiento explicado en la metodología (sección 7.3). La Tabla 15 presenta los resultados para cada una de las meteorologías analizadas.

Tabla 15 Velocidades anuales promedio y perpendiculares de cada estación

Nombre estación	Velocidad perpendicular [m/s]	Velocidad promedio [m/s]
Borrego	1.3	1.44
Calenturitas	0.8	1.09
Cerrolargo	0.9	1.22
Descanso	1.0	0.99
Texas	2.1	3.61
Corpus	2.8	5.16
Buffalo	2.5	3.86
Michigan	2.0	5.69
Alaska	1.7	3.88
UK113	1.47	2.29
UK09	4.75	7.53
UK19260	2.56	3.99

Fuente Autora

Al graficar la velocidad del viento perpendicular a la vía vs la velocidad del viento promedio anual para cada meteorología se observa una alta relación lineal ($R^2 > 0.8$) como se presenta en la Ilustración 25. Por tanto, se decidió evaluar la relación existente entre los valores de α_1 y α_2 con respecto a la velocidad promedio anual, la cual es más sencilla y práctica de determinar. Esta correlación será importante, ya que la apertura de la curva de la función depende de los parámetros que la definen (α_1 y α_2) y se espera estos dependan de la velocidad del viento.

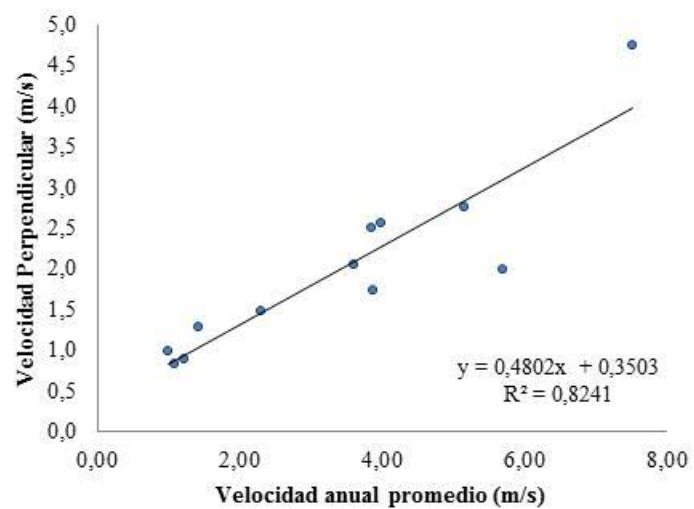


Ilustración 25 Velocidad promedio vs. Velocidad perpendicular
Fuente Autora

14 Resultados

14.1 Determinación función que representa el perfil de concentración de PST y PM10 en las vías analizadas

En primer lugar se parte del supuesto de que todas las funciones coincidirán en una única función, como se mencionó en los antecedentes se parte de que los datos experimentales siguen una función Gamma, por lo cual inicialmente con la ayuda de Excel se buscó ajustar una dicha función a las concentraciones arrojados por el modelo para cada una de las estaciones a la función gamma. La función Gamma era definida aleatoriamente por los parámetros α y β que la componen buscando minimizar el error entre esta y los valores de concentración. Dichos parámetros α y β definen la forma de la función gamma, siendo β el parámetro de escala de la función y α el parámetro de forma. Los resultados gráficos obtenidos en este proceso se presentan a continuación en la Tabla 16.

Tabla 16 Resultados ajustes de las concentraciones a la función Gamma

Estación	Eje predeterminado	Eje logarítmico
UK19260		
Cerrolargo		
Texas		

Fuente Autora

Si bien visualmente se observaba solo en algunos casos un ajuste entre los valores de las concentraciones y la función propuesta, se buscó que hubiera correlación entre los parámetros que definen la función y la velocidad anual promedio. Los resultados de dicho análisis se presentan en la Ilustración 26 evidenciando que no había ningún tipo de correlación, por lo cual se consideró

evaluar más funciones utilizando un software especializado y se reevaluó que no fuera la función gamma la más adecuada para representar el perfil de concentraciones.

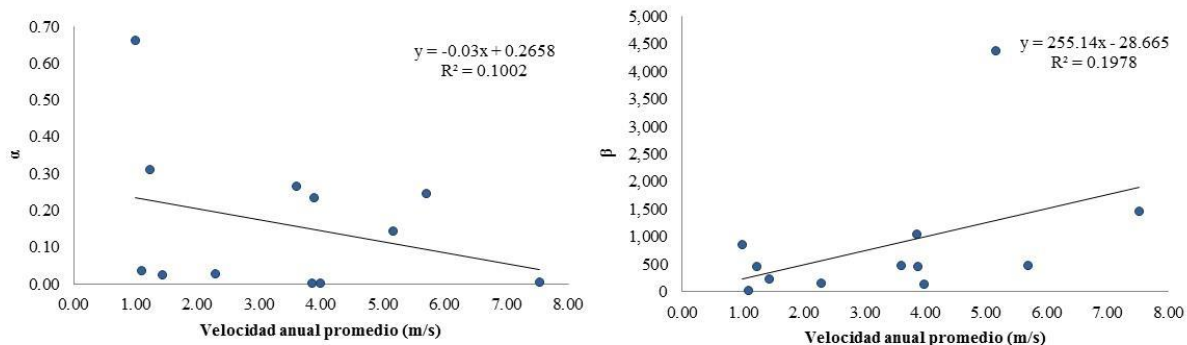


Ilustración 26 Resultados correlación parámetros α y β de la función Gamma y la velocidad anual promedio del viento.

Fuente Autora

- **Ajuste de las concentraciones obtenidas a diferentes funciones**

Analizados los datos de concentración arrojados por el modelo se propuso comparar el perfil de concentraciones contra diferentes funciones buscando determinar la función que mejor representara el comportamiento de los datos.

Para la determinación de tal función se utilizó el software para ajuste de distribuciones EasyFit. Este software permite evaluar cerca de 55 diferentes distribuciones dentro de ellas la distribución Normal, Gamma, Weibull, Log-Pearson, Lognormal, Burr, exponencial, entre otras. EasyFit evalúa las distribuciones por medio de pruebas estadísticas de bondad de ajuste (Chi-cuadrado, Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling) e indica al usuario por medio del parámetro estadístico de p-value si los datos se ajustan a una determinada distribución.

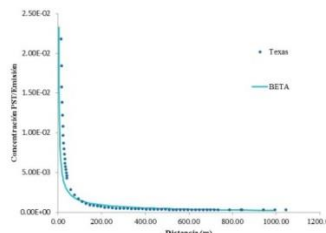
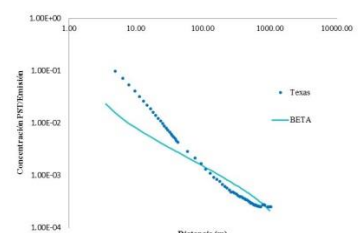
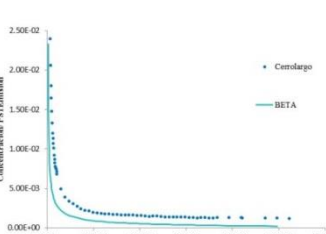
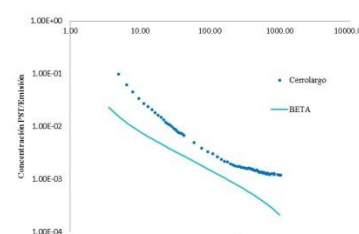
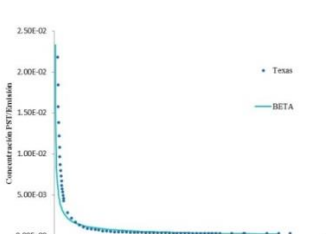
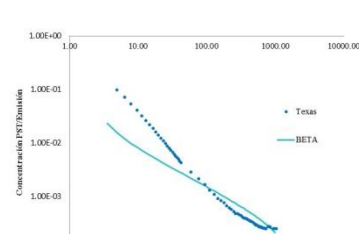
Los datos de entrada para el software EasyFit son los valores de las concentraciones a diferentes distancias vientos debajo de la vía calculadas para cada meteorología utilizada. Una vez introducidos los datos en EasyFit este se encarga de normalizarlos, razón por la cual la función que se llegue a definir a partir del ajuste será adimensional.

Al ejecutar EasyFit, este indica entre todas las funciones evaluadas, cuál es la que mejor representa los datos. Para este caso se revisó los resultados arrojados por la prueba de Kolmogorov con un 95% de confianza, los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 19 y 20.

A diferencia de lo que se esperaba, la función Gamma no fue la función que mejor se ajustó a los datos sino que fue la función Beta. Algunas de las estaciones meteorológicas evaluadas no se ajustaron a ninguna función, sin embargo la función Beta fue la función que mejor se ajustó al mayor número de estaciones en comparación con las demás funciones evaluadas por el software. Los resultados arrojados por EasyFit son presentados en el Anexo 6.

La comparación gráfica para tres de las estaciones evaluadas es presentada en la Tabla 17, esta comparación permite visualizar el comportamiento de las concentraciones divididas por el valor de la emisión frente a la función beta, sin embargo el análisis de los resultados por los cuales se llegó a elegir esta función es presentado en las tablas 19 y 20; la correlación entre los parámetros de la función Beta y la velocidad del viento es presentada en las Ilustraciones 28 y 29.

Tabla 17 Ajuste distribución Beta

Estación	Eje predeterminado	Eje logarítmico
UK09		
Cerrolargo		
Texas		

Fuente Autora

Las variables que involucra la función Beta se presentan en la Tabla 18, donde A y B son constantes ya que representan la distancia en metros mínima y máxima respectivamente, desde centro de la vía.

Tabla 18 Parámetros de la distribución Beta

Variable	Función
Alpha 1 (α_1)	Parámetro de forma
Alpha 2 (α_2)	Parámetro de forma
A	Límite mínimo eje x

Variable	Función
B	Límite máximo eje x

Fuente Autora

A partir del ajuste a Beta se encontró que diez de doce estaciones se ajustaron exitosamente para concentraciones de PST, y seis de doce estaciones se ajustaron exitosamente para las concentraciones de PM10 como se presenta en las Tablas 19 y 20.

Tabla 19 Ajuste distribución Beta para concentraciones de PST a partir del software EasyFit

Estación	α_1	α_2	A	B	Se ajusta a distribución Beta?
UK113	0,28	1,09	2,09	1046,10	Si
UK19260	0,13	0,99	2,09	1046,10	No
UK09	0,10	0,98	2,09	1046,10	No
Calenturitas	0,45	1,21	2,09	1046,10	Si
Descanso	0,39	1,16	2,09	1046,10	Si
Borrego	0,37	1,15	2,09	1046,10	Si
Cerrolargo	0,43	1,19	2,09	1046,10	Si
Texas	0,38	1,16	2,09	1046,10	Si
Cospustexas	0,41	1,18	2,09	1046,10	Si
Buffalo	0,44	1,20	2,09	1046,10	Si
Michigan	0,36	1,15	2,09	1046,10	Si
Alaska	0,40	1,17	2,09	1046,10	Si

Fuente Autora

Tabla 20 Ajuste distribución Beta para concentraciones de PM10 a partir del software EasyFit

Estación	α_1	α_2	A	B	Se ajusta a distribución Beta?
UK113	0,09	1,57	2,09	475,61	No
UK19260	0,04	0,77	2,09	1339,80	No
UK09	0,09	1,57	2,09	475,61	No
Calenturitas	0,08	0,92	2,09	1177,60	No
Descanso	0,17	1,37	2,09	1046,10	No
Borrego	0,10	1,00	2,09	1125,80	No
Cerrolargo	0,39	1,16	2,09	1046,10	Si
Texas	0,34	1,13	2,09	1046,10	Si
Cospustexas	0,38	1,16	2,09	1046,10	Si
Buffalo	0,41	1,18	2,09	1046,10	Si
Michigan	0,34	1,13	2,09	1046,10	Si
Alaska	0,35	1,13	2,09	1046,10	Si

Fuente Autora

La Ilustración 27 presenta las concentraciones arrojadas por AERMOD para las 10 estaciones que sí se ajustan a la función Beta para concentraciones de PST (concentraciones representadas por puntos), y la función de distribución Beta (Línea roja) definida por los parámetros de la Tabla 21.

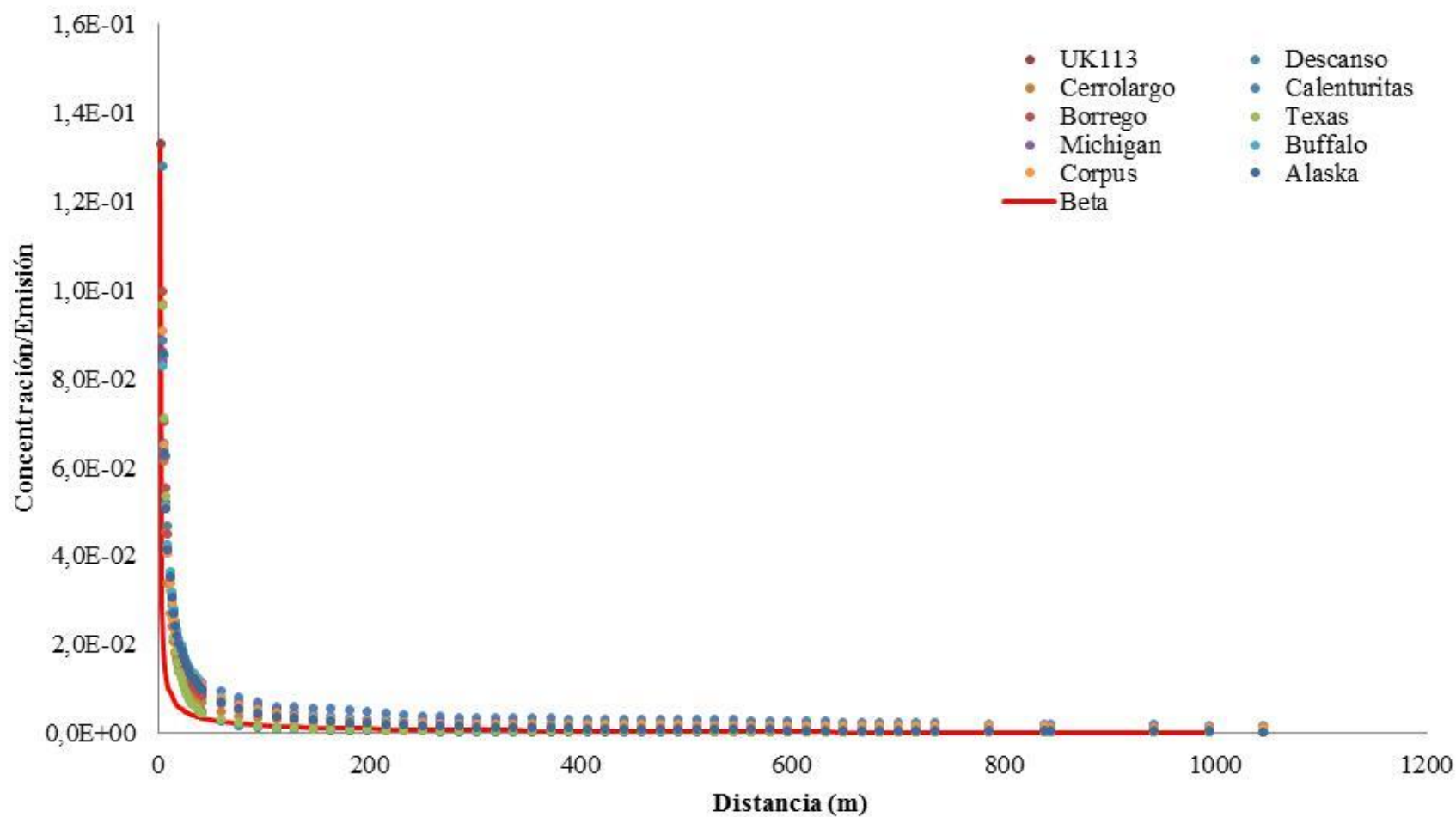


Ilustración 27 Representación gráfica de la función Beta para concentraciones de PST

Fuente: Autora

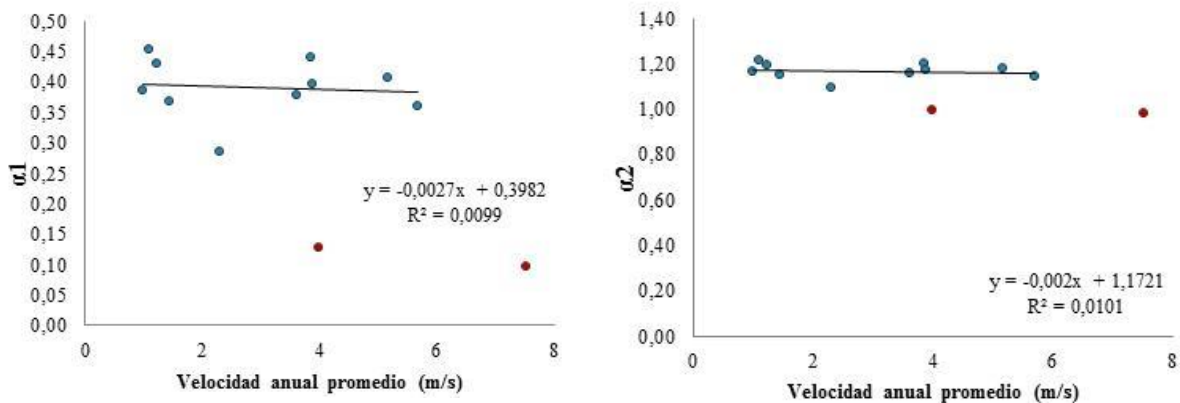
- **Análisis correlación parámetros de la función Beta y velocidad del viento**

Al identificar que la función más acertada para representar las concentraciones a lo largo de la vía sería la función Beta, y no la función Gamma, se procedió a identificar la correlación existente entre los parámetros α_1 y α_2 que definen la función y la velocidad promedio anual de cada meteorología tenida en cuenta.

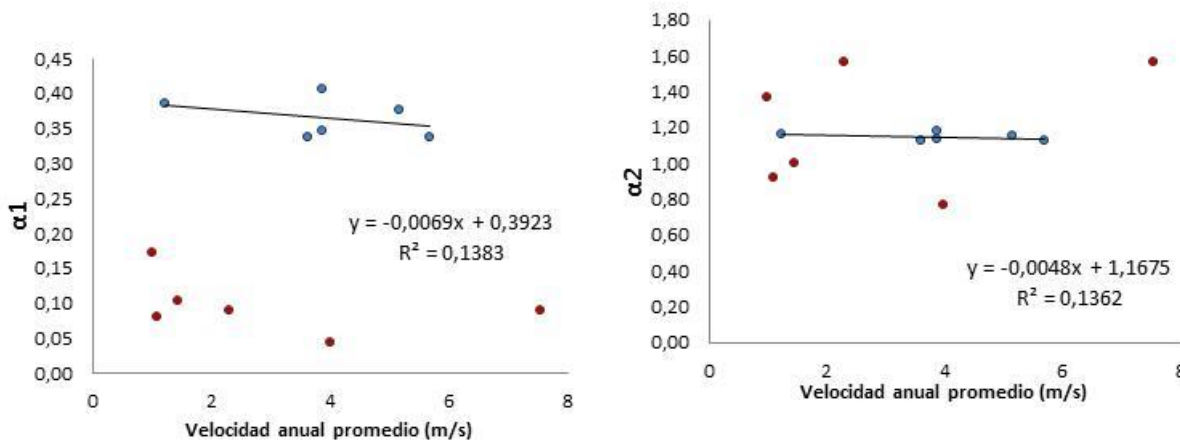
Las Ilustraciones 28 y 29 presentan los resultados obtenidos, en donde los puntos azules representan las estaciones que sí se ajustaron a la distribución Beta mediante el ajuste realizado en Easyfit y los puntos rojos las estaciones que no se ajustaron.

Estas Ilustraciones indican que no existe relación lineal entre los valores de α_1 y α_2 con respecto a la velocidad promedio anual, sino que ambos parámetros permanecen constantes tanto para concentraciones de PM10 como para concentraciones de PST.

Lo anterior indica que existe una única función beta que representa los valores de concentración y que esta no dependerá de la velocidad promedio anual del viento.



Fuente Autora



Fuente Autora

A partir de lo anterior se fijaron los valores para los parámetros α_1 y α_2 para concentraciones de PST y PM10 con base en el promedio de los parámetros determinados para las estaciones que sí presentaron un ajuste (puntos azules de las Ilustraciones 28 y 29).

Tabla 21. Parámetros distribución beta PST y PM10 para cálculo de concentraciones anuales.

Parámetro	PST	PM10
α_1	0.344	0.406
α_2	1.699	1.366
A	0	0
B	10000	10000

Fuente Autora

Los valores promedio, máximos y mínimos identificados para la muestra de datos, al igual que su desviación estándar son presentados en la tabla 22, a partir de la cual se identifica que la variación entre variables es muy pequeña y por lo tanto se concluye que no habrá tendencia alguna al evaluar una correlación entre las diferentes velocidades del viento y los parámetros α_1 y α_2 que definen la función Beta, ya que estos tienden a ser constantes. Cabe mencionar que en este análisis solo se tienen en cuenta los parámetros de los escenarios que sí pueden ser representados por una función beta, los que no, no son incluidos dentro del cálculo del valor promedio.

Tabla 22 Desviación estándar, valores mínimo, máximo y promedio de los parámetros α_1 y α_2 que definen la función beta para PM10 y PST

	PST		PM10	
	α_1	α_2	α_1	α_2
Desviación	0.028	0.020	0.029	0.020
Valor máximo	0.440	1.202	0.406	1.178
Valor mínimo	0.361	1.145	0.103	0.999
Valor promedio	0.344	1.170	0.366	1.149

Fuente: Autora

Si bien se identificó que el perfil normalizado de concentraciones no depende de la velocidad del viento es importante considerar que el contar con direcciones predominantes del viento en una zona provocará que la mayor parte de contaminantes emitidos se dirija en esa dirección. El contar con escenarios de velocidades predominantes permitió identificar que si bien habrá concentraciones en dirección perpendicular a la vía debido efectos de difusión, estas concentraciones no seguirán el mismo perfil de concentraciones identificado para escenarios en los que la distribución de direcciones del viento en la zona sea homogénea. Esto se evidenció en que los escenarios para las meteorologías UK113 y UK09, correspondiente a estaciones ubicadas en zonas costeras, no se ajustaron a una función Beta (Tabla 19).

Por el contrario, este método asume que la distribución de direcciones del viento será uniforme alrededor de la vía. Lo que se evidencia en que escenarios como los generados para las estaciones Descanso, Borrego y Michigan, entre otras, para el caso de concentraciones de PST si sigan una distribución Beta (Tabla 19). Las ilustraciones 30 y 31 ilustran estos comportamientos.

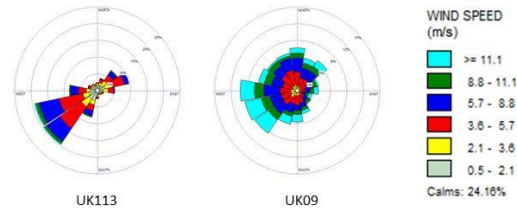


Ilustración 30 Distribución direcciones del viento para escenarios cuyo perfil de concentraciones para PST no es representado por una función Beta

Fuente: Autora

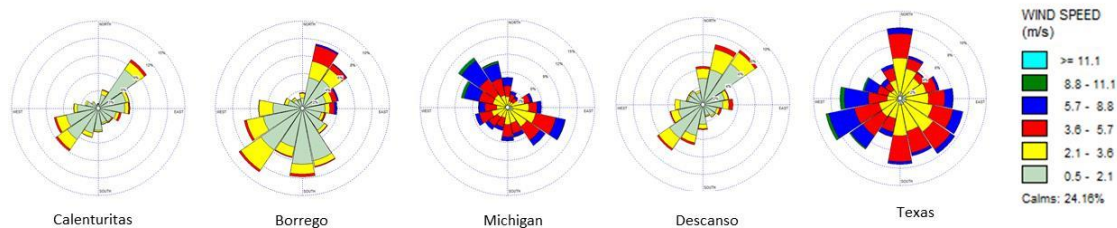


Ilustración 31 Distribución direcciones del viento para escenarios cuyo perfil de concentraciones para PST sí puede ser representado por una función Beta

Fuente: Autora

La ilustración 30 pareciera indicar que la distribución de direcciones del viento en la estación UK09 fuera homogénea, esta cuenta con una dirección predominante en dirección oeste-oriental, con vientos fuertes de velocidades superiores a 11.1m/s. Por otro lado, en la ilustración 31 algunos escenarios cuentan con direcciones predominantes, sin embargo estas son contrarrestadas por sus direcciones opuestas, como por ejemplo para la estación calenturitas.

De esta forma se confirma que direcciones del viento predominantes no seguirán el perfil de concentraciones hallado a partir del método propuesto, y que este estará limitado a distribuciones homogéneas de la dirección del viento en la zona de estudio.

- **Verificación de la función propuesta- Cálculo factor de dispersión F_d**

Teniendo como punto de partida, que existe un único perfil independientemente del tipo de emisión, meteorología o tamaño de la vía que indica el comportamiento de las concentraciones y está representado por la función Beta, se utilizarán para la corrección de la función los datos experimentales mencionados en la sección 8.1 para el departamento de Casanare, y adicionalmente se utilizarán datos experimentales de una vía ubicada en el Departamento de Meta. Esta última vía, al igual que la vía ubicada en Casanare, se encuentra ubicada en un terreno plano y cuenta con el mismo número de

valores experimentales. Mayor información sobre la vía ubicada en el departamento de Meta es presentada en el Anexo 7.

La información de los valores de concentración se presenta en las Tabla 22 para el Departamento de Casanare y Tabla 23 para el Departamento de Meta. Los valores observados corresponden a los valores medidos en campo, y los valores pronosticados corresponden a las concentraciones calculadas a partir de la función Beta multiplicada por la emisión correspondiente en cada vía.

Si bien la función que se propone no ha sido diseñada para arrojar valores puntuales de concentración en un receptor dado, sino que se desarrolla con el fin de tener aproximaciones iniciales de las concentraciones en una determinada zona, se realiza este análisis a fin de proponer un factor de corrección para la función, como se presenta más adelante.

Tabla 23 Vía Departamento de Casanare. Comparación datos experimentales (valores observados) vs. Valores pronosticados por la función propuesta sin factor de corrección en función de la distancia

Distancia	Valores observados ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				Valores pronosticados ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
	PST		PM10		PST		PM10	
(m)	Promedio anual	Máximo diario	Promedio anual	Máximo diario	Promedio anual	Máximo diario	Promedio anual	Máximo diario
8	205.20	842.17	147.86	375.14	309.87	1188.01	207.38	1232.63
63	96.40	352.50	103.59	205.82	66.62	255.41	51.81	159.14
128	56.50	157.16	33.58	70.39	40.99	157.16	33.58	84.46

Fuente Autora

Tabla 24 Vía Departamento de Meta. Comparación datos experimentales (valores observados) vs. Valores pronosticados por la función propuesta sin factor de corrección en función de la distancia

Distancia	Valores observados ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				Valores pronosticados ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
	PST		PM10		PST		PM10	
(m)	Promedio anual	Máximo diario	Promedio anual	Máximo diario	Promedio anual	Máximo diario	Promedio anual	Máximo diario
8	1021.00	2354.73	518.61	1085.99	1488.43	5706.55	786.90	6041.37
63	320.00	1117.42	196.61	608.04	320.00	1226.86	196.61	779.99
128	206.00	842.47	142.99	436.27	196.90	754.91	127.42	413.93

Fuente Autora

Buscado la construcción correcta del método, se verifica comparando los valores presentados en las tablas anteriores contra la predicción de la función. Varios métodos pueden ser útiles para este fin como el error cuadrático medio, error absoluto medio, error absoluto normalizado y el sesgo (Uribe & Suárez, 2009). En este caso se utiliza el error cuadrático medio, definido como:

$$ECM = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\varphi_i - \varphi_{observado})^2}{N}} \quad (9)$$

En donde ECM es el error cuadrático medio, N el número de valores analizados, φ_i el valor pronosticado y $\varphi_{observado}$ el valor experimental. El ECM representará la medida de las diferencias en promedio entre los valores pronosticados y observados.

La Tabla 24 presenta los porcentajes de error para las concentraciones evaluadas en ambas vías en función de la distancia, la Tabla 25 presenta el EMC para cada caso evaluado y el promedio de los porcentajes determinados en la Tabla 24.

Tabla 25 Porcentajes de error para promedios anuales y máximos diarios de PM10 y PST en función de la distancia

Distancia (m)	Casanare				Meta			
	PST		PM10		PST		PM10	
	Promedio anual	Máximo diario	Promedio anual	Máximo diario	Promedio anual	Máximo diario	Promedio anual	Máximo diario
8	51%	41%	40%	229%	46%	142%	52%	456%
63	31%	28%	50%	23%	0%	10%	0%	28%
128	27%	0%	0%	20%	4%	10%	11%	5%

Fuente Autora

Tabla 26 Error medio cuadrático y porcentajes promedio de error

Concentraciones	Casanare		Meta	
	%	EMC	%	EMC
PST Anual	36%	34.28	17%	264.62
PST Diario	23%	143.62	54%	1947.81
PM10 Anual	30%	4.47	21%	145.91
PM10 Diario	90%	476.25	163%	2947.37

Fuente Autora

Los errores presentados anteriormente son resultado de una función determinada a partir de un procedimiento que conlleva una incertidumbre, ya que AERMOD y los factores de emisión de la EPA, además del software EasyFit, tienen un valor de incertidumbre que influyen en la exactitud de la función.

Con base en lo anterior se realizó una calibración al modelo propuesto, entendiendo calibración como un proceso iterativo en el que se comparan los datos de un modelo contra valores del sistema real realizando cambios y ajustes en el modelo hasta que se presente una buena aproximación al sistema real.

Por esta razón se realiza una corrección de la función utilizando los datos experimentales con los que se cuenta para la zona de estudio en Casanare y la vía alterna en Meta a partir de una variable que se denominará factor de dispersión F_d .

Este factor F_d en unidades de s/m se determinó ajustando los datos de la distribución Beta a los datos experimentales aplicando un método de optimización por medio del cual se minimizan los errores entre los datos experimentales y los datos asociados a la curva de la distribución Beta. Este procedimiento se desarrolla en Excel por medio de la herramienta de Solver y se presenta en las Ilustraciones 30 y 31 tanto para valores anuales como para primeros máximos diarios de PST y PM10. La Tabla 26 presenta el resumen de los resultados obtenidos.

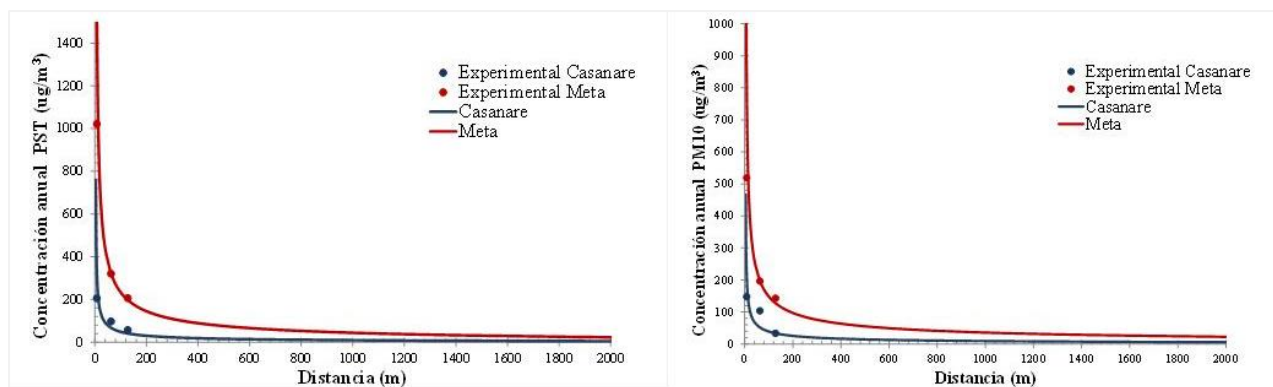


Ilustración 32. Izquierda: concentración anual PST (Promedio geométrico) vs. Distancia. Derecha: concentración anual PM10 (Promedio aritmético) vs. Distancia.

Fuente: Autora

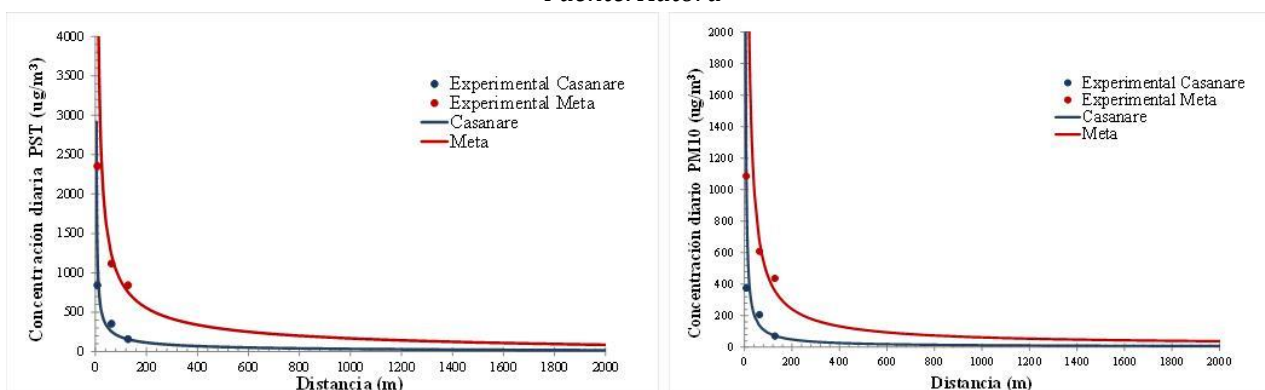


Ilustración 33 Izquierda: concentración de primeros máximos PST vs. Distancia. Derecha: concentración de primeros máximos PM10 vs. Distancia

Fuente: Autora

Una de las desventajas al momento de realizar la calibración de un modelo, consiste en que muchas veces se valida el modelo con el mismo conjunto de datos con que se ha calibrado, lo cual puede llegar a indicar que el modelo se ajuste bien únicamente a un conjunto de datos. Por esta razón se optó por utilizar datos del departamento de Casanare y del departamento de Meta.

Los resultados de la corrección realizada para cada caso fueron muy similares, por lo tanto se tuvieron ambos valores dentro de la propuesta del factor de corrección F_d . Los valores obtenidos se resumen a continuación en la Tabla 26.

Tabla 27 Factores F_d para cada caso evaluado

Concentración	Parámetros	Casanare (s/m)	Meta (s/m)
PST	Media geométrica anual	24.9	24.9
	Primeros máximos	95.48	95.48
PM10	Media aritmética anual	104.2	80.72

Concentración	Parámetros	Casanare (s/m)	Meta (s/m)
	Primeros máximos	257	257

Fuente: Autora

A partir de la anterior tabla, es posible identificar que el único caso en el que los factores de corrección, denominados de aquí en adelante para la función propuesta “factor de dispersión Fd”, correspondió a las concentraciones promedio anual de PM10, lo que indica que la función se ajusta a más de un conjunto de datos. Para el caso en que no coincidieron los Fd, como se presentará más adelante en la Tabla 27, se optó por calcular el promedio entre ambos factores a fin de dejar un único factor Fd.

Ahora bien, se definió un único Fd para la estimación de concentraciones para las vías de Casanare y Meta, estas zonas resultan ser muy similares en cuanto a características geográficas y meteorológicas, sin embargo al desear aplicar este método en otras zonas es muy probable que el Fd no se mantenga constante. Razón por la cual la función propuesta estará limitada a vías con material similar al material que compone la vía de estudio.

- **Función propuesta para determinar el perfil de concentraciones perpendicular a una vía no pavimentada**

A partir de lo anterior, fue posible determinar que la función que permitirá calcular el perfil de concentraciones para una vía no pavimentada será de la forma:

$$C(\mu\text{g}/\text{m}^3) = E * Fd \text{ Beta}(\alpha_1, \alpha_2, A, B) \quad (10)$$

En donde α_1 , α_2 , A y B son parámetros definen la función Beta, debido a que esta función fue determinada a partir de la normalización de los datos por Easyfit, será adimensional. Fd corresponde al factor de dispersión en unidades de s/m y E la emisión en unidades de $\mu\text{g}/\text{s m}^2$.

La Tabla 27 presenta el resumen de los factores de dispersión estimados y los valores adimensionales de la función beta para el cálculo de concentraciones anuales y primeros máximos tanto de PST como PM10.

Tabla 28 Parámetros función propuesta

	Parámetros	Factor de dispersión (s/m)	α_1	α_2
PST	Media geométrica anual	24.90	0.34	1.69
	Primeros máximos	95.48	0.12	0.59
PM10	Media aritmética anual	92.50	0.40	1.36
	Primeros máximos	257.00	0.12	0.59

Fuente autora

De esta forma se propusieron cuatro diferentes funciones con el fin de determinar el área de influencia ambiental por concentraciones anuales de PST y PM10 (obtenida a partir de concentraciones

promedios anuales) y con el fin de determinar el área de influencia ambiental por concentraciones diarias de PST y PM10 (obtenida a partir de concentraciones de primeros máximos diarios). Dependiendo del tipo de escenario a evaluar (concentraciones diarias, concentraciones anuales, PM10 o PST) se comparan las funciones propuestas contra las concentraciones estipuladas en la norma de calidad de aire, de esta forma la distancia que delimita el área de influencia ambiental estará definida como la distancia en la que la norma de calidad de aire intercepta la función, en otras palabras, la distancia hasta la cual se deja de superar la norma de calidad de aire. Lo cual se explica de manera más detallada en las secciones 11 y 12.

14.2 Cálculo de incertidumbre

A partir de la propagación de la incertidumbre de cada variable involucrada en la función propuesta se determinó que la predicción de concentraciones de PST oscilará entre $\pm 20\%$, y de PM10 entre $\pm 6\%$. Estos porcentajes se reflejarán en una variación de $\pm 21\%$ y $\pm 9\%$ en el cálculo del área de influencia para PST y PM10 respectivamente. Tales incertidumbres son presentadas en la Tabla 29.

Tabla 29 Incertidumbre en el área de influencia por emisiones de PST y PM10

Aspecto	PM10			PST		
	Valor	Incertidumbre absoluta	Porcentaje de incertidumbre	Valor	Incertidumbre absoluta	Porcentaje de incertidumbre
Área de influencia (m ²)	20730.51	1892.00	9%	20730.51	4327.31	21%
Concentración (µg/m ³)	9.86	0.62	6%	9.65	1.98	21%
Función Beta (s/m)	1.87E-04	2.86E-06	2%	2.24E-04	1.19E-05	5%
Emisión (µg/s*m ²)	506.00	30.68	6%	1730.00	343.49	20%
Factor de emisión (g/VKT)	707.03	42.87	6%	2416.60	479.81	20%

Fuente: Autora

La forma como se calcularon y propagaron las incertidumbres presentadas se explica a continuación para lo cual se toma como punto de partida que las incertidumbres son independientes una de otra y que la forma como se combinarán dependerá de la forma como se calcule cada variable (University of Pennsylvania, 2011). Por definición la incertidumbre de una función $z = g(x, y)$ será expresada como:

$$\sigma_z^2 = \sigma_x^2 \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \sigma_y^2 \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 \quad (11)$$

Donde σ_z^2 es el cuadrado de la incertidumbre de la función, σ_x^2 el cuadrado de la incertidumbre de la variable x , σ_y^2 la incertidumbre de la variable y , $\frac{\partial z}{\partial x}$ y $\frac{\partial z}{\partial y}$ las derivadas z de la función con respecto a x y a y respectivamente.

Teniendo en cuenta que la función propuesta depende de las variables presentadas en la ecuación 12, su incertidumbre (σ_c) podrá ser expresada por la ecuación 13:

$$C = F_d * E * \beta_{eta}(\alpha_1, \alpha_2, A, B) \quad (12)$$

$$\sigma_C^2 = \sigma_{Fd}^2 \left(\frac{\partial C}{\partial Fd} \right)^2 + \sigma_E^2 \left(\frac{\partial C}{\partial E} \right)^2 + \sigma_\beta^2 \left(\frac{\partial C}{\partial \beta} \right)^2 \quad (13)$$

$$\sigma_C^2 = C^2 * \left(\left(\frac{\sigma_E}{E} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_\beta}{\beta} \right)^2 \right) \quad (14)$$

Al ser el factor de dispersión una constante su derivada será cero, y por tanto el valor de la incertidumbre de la concentración dependerá únicamente de la propagación de la incertidumbre de la emisión calculada y de la incertidumbre de la función Beta.

La incertidumbre de la emisión corresponderá a la propagación de las incertidumbres del factor de emisión y del factor de actividad como se ilustra en las ecuaciones 15 y 16.

$$E = FE * FA \quad (15)$$

$$\sigma_E^2 = \sigma_{FE}^2 \left(\frac{\partial E}{\partial FE} \right)^2 + \sigma_{FA}^2 \left(\frac{\partial E}{\partial FA} \right)^2 \quad (16)$$

$$\sigma_E^2 = E^2 * \left(\left(\frac{\sigma_{FE}}{FE} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{FA}}{FA} \right)^2 \right) \quad (17)$$

Para conocer la incertidumbre del factor de emisión (σ_{FE}) será necesario propagar la incertidumbre del porcentaje de sólidos resuspendidos en la vía y del peso de los vehículos que la transitan.

Si bien no se cuenta con más de una medida del porcentaje de sólidos para la vía de estudio, su incertidumbre (σ_S^2) puede ser calculada a partir de la precisión de la balanza. Teniendo en cuenta que el porcentaje de sólidos es calculado como se presenta en la ecuación 18, donde m_{200} corresponde a la masa de la muestra que atraviesa un tamiz de malla 200 y m_T la masa total de la muestra, se calcula la incertidumbre como se ilustra en la ecuación 19.

$$\%S = \frac{m_{200}}{m_T} * 100 \quad (18)$$

$$\sigma_S^2 = \left(\frac{m_{200}}{m_T} \right)^2 * \left(\left(\frac{\sigma_{m_{200}}}{m_{200}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{m_T}}{m_T} \right)^2 \right) \quad (19)$$

Las incertidumbres de m_{200} y m_T fueron calculadas a partir de la ecuación 20 y 21 respectivamente. Partiendo que la precisión del equipo es de 0.1 y por tanto su linealidad será de 0.05.

$$\sigma_{m_{200}} = 0.05 * m_{200} \quad (20)$$

$$\sigma_{m_T} = 0.05 * m_T \quad (21)$$

Para realizar el cálculo de la incertidumbre del peso (σ_W^2), diferentes fichas técnicas de cada una de las categorías de los vehículos trabajados fueron consultadas al azar a fin de contar con diferentes valores de peso de los vehículos y calcular la desviación estándar de cada categoría, acto seguido se utilizó la ecuación 22 para obtener una sola desviación representativa del peso.

$$\sigma_W^2 = \sum \left(\frac{N_i}{N_T} * W_i \right)^2 * \sum \left(\frac{\sigma_{wi}}{W_i} \right)^2 \quad (22)$$

Los valores estimados a partir de las anteriores ecuaciones se presentan en la Tabla 30.

Tabla 30 Valores de incertidumbres estimados para peso y porcentaje de sólidos

Variable	Valores calculados	Incertidumbre absoluta (σ)	(σ^2)	Porcentaje de incertidumbre
W (Ton)	14.98	2.48	6.14	17%
S (%)	9.5	0.49	0.24	5%
m200 (g)	97	4.85	23.5	5%
mT (g)	1000.4	50.02	2502.0	5%

Fuente: Autora

Teniendo en cuenta lo anterior la incertidumbre del factor de emisión para PST se estimará a partir de la ecuación 23 y para PM10 en la ecuación 24.

$$\sigma_{FE_{PST}}^2 = \sigma_S^2 * (0.01029 * W^{0.45} * S^{-0.3})^2 + \sigma_W^2 (0.06615 * S^{0.7} * W^{-0.55})^2 \quad (23)$$

$$\sigma_{FE_{PM10}}^2 = \sigma_S^2 * (0.0243 * W^{0.45} * S^{-0.1})^2 + \sigma_W^2 (0.0122 * S^{0.9} * W^{-0.55})^2 \quad (24)$$

En el caso la incertidumbre del factor de actividad la propagación se realiza a partir del número de vehículos que transitan la vía (σ_{FA}), al contar con el valor horario de aforos vehiculares de las diferentes categorías trabajadas se calcula la desviación estándar de los datos y se multiplica por las constantes que definen el factor de actividad.

De esta forma, al contar con la propagación de incertidumbre para el factor de emisión y el factor de actividad se propaga la incertidumbre para el valor de la emisión (tanto para concentraciones de PST y PM10) obteniendo los valores presentados en la Tabla 1. A partir de esto únicamente resta conocer el valor de la incertidumbre de la función Beta y estimar la propagación de la incertidumbre para la función propuesta.

La incertidumbre para la función Beta se calcula a partir de las desviaciones estándar de los parámetros que la definen. Debido a que $\alpha 1$ y $\alpha 2$ fueron obtenidos como el promedio de los a calculados para cada escenario se cuenta con la desviación estándar de los mismos como se presenta en la tabla 31.

Tabla 31 Incertidumbre de parámetros $\alpha 1$ y $\alpha 2$ de la función Beta

	PST		PM10	
	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\alpha 1$	$\alpha 2$
Promedio	0.344	1.170	0.366	1.149
Incertidumbre (σ)	0.028	0.020	0.029	0.020

Fuente: Autora

Debido a que la función Beta varía en función a la distancia a la vía se calculó la incertidumbre de Beta y de la función propuesta a diferentes distancias de la vía, con base en la incertidumbre de las concentraciones se calculó la incertidumbre del área de influencia siguiendo los pasos del método

propuesto. Los resultados para las 8 distancias evaluadas se presentan en las tablas 32 y 33, en donde se identificó que la incertidumbre del área de influencia obtenida a partir de concentraciones de PST oscila entre 19% y 23%, mientras que la incertidumbre para áreas de influencia estimadas a partir de concentraciones de PM10 oscila entre 5% y 14%.

Tabla 32 Incertidumbre área de influencia para concentraciones de PST a diferentes distancias con respecto a la vía

Distancia a la vía	PST					
	Concentración	Incertidumbre absoluta concentración	Porcentaje de incertidumbre concentración	Área de influencia	Incertidumbre absoluta área de influencia	Incertidumbre porcentual área de influencia
6.51	375.35	82.71	22%	143.14	26.54	19%
14.93	186.24	38.82	21%	328.41	71.01	22%
23.58	132.68	27.11	20%	518.76	116.16	22%
59.91	68.96	13.76	20%	1318.07	306.07	23%
128.00	40.99	8.14	20%	2816.00	653.40	23%
267.53	24.63	4.92	20%	5885.73	1353.73	23%
492.46	15.91	3.22	20%	10834.05	2421.25	22%
942.30	9.65	1.98	21%	20730.51	4327.31	21%

Fuente: Autora

Tabla 33 Incertidumbre área de influencia para concentraciones de PM10 a diferentes distancias con respecto a la vía

Distancia a la vía	PM10					
	Concentración	Incertidumbre absoluta concentración	Porcentaje de incertidumbre concentración	Área de influencia (m2)	Incertidumbre absoluta área de influencia (m2)	Incertidumbre porcentual área de influencia
6.51	246.66	35.19	14%	143.14	17.82	12%
14.93	142.61	17.36	12%	290.38	41.80	14%
23.58	78.78	7.87	10%	709.06	97.46	14%
59.91	53.45	4.63	9%	1318.07	165.00	13%
128.00	33.58	2.45	7%	2816.00	308.00	11%
267.53	22.34	1.44	6%	5505.08	537.46	10%
492.46	15.82	0.96	6%	9692.09	452.10	5%
942.30	9.86	0.62	6%	20730.51	1892.00	9%

Fuente: Autora

Cabe mencionar que si bien la función Beta parte del modelo de dispersión AERMOD que ya cuenta con un valor de incertidumbre, esta función está siendo corregida a datos experimentales. Por otro lado el centro de investigación en mecatrónica automotriz CIMA buscando contar con un método alternativo de confirmar los resultados obtenidos, simuló la dispersión del material particulado en vías no pavimentadas usando paquetes computacionales de mecánica de fluidos (CFD – computational fluid dynamics). Aunque esta alternativa aun no es reconocida por las autoridades ambientales para realizar estudios de impacto ambiental con carácter regulatorio, es una alternativa reconocida por la comunidad científica para el estudio del movimiento de los fluidos. Esta

herramienta provee información detallada sobre el movimiento de las partículas cuando son arrastradas por el aire. La ilustración 34 muestra el tipo de resultados obtenidos.

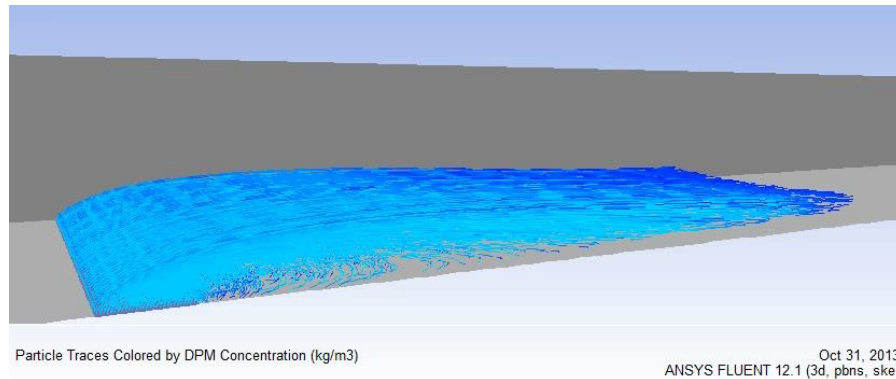


Ilustración 34 Simulación de la dispersión de material particulado desde una vía no pavimentada usando un paquete computacional de mecánica de fluidos (abajo)

Fuente: (Pratto & Huertas, 2013)

Los resultados al analizar los perfiles de concentraciones para los datos obtenidos utilizando este modelo indicaron que la concentración de PST y PM10 en función de la distancia a la vía es descrita por una distribución beta. La comparación entra la función propuesta a partir de AERMOD y la función propuesta en CFD está considerada como un trabajo a futuro.

14.3 Comparación datos experimentales con datos AERMOD

Esta comparación se hace únicamente con el fin de saber la forma como AERMOD predice los datos, más no es el objetivo del estudio realizar una validación del modelo con los datos de la zona sino el identificar una función que represente el perfil de concentraciones.

Es importante conocer que la meteorología utilizada era de 11 días razón por la cual la precisión de las concentraciones estimadas por el modelo se reduce.

La comparación entre datos que predice un modelo y observaciones reales permite contar con una guía del desempeño general del modelo.

A partir de las modelaciones de material particulado en AERMOD para las vías de Casanare y Meta utilizando como información meteorológica la meteorología obtenida durante la campaña de muestreo se realizó la comparación de concentraciones de AERMOD con las concentraciones obtenidas durante el monitoreo realizado a 8, 60 y 120m con respecto al centro de la vía. Las concentraciones arrojadas por AERMOD para cada vía y los valores experimentales son presentados en la tabla 34.

Tabla 34 Concentraciones AERMOD y concentraciones experimentales a 8, 63 y 128m con respecto a la vía

Distancia	Concentraciones AERMOD (mg/m3)		Concentraciones experimentales (mg/m3)	
	Meta	Casanare	Meta	Casanare
8	360.75	9.48	1021.00	205.20
63	382.44	35.03	320.00	96.40

Distancia	Concentraciones AERMOD (mg/m3)		Concentraciones experimentales (mg/m3)	
	Meta	Casanare	Meta	Casanare
128	441.19	69.67	206.00	56.50

Fuente: Autora

Diferentes métricas como sesgo fraccional, relación de promedios, sesgo fraccional medio, entre otras, fueron evaluadas a fin de contar con distintos puntos de comparación y lograr tener un punto de referencia del modelo. La comparación de estas métricas es presentada en la Tabla 35. Cada una de estas métricas y lo que su valor significa es explicado a continuación.

Tabla 35 Comparación diferentes métricas

Métrica	Meta	Casanare
RATIO	1.35	0.58
FB	0.27	1.03
FBIAS	23%	-78%

Fuente: Autora

- Relación de promedios (Ratio)

Es una métrica que indica si hay sobreestimación o subestimación de concentraciones a partir de la relación del promedio de las concentraciones arrojadas por el modelo y el promedio de las concentraciones experimentales (EPA, 2007).

$$Ratio = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{model}{obs} \quad (25)$$

En donde N corresponde al número de datos. De ser la relación de promedios mayor a 1 indica sobreestimación de concentraciones, de lo contrario subestimación. En este caso (Tabla 35) para la vía de meta se predice sobreestimación y para la vía ubicada en Casanare subestimación.

- Sesgo fraccional (FB)

Evalúa la sobreestimación o subestimación del modelo a partir de la diferencia del promedio de datos observados (OB) y el promedio de datos arrojados (PR) por el modelo en relación a la suma de los mismos (EPA, 1992).

$$FB = 2 \left[\frac{OB-PR}{OB+PR} \right] \quad (26)$$

De ser el valor determinado menor a 2 o mayor a 2 se indicará una sobreestimación o subestimación extrema respectivamente. Valores en un rango de ± 0.3 indicarán una predicción adecuada. El cero será la predicción perfecta. Para el caso evaluado se indica una predicción adecuada para la vía localizada en el departamento de Meta, mientras que para la vía localizada en Casanare se indica una subestimación (Tabla 35).

- Sesgo fraccional medio (FBIAS)

El sesgo fraccional medio corresponde a la sumatoria de la relación entre valores modelados y observados en campo, e indicará sobreestimación o subestimación de concentraciones dependiendo

si su porcentaje se encuentra entre -0.67% ó +0.67% (EPA, 2007). En este caso se observó (Tabla 35) que para la vía ubicada en el Meta hay sobreestimación de concentraciones, mientras que para la vía ubicada en el Casanare hay subestimación de concentraciones.

$$FBIAS = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{(model-obs)}{(model+obs)} \right) * 100\% \quad (27)$$

Al comparar las diferentes métricas el resultado general indica la modelación para la vía ubicada en Meta tenderá a sobreestimar las concentraciones, mientras que la modelación de la vía para Casanare a subestimarlas. De igual forma se halló que el error fue mayor para la vía ubicada en Casanare.

Sin embargo, vale la pena tener en cuenta que en este caso, la meteorología con la que se contaba para la modelación era de 11 días razón por lo cual el modelo no es tan preciso en la estimación de concentraciones como lo puede llegar a ser si contara con información de todo un año. Es por esta razón que se recomienda que las campañas de muestreo y campañas meteorológicas se puedan hacer si bien no a lo largo de todo un año, durante diferentes periodos de forma que se tenga información que sea más representativa del año de evaluación.

15 Limitaciones del método propuesto

Si bien al momento de proponer una función, se buscó el uso de diferentes meteorologías con el motivo de identificar que el perfil de concentraciones fuera en todos los casos representado por la misma función, y también para darle aplicación a la función propuesta, existen limitaciones que generan que tal función sea útil en unas únicas zonas. A continuación se enumeran las principales condiciones para las cuales es válida la aplicación del método Screening propuesto:

- Zonas con relieve plano
- Uso y tipo de suelo similar al de la zona de estudio (Ver sección 8.1)
- Aplica para velocidades superiores a 1m/s
- Zonas que no cuenten con una única velocidad del viento predominante (como por ejemplo zonas costeras)

Las limitaciones por relieve y tipo de suelo se presentan debido a que son aspectos que modifican la turbulencia y fricción. En caso de tener un relieve montañoso aumentará la turbulencia mecánica modificando dirección y velocidad del viento y por ende el perfil de concentraciones aquí propuesto.

La limitación para velocidades inferiores a 1m/s se da debido a que la función determinada parte de AERMOD, y este no es preciso al momento de evaluar velocidades inferiores a 1m/s, además de presentar dificultades al momento de evaluar calmas.

La limitación por velocidades de viento preferenciales está dada porque en el desarrollo del método se asume que la velocidad del viento es constante en cualquier punto del sistema de coordenadas a lo largo del área de estudio; si se considera una dirección de viento preferencial la mayor concentración de contaminantes se encontrará en la dirección predominante que haya en la zona. El tener en cuenta diferentes meteorologías durante la determinación de la función permitió verificar este aspecto, en donde estaciones como UK113 y UK09 ubicadas en zonas costeras no se ajustaron a ninguna función, lo que indica que en este caso es probable que el perfil de concentraciones diste de seguir la forma de una campana gaussiana.

Otra limitación es dada por el material que compone la vía, si bien la función beta no depende de este aspecto y la emisión involucra dentro de su cálculo el tipo de material de la vía, el factor de corrección determinado fue hallado a partir de dos vías con material similar, razón por la cual la función estará limitada al material de estas dos vías. En caso de buscar su aplicación para otro tipo de materiales es necesario calcular la incertidumbre de la función mediante su aplicación en diferentes vías, heterogéneas entre sí.

11 Protocolo para determinar el área de influencia en vías no pavimentadas

A partir de la función propuesta se propone un método de aproximación inicial que permita realizar una estimación de la dispersión de concentraciones para material particulado PST y PM10.

15.1 Método de aproximación inicial

A continuación en la Ilustración 35 se presentan los pasos para la determinación del área de influencia ambiental utilizando método de aproximación inicial, posteriormente se describe cada uno de ellos.

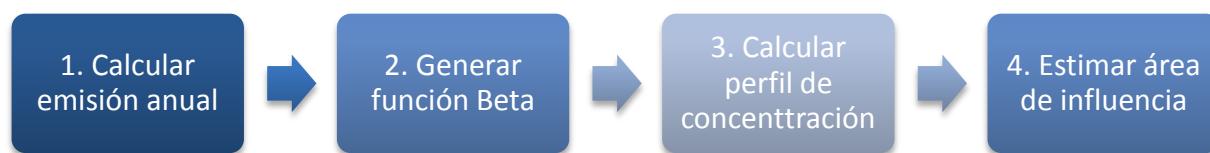


Ilustración 35 Procedimiento para utilizar método Screening

Fuente Autora

- **Estimar la emisión promedio anual**

Obtener la emisión promedio anual, a partir del cálculo de factores de emisión empleando las ecuaciones de la sección 6.1.

- **Generar función beta**

Generar la función Beta de acuerdo con los parámetros de la Tabla 36 y según el escenario que se desee evaluar (área de influencia por concentraciones anuales de PST y PM10, o área de influencia por concentraciones diarias de PST y PM10)

Tabla 36 Parámetros función propuesta

	Parámetros	Factor de dispersión (s/m)	$\alpha 1$	$\alpha 2$
PST	Media geométrica anual	24.90	0.34	1.69
	Primeros máximos	95.48	0.12	0.59
PM10	Media aritmética anual	92.50	0.41	1.36
	Primeros máximos	257.00	0.12	0.59

Fuente Autora

- **Calcular las concentraciones**

Calcular el perfil de concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ empleando las ecuaciones 28 y 29 presentadas a continuación.

$$C_d = Fd E \text{Beta}(\alpha 1, \alpha 2, a, b)$$

Ec. 28 Para comparar contra norma diaria

$$C_a = Fd E \text{Beta}(\alpha1, \alpha2, a, b)$$

Ec. 29 Para comparar contra norma anual

Donde:

Fd : Factor de dispersión diario o anual según corresponda (s/m)

$\alpha1$: Parámetro de forma

$\alpha2$: Parámetro de forma

a : Límite inferior eje x (0 m)

b : Límite superior eje x (10000 m)

E : Emisión ($\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)

La distancia que delimita el área de influencia es calculada a partir del perfil de concentraciones generado mediante la función propuesta como la intersección entre la norma de calidad de aire y Cd .

- **Estimar el área de influencia**

Calcular el área de influencia ambiental teniendo en cuenta que esta es la Franja paralela a la vía cuyo ancho está definido por la intercepción entre la norma de calidad del aire y Cd . Esta franja se calcula a partir de la ecuación 30, partiendo de la distancia calculada y la longitud de la vía.

$$A_{in} = d * l \quad (30)$$

En donde A_{in} corresponde al área de influencia a un costado de la vía en km^2 , d la distancia que delimita el área de influencia (km) y l la longitud del tramo vial evaluado (km). Se asume que a ambos costados de la vía el área de influencia será la misma, por tanto es posible calcular el área de influencia total mediante la ecuación 31.

$$A_{in} = 2d * l \quad (31)$$

15.2 Método Refinado

La Ilustración 36 resume los pasos para la determinación del área de influencia ambiental utilizando método Refinado. Según la *US EPA (2005)*, AERMOD puede ser utilizado como una herramienta de modelación refinada, por lo cual se propone utilizar este modelo al momento de querer determinar el área de influencia siguiendo una herramienta más precisa.



Ilustración 36 Procedimiento método Refinado

Fuente Autora

- **Calcular emisión anual**

Se propone el uso de factores de emisión AP-42 explicados en la sección 6.1

- **Procesar información meteorológica**

Para el procesamiento meteorológico se requiere información meteorológica como mínimo anual y con datos horarios de nubosidad, radiación solar, velocidad y dirección del viento y temperatura.

- **Modelar utilizando Aermod**

Una vez ejecutado el modelo será necesario extraer como mínimo valores de concentraciones promedio anual y primeros máximos.

- **Validación de resultados**

Graficar los resultados de la simulación evaluando concentración vs. Distancia y realizar la verificación correspondiente con valores experimentales.

- **Determinar área de impacto**

Calcular el área de impacto ambiental teniendo en cuenta que esta es la Franja paralela a la vía cuyo ancho está definido por la intercepción entre la norma de calidad del aire y C_d

12 Aplicación del método propuesto

Como ejemplo de aplicación del método Screening se desarrollan dos escenarios para las vías trabajadas a partir de diferentes emisiones. El primer escenario se denominó “Peor escenario” y se obtuvo tomando el máximo flujo vehicular que pasó durante el periodo de muestreo, multiplicado por el factor de emisión asociado a cada tipo de vehículo, con las ecuaciones presentes en la sección 6.1 para obtener la emisión final.

El segundo escenario, denominado “Escenario extremo” se obtuvo a partir de diferentes aforos vehiculares realizados en ciudades de Estados Unidos sobre vías pavimentadas de alto flujo vehicular, donde se obtuvo que el número promedio de vehículos que transitaban era de 390 vehículos/hora. De igual forma al caso anterior se calcularon las emisiones a partir de factores de emisión. Tales resultados se presentan a continuación en la Tabla 37. Información más específica de los aforos utilizados para cada escenario es presentada en el Anexo 8.

Tabla 37 Emisiones para Peor escenario y Escenario extremo

Escenario	Emisión (g/s m ²)	
	PST	PM10
Extremo	0.0203	0.006
Peor	0.0647	0.0189

Fuente Autora

A partir de las variables de la función beta presentadas anteriormente en la sección 9.1 se generó el perfil de concentraciones y se procedió a comparar con la norma de calidad de aire. Las Ilustraciones 38 y 39 presentan los perfiles obtenidos para concentraciones anuales y primeros máximos de PST y PM10 en cada escenario y el punto en el cual se deja de superar las concentraciones de la norma de calidad de aire. La Tabla 38 presenta las distancias asociadas al área de influencia, obtenidas a partir del análisis gráfico para los dos escenarios generados.

Tabla 38 Distancias asociadas al área de influencia para PM10 y PST en los escenarios peor y extremo

Contaminante/ Periodo	Observación	Distancia peor escenario (m)		Distancia escenario extremo (m)	
		PST	PM10	PST	PM10
Anual	Promedio geométrico para PST y aritmético para PM10	700	2000	3200	9200
Diaria	Primeros máximos	500	1350	1850	5500

Fuente Autora

A partir de la función propuesta se obtiene la distancia que delimita el área de influencia a un costado de la vía, sin embargo para obtener el área es necesario multiplicar dicha distancia por la longitud de la vía evaluado (en este caso corresponde a 13.11km) como se explica en la sección 11.1.

La Ilustración 37 representa el área de influencia en la vía de estudio por la resuspensión de material particulado. El área rojo oscuro representa el área de influencia bajo el escenario extremo, el color rojo claro representa el área de influencia bajo el peor escenario. Las ilustraciones de las áreas de influencia por PST y PM10 para cada periodo estimado (anual y diario) son presentadas en el Anexo 8.



Ilustración 37 Delimitación área de influencia. a) Área de influencia por PST para periodo anual. b). Área de influencia por PM10 para periodo anual

Fuente Autora

El resultado de las áreas calculadas para cada periodo bajo los escenarios peor y extremo se presenta a continuación en la Tabla 39.

Tabla 39 Áreas de influencia por resuspensión de material particulado bajo peor escenario y escenario extremo.

Contaminante/Periodo	Área peor escenario (km2)		Área escenario extremo (km2)	
	PST	PM10	PST	PM10
Anual	18.35	52.44	83.90	241.22
Diaria	13.11	35.39	48.50	144.21

Fuente Autora

A partir de la tabla anterior se identifica que la mayor área de influencia por resuspensión está dada por material particulado PM10 para el periodo anual, debido a que la distancia desde el centro de la vía hasta el punto en el que la concentración llega a disminuir hasta $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ es mayor que en los casos en que la concentración debe disminuir hasta 300 o $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Al ser más susceptible el ser humano a este tipo de contaminante, la norma de calidad de aire es más estricta para PM10 que para PST.

El peor escenario arroja las distancias que se podrían llegar a presentar con el máximo flujo vehicular que soporte la vía, en otras palabras la mayor influencia que se puede llegar a generar sobre la zona de estudio es hasta una distancia de 2 km medida sobre una línea perpendicular a la vía tomando como referencia el centro de la misma. De igual forma, el segundo escenario (escenario extremo) es calculado a partir de un flujo vehicular mayor al que podría soportar la vía, sin embargo

indica que aun cuando se llegue a presentar un escenario extremo la distancia que delimita el área de influencia de la vía no debería superar 9 km.

Como se ha mencionado anteriormente, a manera de apoyo y complemento será recomendable una vez obtenida una primera aproximación a partir de este método screening utilizar modelos como AERMOD para reafirmar tal área de influencia.

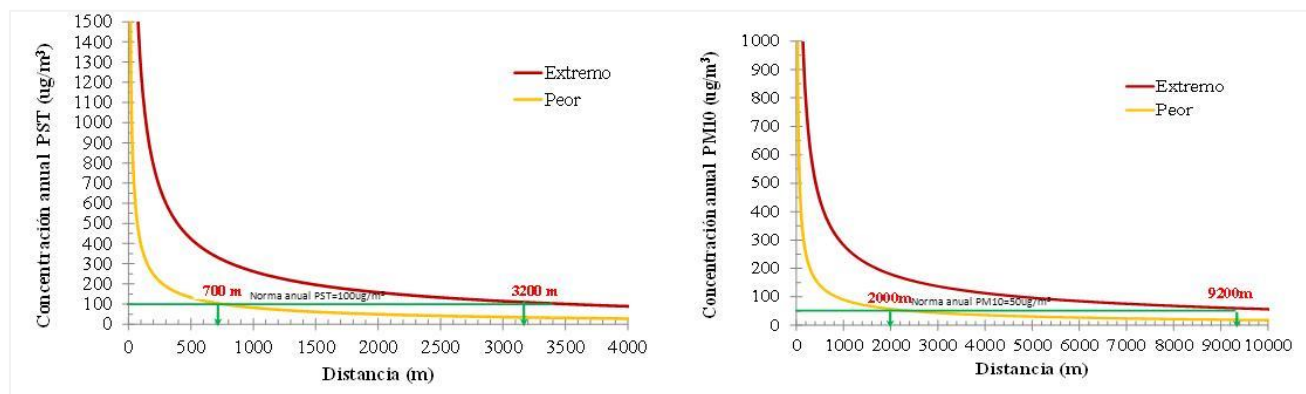


Ilustración 38 Distancia que delimita el área de influencia con escenarios Peor y Extremo. Derecha: Distancia que delimita el área de influencia para concentraciones anuales de PST en Casanare. Izquierda: Distancia que delimita el área de influencia para concentraciones anuales de PM10 en Casanare. Fuente Autora

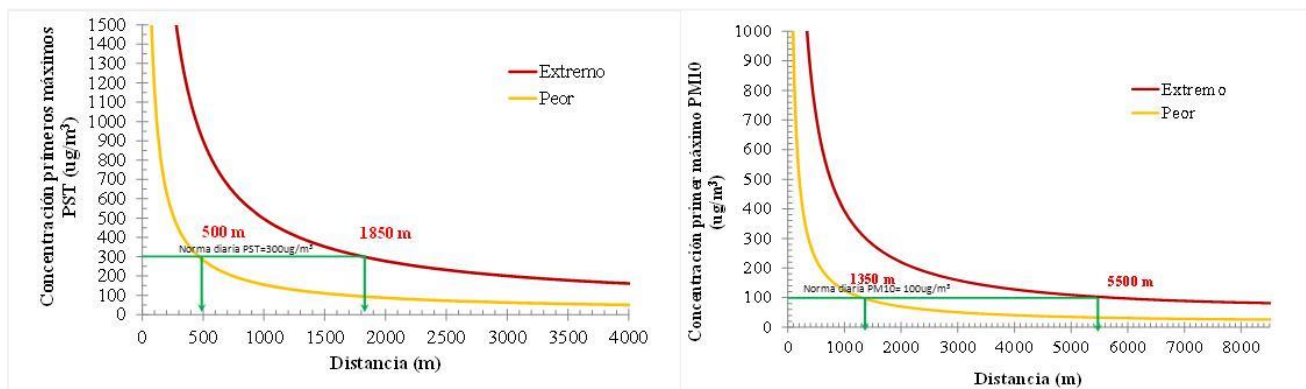


Ilustración 39 Distancia que delimita el área de influencia con escenarios Peor y Extremo. Derecha: Distancia que delimita área de influencia para concentraciones de primeros máximos de PST en Casanare. Izquierda: Distancia que delimita área de influencia para concentraciones primeros máximos de PM10 en Casanare. Fuente Autora

16 Conclusiones

En el presente estudio fue posible desarrollar y proponer un método para determinar el área de influencia en vías no pavimentadas. Para lo cual se identificó una función que representa el comportamiento de las concentraciones en la distancia en dirección perpendicular a la vía. A partir de dicha ecuación es posible identificar la distancia que delimita el área de influencia y por ende el ancho de la misma.

Se encontró que independientemente de la meteorología utilizada, la concentración a nivel superficie de TSP y PM10 exhibe un comportamiento tipo campana gaussiana que decrece exponencialmente con la distancia a la vía. Los resultados permitieron determinar los perfiles de concentración para la vía estudiada, los cuales fueron ajustados estadísticamente a una curva de función Beta. También se encontró que cuando esta concentración es dividida por la emisión promedio, todos los perfiles de concentración obtenidos convergen a una sola curva.

Para llegar a la obtención de tal función se estimaron factores de emisión en la vía utilizando el método propuesto por la EPA para vías industriales no pavimentadas. A partir de estos se estimaron las emisiones horarias en la vía durante los días de la campaña de medición (13 a 23 de Abril). El valor de la emisión promedio fue de $1.73 \text{ mg/s} \cdot \text{m}^2$ para PST y $0.51 \text{ mg/s} \cdot \text{m}^2$ para PM10.

A partir de los factores de emisión calculados fue posible observar que la categoría con el mayor factor de emisión corresponde a la categoría vehículos de carga de tres ejes, esto debido a que el factor de emisión depende directamente del peso del vehículo.

Por otro lado el mayor número de vehículos registrados durante la campaña de medición se dio para las categorías motos (1262 unidades), camionetas (1171 unidades) y vehículos de carga de tres ejes (1522 unidades). Sin embargo, aun cuando el porcentaje de motos y camionetas en la vía es de los más altos en comparación a las demás categorías, sus factores de emisión son casi 10 veces menores a los factores de emisión estimados para los vehículos de carga pesada, lo que repercute en que la emisión presentada en la vía sea resultado principalmente del paso de vehículos de carga de tres ejes.

Una vez calculada la emisión se procesó la información geográfica y meteorológica. A partir la cual se ejecutó el modelo AERMOD para 12 meteorologías de diferentes áreas y se extrajeron las concentraciones de primeros máximos diarios y promedios anuales para 131 receptores sensibles ubicados perpendicularmente a la vía.

Dicha información fue introducida en el software EasyFit, mediante el cual, luego de evaluar diferentes funciones, se llegó a la conclusión que con un 95% de confianza la función que mejor representaba el perfil de concentraciones era la función Beta. Al comparar los parámetros que definen la función Beta contra la velocidad promedio anual de cada una de las estaciones tenidas en cuenta, se encontró que no había ninguna correlación entre estas, sino que por el contrario, las

variables α_1 y α_2 se mantenían constantes, definiendo de esta manera una única función Beta para cada contaminante evaluado.

Acto seguido se verificó tal función contra valores experimentales de la zona evaluada (Departamento de Casanare), pero también contra valores experimentales de una vía localizada en el Departamento de Meta con condiciones similares a las de la zona de estudio. Los errores encontrados para la zona de estudio fueron superiores al 30%, razón por lo cual se realizó la corrección de la función a partir de una variable que se denominó factor de dispersión.

Finalmente se propuso una función para calcular el perfil de concentraciones, la cual depende de la emisión de la vía, la función Beta y el factor de dispersión.

Con base en lo anterior se desarrolló el método para la determinación de área de influencia por medio de dos pasos: método screening y método refinado. El primero de ellos, método screening, parte de la ecuación desarrollada, en donde el área de influencia corresponderá a la franja paralela a la vía cuyo ancho se determina como aquel dentro del cual la concentración promedio anual supera la norma de calidad de aire. Se sugiere que este sea utilizado como una primera aproximación en la determinación del área de influencia, o en un caso extremo cuando no se cuenta con información anual que permita tener resultados confiables por medio del modelo AERMOD. El método refinado se propone sea el segundo paso en la determinación del área de influencia, en donde se utilice un modelo de dispersión.

Al momento de aplicar la función será necesario tener presente que su incertidumbre será de 21% y 9% al momento de estimar el área de influencia a partir de concentraciones de PST y PM10 respectivamente, incertidumbre que fue estimada a partir de la propagación de incertidumbres de las variables involucradas en la función propuesta.

Por último, se realizó la aplicación del método screening bajo dos escenarios denominados peor escenario y escenario extremo. En el peor escenario se calculó la emisión a partir del mayor flujo vehicular que pudiese soportar la vía (189 vehículos por hora) y para el escenario extremo se utilizó el promedio de aforos vehiculares de algunas vías en ciudades de Estados Unidos de alto tránsito vehicular (390 vehículos por hora). A partir del uso de la función propuesta se estimaron las distancias que delimitan el área de influencia encontrando que bajo un escenario extremo de uso de las vías, estas distancias se incrementarían hasta 9.2 km. La mayor área de influencia estimada fue de correspondiente a un periodo anual para concentraciones de PM10.

Ahora bien, el método propuesto cuenta con diferentes limitaciones ya que fue determinado a partir de una única zona geográfica, razón por la cual aplicará únicamente a zonas con relieve plano con uso y tipo de suelo similar al de la zona de estudio, que no cuenten con una única velocidad del viento predominante y que sean zonas con velocidades de viento superiores a 1m/s; sin embargo resultará ser una buena herramienta al momento de necesitar estimar áreas de influencia ambiental de forma sencilla como una primera aproximación o en zonas donde realmente no se cuente con información para realizar un modelación.

17 Recomendaciones

En primer lugar, en cuanto a los monitores, se recomienda que al momento de realizar campañas de medición estas tengan una mayor duración o se realicen varias en diferentes épocas del año a fin de estimar emisiones que sean más representativas de lo que sucede en un año. De igual forma, es recomendable que se cuenten con mayores puntos de medición alrededor de la vía. De ser posible que existiera la financiación para realizar mediciones en campo de tipo permanente.

Por otro lado es importante tener en cuenta que el método aquí propuesto está enfocado a la estimación del área de influencia para peores escenarios, en donde su utilidad radica en obtener aproximaciones de lo que sería el área de influencia máxima que genera una actividad en la vía. Es por esta razón que se recomienda posterior al uso del método screening un método refinado, como lo es la modelación de contaminantes utilizando un modelo de dispersión.

18 Trabajo futuro

Si bien en el presente trabajo no fue posible realizar el cálculo del valor de incertidumbre para la función propuesta debido a que no se contaba con la información suficiente, se propone como trabajo futuro la aplicación del método propuesto bajo diferentes escenarios áreas geográficas (teniendo en cuenta las limitaciones ya mencionadas) y su comparación con valores observados a fin de calcular el valor de incertidumbre de la función. De igual forma, dicho análisis permitirá identificar otras variables no evaluadas en el presente estudio a fin de involucrarlas en la función y hacerla más detallada y precisa, aun cuando se trate de evaluar peores escenarios.

Buscando contar con un método alternativo de confirmar los resultados obtenidos, el Centro de investigación en mecatrónica automotriz CIMA ha venido realizando simulaciones de dispersión de material particulado usando paquetes computacionales de mecánica de fluidos (CFD –*computational fluid dynamics*), los resultados han sido similares. Aunque esta alternativa aun no es reconocida por las autoridades ambientales para realizar estudios de impacto ambiental con carácter regulatorio, es una alternativa reconocida por la comunidad científica para el estudio del movimiento de los fluidos. Sería muy útil confirmar los resultados obtenidos en este estudio a partir de los resultados arrojados por esta herramienta.

19 Bibliografía

- Alcaldía de Yopal. (Mayo de 2007). Agenda Ambiental. Municipio de Yopal, Casanare, Colombia.
- Alcaldía de Yopal. (2013). Plan de ordenamiento territorial POT Yopal. *Tomo I. Análisis Territorial*. Yopal, Colombia.
- ANLA. (20 de Diciembre de 2012). Definición e identificación del área de influencia. Bogotá, Colombia.
- Barrett, S. R., & Britter, R. E. (11 de Marzo de 2009). Algorithms and analytical solutions for rapidly approximating long-term. Cambridge, UK.
- Cabreara, F., & Grutter, M. (Marzo de 2008). Evaluación de un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos con la técnica espectroscópica DOAS Pasiva. Ciudad de México, México.
- Chakrabarti, T., & Devotta, S. (Noviembre de 2010). Air Quality Assessment, Emissions Inventory and Source Apportionment Studies: Mumbai. Mumbai, India.
- Cheng, Z., & Jiang, J. (2013). Characteristics and health impacts of particulate matter pollution in China (2001–2011). Beijing, China.
- EPA. (Septiembre de 2004). AERMOD: Description of model formulation. (E. p. agency, Ed.) Estados Unidos.
- Fonseca, Y., Turtos, L., & Pire, S. (2010). Guía para la modelación de la dispersión regional de contaminantes gaseosos y de . Cuba.
- Gillies, J., Etyemezian, V., & Kuhns, H. (26 de Mayo de 2004). Effect of vehicle characteristics on unpaved road dust emissions. Estados Unidos.
- Grahame, T. J., & Schlesinger, R. B. (2010). Cardiovascular health and particulate vehicular emissions: a critical evaluation of the evidence. Nueva York, Estados Unidos.
- Hernández, J. L. (s.f.). *Distribución de probabilidad de variables aleatorias discretas*. Recuperado el 02 de 03 de 2014, de Instituto Tecnológico de Apizaco:
<http://www.itapizaco.edu.mx/~joseluis/apuntes/estadistica/distribuciones%20discretas.pdf>
- Huertas C, J., Camacho, D., & Huertas B, M. (2011). Standardized emissions inventory methodology for open-pit mining areas. Toluca, México.

- Huertas C, J., Huertas B, M., & Betancur, L. (4 de Diciembre de 2013). Informe de avance soporte técnico de la metodología para definir el área de influencia por el uso de vías sin pavimentar por empresas del sector hidrocarburos. Toluca, México.
- Huertas C, J., Huertas B, M., & Solis, D. (9 de Marzo de 2012). Characterization of airborne particles in an open pit mining region. Toluca, Estado de México, México.
- Huertas C, J., Huertas B, M., Izquierdo, S., & González, E. D. (2011). Air quality impact assessment of multiple open pit coal mines in northern Colombia. Toluca, México.
- Kenty, K., Poor, N., Kronmiller, K., McClenny, W., King, C., Atkenson, T., & Campbell, S. (14 de Junio de 2006). Application of CALINE4 to roadside NO/NO₂ transformations. Florida, Estados Unidos.
- Levitin, J., Harkonen, J., & Nikmo, J. (5 de Marzo de 2004). Evaluation of the CALINE4 and CARFMI models against measurements near a major road. Helsinki, Finlandia.
- MADS; ITESM. (2008). *Guía de modelación de la calidad de aire*. Toluca.
- Marrero, M., & Kowalski, A. (Mayo de 2011). Parámetros de rugosidad representativos de terrenos naturales. España.
- Mikkelsen, T., Troen, I., & Larsen, S. (1982). On the finite line source problem in diffusion theory. 16.
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (05 de Junio de 2008). Resolución número 909. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de ambiente y Desarrollo Sostenible. (2009). Términos de referencia sector infraestructura. Estudio de impacto ambiental. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (24 de Marzo de 2010). Resolución 610. Bogotá, Colombia.
- Novi, C. (2013). The indirect effect of fine particulate matter on health through individuals'. Venecia, Italia.
- Núñez, S., & Rodriguez, B. (2002). Altura de la capa de mezcla: Caracterización experimental y aplicación de un modelo meteorológico para el estudio de su evolución diurna. Madrid, España.
- Rojas, N., Belalcázar, L. C., & Beltrán, D. (2012). Emisiones de material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) por resuspensión de polvo y abrasión en Bogotá. Bogotá, Colombia.
- S.M.S, N., & Khare, M. (22 de Enero de 2002). Line source emission modelling. New Delhi, India.

- Sahdolina, A., Sotudeh-Gharebagha, R., & Zhub, Y. (2 de Agosto de 2006). Modeling of dispersion near roadways based on the vehicle induced turbulence concept. Tehran, Irán.
- Secretaría Distrital de Ambiente. (Diciembre de 2010). Plan decenal de descontaminación del aire para Bogotá. Bogotá, Colombia.
- TEEIC. (2014). *Tribal Energy and Environmental Information Clearinghouse*. Recuperado el 04 de Agosto de 2014, de Area of influence:
<http://teeic.indianaffairs.gov/am/assess/identify/area/index.htm>
- Thé, J., Thé, C., & Johnson, M. (2009). Aermot view: Interface for the U.S. EPA ISC and AERMOD models; User's guide. Waterloo, Ontario, Canada.
- UNAD. (2013). *Universidad Nacional Abierta y a Distancia*. Recuperado el 28 de Julio de 2014, de Contaminantes primarios y secundarios:
http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358007/Contenido_en_linea_Caraterizacion/leccin_5_contaminantes_primarios_y_secundarios_criterio_y_no_criterio.html
- Uribe, L., & Suárez, N. (2009). Evaluación de la calidad del aire del valle de Sogamoso, respecto a material particulado menor a 10 micras (MP10), aplicando el modelo de dispersión AERMOD como herramienta de planificación. Bogotá, Colombia.
- US EPA. (1982). Method 103- Beryllium Screening Method. Estados Unidos.
- US EPA. (Octubre de 1992). Screening Procedures for Estimating the Air quality Impact of Stationary Sources, Revised. Estados Unidos.
- US EPA. (27 de Abril de 1998). Determination of Particulate Matter- Screening procedure. Estados Unidos.
- US EPA. (17 de Marzo de 1999). Screening Method for Methylene Diphenyl Diisocyanate (MDI). Estados Unidos.
- US EPA. (Septiembre de 2004). AERMOD: Description of model formulation. (E. p. agency, Ed.) Estados Unidos.
- US EPA. (Abril de 2004). Understanding the USEPA's AERMOD Modelling System. Estados Unidos.
- US EPA. (2004). User's guide for the Aermot Meteorological preprocessor (AERMET). Estados Unidos.
- US EPA. (9 de Noviembre de 2005). Revision to the guideline on air quality models: adoption of a preferred general purpose (flat and complex terrain) Dispersion model and other revisions: Final rule. Estados Unidos.

- US EPA. (2006). *Revision of emission factors for AP-42*. Recuperado el 30 de Abril de 2014, de Chapter 13: Miscellaneous source. Section 13.2.2: Unpaved Roads (Fugitive Dust Sources): <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/index.html>
- US EPA. (2014). *Emissions factors & AP 42, Compilation of air pollutant emission factors*. Obtenido de <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>
- US EPA. (2014). *Support center for regulatory atmospheric modeling*. Obtenido de Preferred/Recommended models: http://www.epa.gov/ttn/scram/dispersion_prefrec.htm#rec
- US EPA. (2014). *Support center for Regulatory Atmospheric Modeling*. Obtenido de Screening models: http://www.epa.gov/scram001/dispersion_screening.htm
- Velasquez, N., & Huertas, D. (15 de Diciembre de 2011). Evaluación técnico ambiental del plan de manejo ambiental para la fase de construcción del proyecto construcción de la calzada sur de la avenida San José, desde avenida Boyacá hasta avenida Cota. Bogotá, Colombia.
- Venkatram, A., Fitz, D., Bumiller, K., Du, S., & Boeck, M. (8 de Septiembre de 1998). Using a dispersion model to estimate emission rates of particulate matter from paved roads. California, Estados Unidos.
- Venkatram, A., Isakov, V., Yuan, J., & Pankratz, D. (Mayo de 2004). Modeling dispersion at distances of meters from urban sources. California, Estados Unidos.
- Venkatram, A., Isakov, V., Thomac, E., & Baldauf, R. (2007). Analysis of air quality data near roadways using a dispersion model.
- Venkatram, A., Snyder, M., & Isakov, V. (2013). Modeling the impact of roadway emissions in light wind stable and transition conditions. Estados Unidos.
- Venkatram, A., Snyder, M., Isakov, V., & Kimbrough, S. (30 de Julio de 2013). Impact of wind direction on near-road pollutant concentrations. California, Estados Unidos.
- Venkatrama, A., & Horstb, T. (14 de Diciembre de 2005). Approximating dispersion from a finite line source. California, Estados Unidos.
- Yura, E., Kear, T., & Niemieier, D. (19 de Julio de 2007). Using CALINE dispersion to assess vehicular PM2.5 emissions. California, Estados Unidos.

Anexo 1. Antecedentes del proyecto

(En medio magnético)

Anexo 1. Antecedentes del proyecto

Antecedentes en cuanto al análisis de la información meteorológica de la zona para el área de estudio: Campaña 13 a 23 de abril de 2014

Durante la campaña de medición realizada del 13 al 23 de abril de 2013 para el municipio de Casanare se incluyeron estaciones meteorológicas en los puntos 2 y 3 como se presenta a continuación en la tabla 1.

Tabla 40 Ubicación estaciones meteorológicas

# Estación	Estación 2	Estación 3
Ubicación (UTM)	X=171,12 km Y=558,50 km	X=171,11 km Y=558,55 km
Ubicación (a partir del borde de la vía)	5 m Vientos abajo	60 m Vientos abajo

Fuente (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

Para la campaña meteorológica fueron utilizadas estaciones Vantage Pro2 Plus (Ver Ilustraciones 1 y 2). Los parámetros registrados durante el muestreo fueron velocidad y dirección del viento, temperatura y radiación solar.



Ilustración 40. Estaciones meteorológicas utilizadas durante la campaña (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)



Ilustración 41. Componentes de estación Vantage Pro2 Plus utilizada durante la campaña
(Davis International Perú S.A., 2010)

A partir del procesamiento de la información registrada por las estaciones y de realizar el respectivo análisis se encontró que:

- La dirección de viento predominante viene del occidente. Los vientos de mayor frecuencia se encuentran entre 0,5 y 2,1 m/s (Ver ilustración 3).

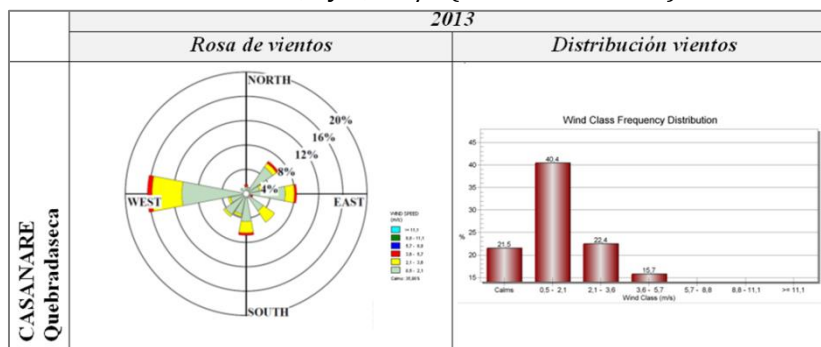


Ilustración 42 Rosa de vientos para el periodo de Campaña Casanare
(Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

- La radiación solar toma valores máximos entre las 12 y 14 horas (Ver ilustración 4).

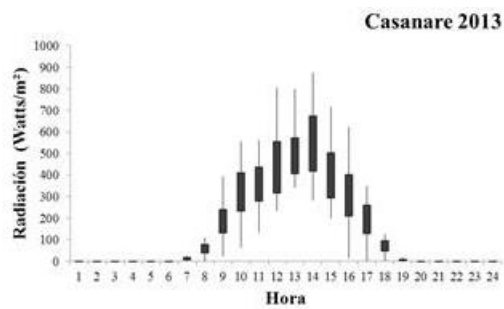


Ilustración 43 Comportamiento promedio horario radiación solar en el periodo de campaña (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

- El promedio horario de las temperaturas reportadas por las estaciones meteorológicas indica temperaturas horarias relativamente constantes, cercanas a los 25 °C y no mayores a los 40°C.

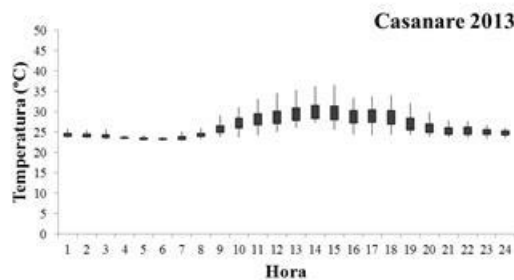


Ilustración 44 Promedio horario de temperaturas reportadas por las estaciones en el departamento de Casanare (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

Antecedentes en la modelación utilizando el software AERMOD

Para conocer los niveles de concentración de PST y PM10 en el tramo vial ubicado en el municipio de Quebrada Seca, Departamento del Casanare se utilizó el modelo de dispersión del aire AERMOD- Lakes Environmental Software utilizando como información geográfica las coordenadas UTM para cada uno de los segmentos de vía que conformaban el tramo vial y la información proporcionada por AERMAP. Se asumió como valor de emisión constante 0,00001954 g/s m².

El tramo vial fue dividido en 21 segmentos e introducido en AERMOD como un área poligonal (Ver ilustración 6) razón por la cual la emisión es expresada en unidades de g/sm². Las coordenadas de cada uno de los segmentos generados son presentadas a continuación en la Tabla 2.

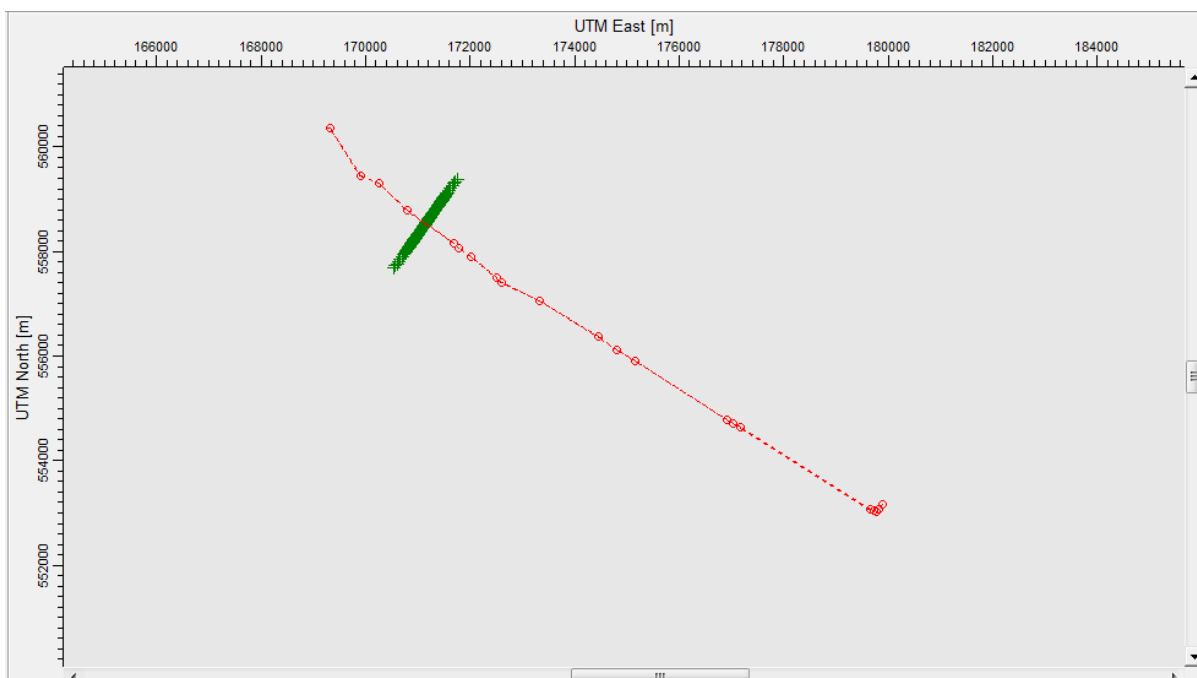


Ilustración 45 División de la vía por segmentos. Líneas rojas: Segmentos de vía. Punto verdes: Receptores sensibles

Fuente Autora

Tabla 41 Coordenadas UTM para cada uno de los segmentos que componen el tramo vial

Segmento	X1 (km)	X2 (km)	X3 (km)	X4 (km)
1	179.89	179.83	179.83	179.88
2	179.83	179.77	179.76	179.83
3	179.77	179.72	179.72	179.76
4	179.72	179.66	179.66	179.72
5	179.66	177.18	177.18	179.66
6	177.18	177.03	177.03	177.18
7	177.03	176.93	176.92	177.03
8	176.93	175.16	175.16	176.92
9	175.16	174.81	174.80	175.16
10	174.81	174.46	174.45	174.80
11	174.46	173.33	173.33	174.45
12	173.33	172.59	172.59	173.33
13	172.59	172.50	172.50	172.59
14	172.50	172.02	172.02	172.50
15	172.02	171.78	171.78	172.02
16	171.78	171.69	171.68	171.78
17	171.69	170.81	170.80	171.68
18	170.81	170.25	170.25	170.80

Segmento	X1 (km)	X2 (km)	X3 (km)	X4 (km)
19	170.25	169.90	169.89	170.25
20	169.90	169.32	169.32	169.89
21	169.32	169.27	169.26	169.32

Fuente Autora

Luego de realizadas las simulaciones, el procesador gráfico de AERMOD permite visualizar la dispersión de los niveles de concentración de PST, como lo presentan las Ilustraciones 7 y 8 y el perfil de concentración en el periodo con base en los resultados obtenidos para cada uno de los receptores sensibles. La Ilustración 9 presenta el perfil del promedio aritmético de concentraciones de PST hasta una distancia de 40 m desde el centro de la vía.

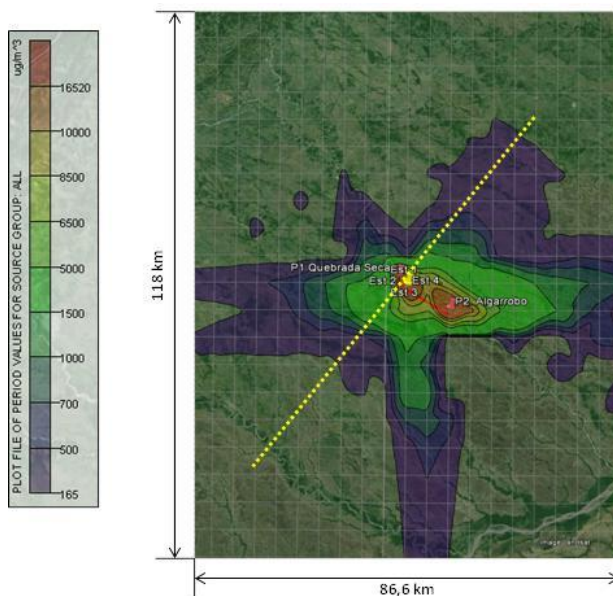


Ilustración 46. Resultados simulación AERMOD, emisión constante, Quebrada Seca- Casanare (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

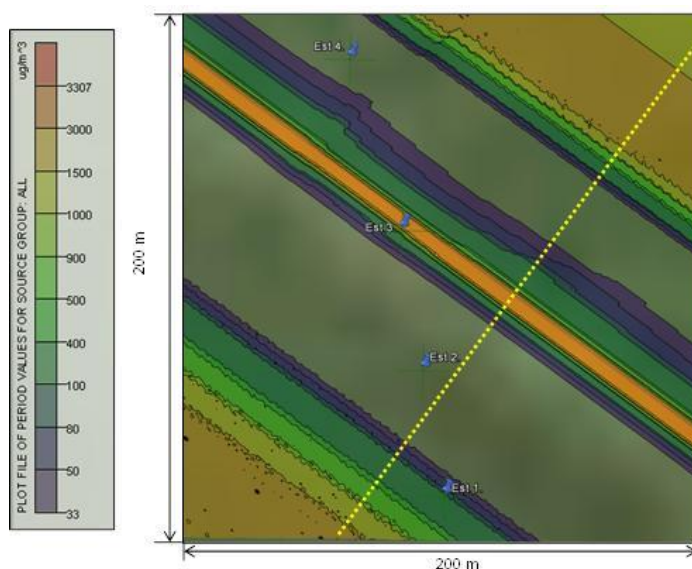


Ilustración 47. Resultados AERMOD View, Quebrada Seca- Casanare
(Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

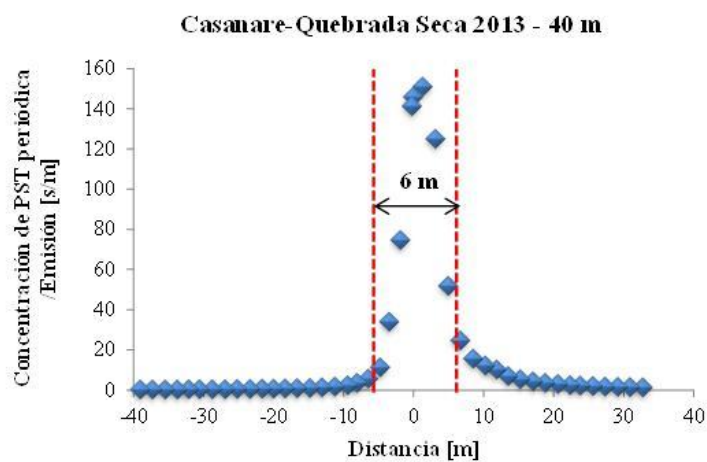


Ilustración 48. Perfil de concentración de PST en el periodo- promedio aritmético, emisión constante, Quebrada Seca- Casanare
(Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

La Ilustración 10 presenta los perfiles de concentración de PST de los primeros máximos en el periodo cada 24 horas a 600 m del centro de la vía. Los perfiles son comparados con la norma diaria de calidad de aire establecida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en la Resolución 610 de 2010.

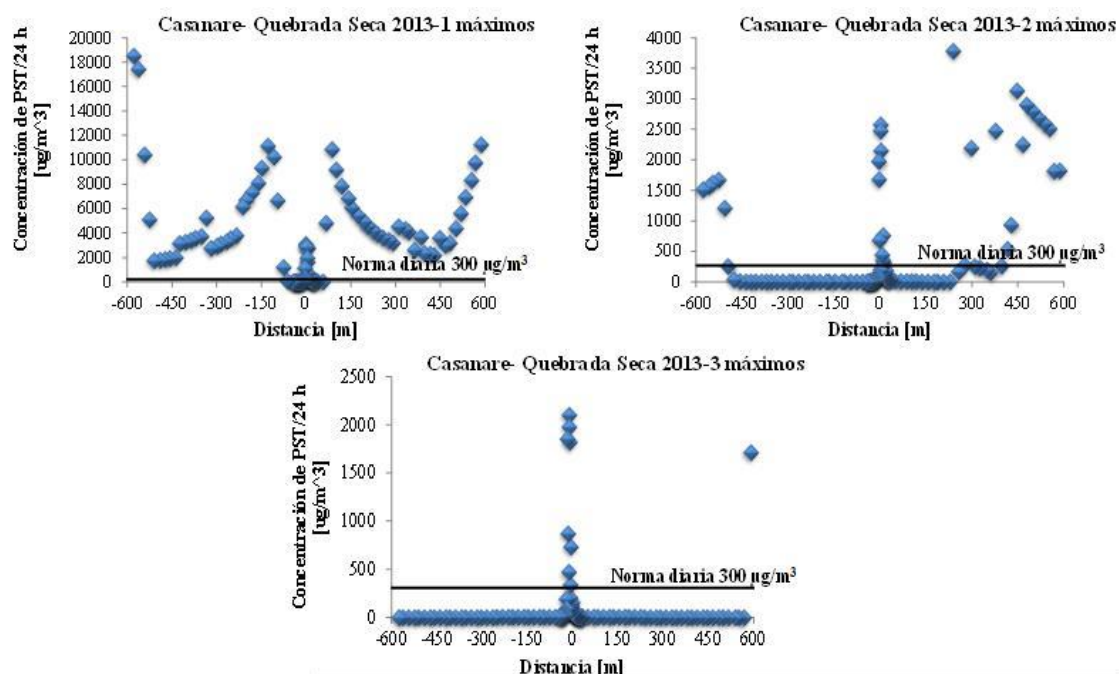


Ilustración 49. Perfiles de concentración de PST de los máximos en el periodo cada 24 hr a 600 m, Quebrada Seca- Casanare (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

Las anteriores ilustraciones llevaron a deducir que el comportamiento de las concentraciones sí sigue la forma de una campana gaussiana, sin embargo en algunos casos las concentraciones más cercanas a la vía no parecen seguir ningún orden.

Ahora bien, como se ha mencionado anteriormente las meteorologías obtenidas para los tramos viales no fueron consideradas como representativas del año, así que se propuso el uso de meteorologías del departamento del Cesar que tienen características geográficas similares (terreno plano, región tropical semidesértica) y fueron rastreadas por periodos de 1 año en diferentes ubicaciones.

De esta forma una vez procesada la información se ejecutó el modelo AERMOD nuevamente. Los resultados obtenidos en la simulación fueron normalizados y ajustados a diferentes distribuciones de donde se concluyó que una función Gamma sería la que mejor se ajuste a los resultados entregados por AERMOD. Este ajuste se obtiene como aquella que minimiza el error entre el valor dado y un valor ajustado. Los resultados obtenidos se presentan a continuación. Las ilustraciones 11 y 12 representan el procedimiento realizado.

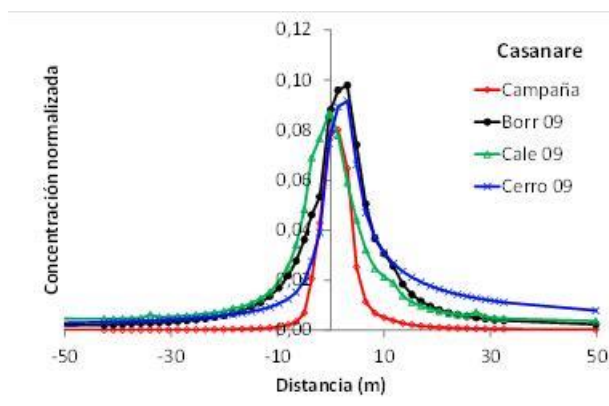


Ilustración 50 Perfiles de concentración normalizados, diferentes meteorologías de Cesar, Quebrada Seca- Casanare
Fuente (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

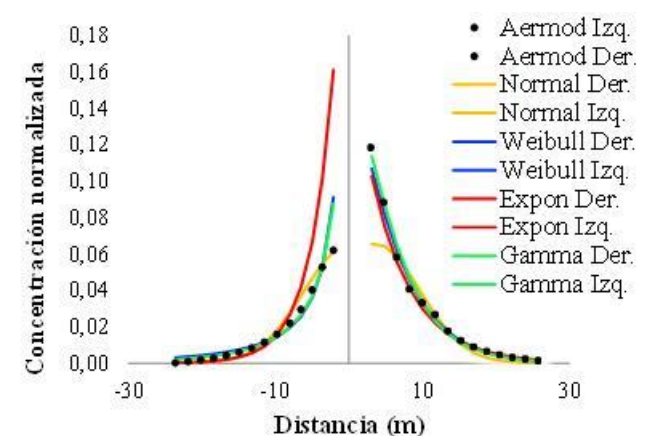


Ilustración 51 Curvas normalizadas y ajustadas a diferentes distribuciones, Quebrada Seca- Casanare
Fuente (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

Con base en los resultados entregados por AERMOD se llegó a la conclusión que el perfil de concentración anual con meteorologías de regiones semidesérticas tropicales y emisión constante usualmente exhiben una forma de campana, estas concentraciones se ajustan a distribuciones exponenciales (Normal, Exponencial, simple, Gamma y Weibull).

Previamente a esto se había evaluado el comportamiento de las concentraciones experimentales buscando conocer si había alguna función que las representara, de modo que con la ayuda de Excel se analizaron diferentes funciones y se llegó a la conclusión que la función que mejor se ajustaba a los datos experimentales coincidía con la función Gamma, como se presenta en la ilustración 13.

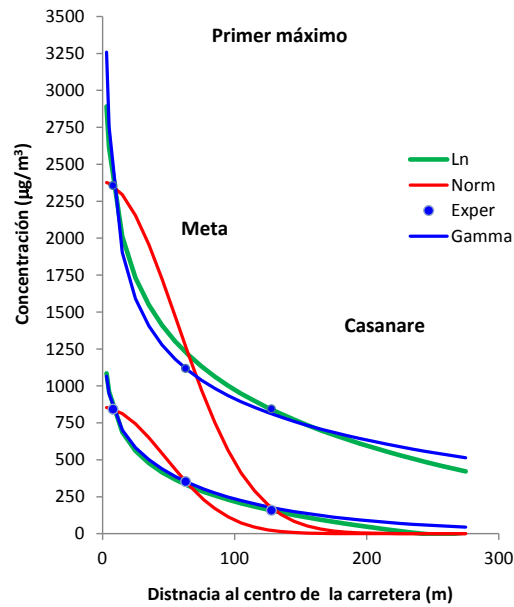


Ilustración 52 Análisis de datos experimentales por medio de diferentes funciones
Fuente (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

Realizado dicho análisis se propuso Gamma como base para representar el perfil de concentraciones utilizando las ecuaciones 1 y 2.

$$Cd = Fd * E \text{ Gamma}(\alpha, \beta) \rightarrow \text{Comparar contra norma diaria} \quad \text{Ec. 1}$$

$$Ca = Fa * E \text{ Gamma}(\alpha, \beta) \rightarrow \text{Comparar contra norma anual} \quad \text{Ec. 2}$$

En donde Ca y Cd son concentraciones anuales y diarias respectivamente, Fa y Fd una variable denominada factor de dispersión, y Gamma la función propuesta.

Sin embargo no se contaba con parámetros establecidos que definieran la función gamma, ni se había evaluado la correlación entre tales parámetros y la velocidad perpendicular del viento. Por lo cual, a partir de esta información nace el proyecto desarrollado, en primer lugar buscando corroborar y confirmar que la función Gamma propuesta mediante el procedimiento desarrollado si fuese representativa del perfil de concentraciones perpendicular a la vía y por otro lado verificar que sí hubiese correlación entre la función que se propusiera y la velocidad del viento. Por esto se agregaron más meteorologías en el presente estudio.

Anexo 2. Información valores calculados de emisión para PM10 y PST

(En medio magnético)

Anexo 2. Información valores calculados de emisión para PM10 y PST

El presente anexo presenta los valores horarios estimados para emisiones de PST y PM10 a partir de la información entregada luego de realizada la campaña en el tramo vial del corregimiento de Quebrada Seca, departamento de Casanare (Ver tablas 3 a 13).

A partir de las emisiones estimadas para cada hora se calcularon los valores promedio para todos los días de campaña obteniendo los resultados presentados en la Tabla 1.

Tabla 42 Emisiones promedio de PST y PM10 en la vía

Tamaño	Emisión (g/s m ²)
PST	1,73E-03
PM10	5.06E-04

Fuente autora

Adicionalmente es presentado en este anexo los valores estimados para factores de emisión de cada categoría, junto con los aforos realizados del 13 a 23 de abril de 2013, tal información es presentada en las tablas 14 y 15 para PM10 y PST respectivamente.

Las convenciones utilizadas en las tablas 14 y 15 por categoría son presentadas a continuación en la Tabla 2.

Tabla 43 Distribución de categorías por colores

Categoría	Color correspondiente
Motos	
Autos	
Camionetas	
Camperos	
Buses	
Tanqueros	
Vehículos de carga 2 ejes	
Vehículos de carga 3 ejes	
Volquetas	

Fuente autora

Tabla 44 Emisiones hora a hora PST y PM10-
Primer día de campaña (13 de Abril)

FECHA	HORA	Emission (gPST/m ² *s)	Emission (gPM10/m ² *s)
13/04/2013	1	0.0000	0.0000
13/04/2013	2	0.0000	0.0000
13/04/2013	3	0.0011	0.0003
13/04/2013	4	0.0019	0.0005
13/04/2013	5	0.0054	0.0016
13/04/2013	6	0.0050	0.0015
13/04/2013	7	0.0034	0.0010
13/04/2013	8	0.0020	0.0006
13/04/2013	9	0.0021	0.0006
13/04/2013	10	0.0029	0.0009
13/04/2013	11	0.0040	0.0012
13/04/2013	12	0.0045	0.0013
13/04/2013	13	0.0024	0.0007
13/04/2013	14	0.0019	0.0006
13/04/2013	15	0.0035	0.0010
13/04/2013	16	0.0028	0.0008
13/04/2013	17	0.0030	0.0009
13/04/2013	18	0.0026	0.0008
13/04/2013	19	0.0021	0.0006
13/04/2013	20	0.0008	0.0002
13/04/2013	21	0.0008	0.0002
13/04/2013	22	0.0009	0.0003
13/04/2013	23	0.0006	0.0002
13/04/2013	24	0.0000	0.0000

Fuente autora

Tabla 45 Emisiones hora a hora PST y PM10-
Segundo día de campaña (13 de Abril)

FECHA	HORA	Emission (gPST/m ² *s)	Emission (gPM10/m ² *s)
14/04/2013	1	0.0002	0.0000
14/04/2013	2	0.0003	0.0001
14/04/2013	3	0.0005	0.0001
14/04/2013	4	0.0010	0.0003
14/04/2013	5	0.0045	0.0013
14/04/2013	6	0.0036	0.0010
14/04/2013	7	0.0029	0.0009
14/04/2013	8	0.0019	0.0006
14/04/2013	9	0.0032	0.0009
14/04/2013	10	0.0053	0.0015
14/04/2013	11	0.0022	0.0006
14/04/2013	12	0.0028	0.0008
14/04/2013	13	0.0028	0.0008
14/04/2013	14	0.0022	0.0006
14/04/2013	15	0.0034	0.0010
14/04/2013	16	0.0026	0.0007
14/04/2013	17	0.0031	0.0009
14/04/2013	18	0.0028	0.0008
14/04/2013	19	0.0021	0.0006
14/04/2013	20	0.0012	0.0003
14/04/2013	21	0.0006	0.0002
14/04/2013	22	0.0001	0.0000
14/04/2013	23	0.0000	0.0000
14/04/2013	24	0.0000	0.0000

Fuente autora

Tabla 46 Emisiones hora a hora PST y PM10-
Tercer día de campaña (13 de Abril)

FECHA	HORA	Emission (gPST/m ² *s)	Emission (gPM10/m ² *s)
15/04/2013	1	0.0000	0.0000
15/04/2013	2	0.0000	0.0000
15/04/2013	3	0.0003	0.0001
15/04/2013	4	0.0007	0.0002
15/04/2013	5	0.0023	0.0007
15/04/2013	6	0.0037	0.0011
15/04/2013	7	0.0039	0.0011
15/04/2013	8	0.0027	0.0008
15/04/2013	9	0.0021	0.0006
15/04/2013	10	0.0012	0.0004
15/04/2013	11	0.0028	0.0008
15/04/2013	12	0.0035	0.0010
15/04/2013	13	0.0031	0.0009
15/04/2013	14	0.0035	0.0010
15/04/2013	15	0.0019	0.0005
15/04/2013	16	0.0029	0.0008
15/04/2013	17	0.0029	0.0009
15/04/2013	18	0.0028	0.0008
15/04/2013	19	0.0018	0.0005
15/04/2013	20	0.0010	0.0003
15/04/2013	21	0.0011	0.0003
15/04/2013	22	0.0008	0.0002
15/04/2013	23	0.0001	0.0000
15/04/2013	24	0.0000	0.0000

Fuente autora

Tabla 47 Emisiones hora a hora PST y PM10-
PrimCuartoer día de campaña (13 de Abril)

FECHA	HORA	Emission (gPST/m2*s)	Emission (gPM10/m2*s)
16/04/2013	1	0.0002	0.0000
16/04/2013	2	0.0001	0.0000
16/04/2013	3	0.0008	0.0002
16/04/2013	4	0.0014	0.0004
16/04/2013	5	0.0057	0.0017
16/04/2013	6	0.0039	0.0011
16/04/2013	7	0.0028	0.0008
16/04/2013	8	0.0022	0.0007
16/04/2013	9	0.0017	0.0005
16/04/2013	10	0.0044	0.0013
16/04/2013	11	0.0039	0.0011
16/04/2013	12	0.0019	0.0006
16/04/2013	13	0.0025	0.0007
16/04/2013	14	0.0024	0.0007
16/04/2013	15	0.0030	0.0009
16/04/2013	16	0.0029	0.0008
16/04/2013	17	0.0033	0.0010
16/04/2013	18	0.0024	0.0007
16/04/2013	19	0.0015	0.0004
16/04/2013	20	0.0011	0.0003
16/04/2013	21	0.0001	0.0000
16/04/2013	22	0.0000	0.0000
16/04/2013	23	0.0000	0.0000
16/04/2013	24	0.0000	0.0000

Fuente autora

Tabla 48 Emisiones hora a hora PST y PM10-
Quinto día de campaña (13 de Abril)

FECHA	HORA	Emission (gPST/m2*s)	Emission (gPM10/m2*s)
17/04/2013	1	0.0000	0.0000
17/04/2013	2	0.0000	0.0000
17/04/2013	3	0.0005	0.0001
17/04/2013	4	0.0018	0.0005
17/04/2013	5	0.0049	0.0014
17/04/2013	6	0.0043	0.0013
17/04/2013	7	0.0027	0.0008
17/04/2013	8	0.0018	0.0005
17/04/2013	9	0.0026	0.0008
17/04/2013	10	0.0031	0.0009
17/04/2013	11	0.0036	0.0011
17/04/2013	12	0.0050	0.0015
17/04/2013	13	0.0050	0.0015
17/04/2013	14	0.0026	0.0008
17/04/2013	15	0.0039	0.0011
17/04/2013	16	0.0031	0.0009
17/04/2013	17	0.0030	0.0009
17/04/2013	18	0.0000	0.0000
17/04/2013	19	0.0000	0.0000
17/04/2013	20	0.0000	0.0000
17/04/2013	21	0.0000	0.0000
17/04/2013	22	0.0000	0.0000
17/04/2013	23	0.0000	0.0000
17/04/2013	24	0.0001	0.0000

Fuente autora

Tabla 49 Emisiones hora a hora PST y PM10-
Sexto día de campaña (13 de Abril)

FECHA	HORA	Emission (gPST/m2*s)	Emission (gPM10/m2*s)
18/04/2013	1	0.0000	0.0000
18/04/2013	2	0.0000	0.0000
18/04/2013	3	0.0000	0.0000
18/04/2013	4	0.0000	0.0000
18/04/2013	5	0.0000	0.0000
18/04/2013	6	0.0000	0.0000
18/04/2013	7	0.0000	0.0000
18/04/2013	8	0.0000	0.0000
18/04/2013	9	0.0000	0.0000
18/04/2013	10	0.0000	0.0000
18/04/2013	11	0.0000	0.0000
18/04/2013	12	0.0000	0.0000
18/04/2013	13	0.0000	0.0000
18/04/2013	14	0.0000	0.0000
18/04/2013	15	0.0000	0.0000
18/04/2013	16	0.0000	0.0000
18/04/2013	17	0.0000	0.0000
18/04/2013	18	0.0024	0.0007
18/04/2013	19	0.0015	0.0004
18/04/2013	20	0.0017	0.0005
18/04/2013	21	0.0013	0.0004
18/04/2013	22	0.0008	0.0002
18/04/2013	23	0.0003	0.0001
18/04/2013	24	0.0000	0.0000

Fuente autora

Tabla 50 Emisiones hora a hora PST y PM10-
Séptimo día de campaña (13 de Abril)

FECHA	HORA	Emission (gPST/m2*s)	Emission (gPM10/m2*s)
19/04/2013	1	0.0000	0.0000
19/04/2013	2	0.0000	0.0000
19/04/2013	3	0.0000	0.0000
19/04/2013	4	0.0000	0.0000
19/04/2013	5	0.0000	0.0000
19/04/2013	6	0.0000	0.0000
19/04/2013	7	0.0000	0.0000
19/04/2013	8	0.0000	0.0000
19/04/2013	9	0.0000	0.0000
19/04/2013	10	0.0000	0.0000
19/04/2013	11	0.0000	0.0000
19/04/2013	12	0.0000	0.0000
19/04/2013	13	0.0000	0.0000
19/04/2013	14	0.0000	0.0000
19/04/2013	15	0.0000	0.0000
19/04/2013	16	0.0000	0.0000
19/04/2013	17	0.0000	0.0000
19/04/2013	18	0.0024	0.0007
19/04/2013	19	0.0015	0.0004
19/04/2013	20	0.0017	0.0005
19/04/2013	21	0.0013	0.0004
19/04/2013	22	0.0008	0.0002
19/04/2013	23	0.0003	0.0001
19/04/2013	24	0.0000	0.0000

Fuente autora

Tabla 51 Emisiones hora a hora PST y PM10-
Octavo día de campaña (13 de Abril)

FECHA	HORA	Emission (gPST/m2*s)	Emission (gPM10/m2*s)
20/04/2013	1	0.0000	0.0000
20/04/2013	2	0.0000	0.0000
20/04/2013	3	0.0011	0.0003
20/04/2013	4	0.0019	0.0005
20/04/2013	5	0.0054	0.0016
20/04/2013	6	0.0050	0.0015
20/04/2013	7	0.0034	0.0010
20/04/2013	8	0.0020	0.0006
20/04/2013	9	0.0021	0.0006
20/04/2013	10	0.0029	0.0009
20/04/2013	11	0.0040	0.0012
20/04/2013	12	0.0045	0.0013
20/04/2013	13	0.0024	0.0007
20/04/2013	14	0.0019	0.0006
20/04/2013	15	0.0035	0.0010
20/04/2013	16	0.0028	0.0008
20/04/2013	17	0.0030	0.0009
20/04/2013	18	0.0026	0.0008
20/04/2013	19	0.0021	0.0006
20/04/2013	20	0.0008	0.0002
20/04/2013	21	0.0008	0.0002
20/04/2013	22	0.0009	0.0003
20/04/2013	23	0.0006	0.0002
20/04/2013	24	0.0000	0.0000

Fuente autora

Tabla 52 Emisiones hora a hora PST y PM10-
Noveno día de campaña (13 de Abril)

FECHA	HORA	Emission (gPST/m2*s)	Emission (gPM10/m2*s)
21/04/2013	1	0.0002	0.0000
21/04/2013	2	0.0003	0.0001
21/04/2013	3	0.0005	0.0001
21/04/2013	4	0.0010	0.0003
21/04/2013	5	0.0045	0.0013
21/04/2013	6	0.0036	0.0010
21/04/2013	7	0.0029	0.0009
21/04/2013	8	0.0019	0.0006
21/04/2013	9	0.0032	0.0009
21/04/2013	10	0.0053	0.0015
21/04/2013	11	0.0022	0.0006
21/04/2013	12	0.0028	0.0008
21/04/2013	13	0.0028	0.0008
21/04/2013	14	0.0022	0.0006
21/04/2013	15	0.0034	0.0010
21/04/2013	16	0.0026	0.0007
21/04/2013	17	0.0031	0.0009
21/04/2013	18	0.0028	0.0008
21/04/2013	19	0.0021	0.0006
21/04/2013	20	0.0012	0.0003
21/04/2013	21	0.0006	0.0002
21/04/2013	22	0.0001	0.0000
21/04/2013	23	0.0000	0.0000
21/04/2013	24	0.0000	0.0000

Fuente autora

Tabla 53 Emisiones hora a hora PST y PM10-
Décimo día de campaña (13 de Abril)

FECHA	HORA	Emision (gPST/m2*s)	Emision (gPM10/m2*s)
22/04/2013	1	0.0000	0.0000
22/04/2013	2	0.0000	0.0000
22/04/2013	3	0.0003	0.0001
22/04/2013	4	0.0007	0.0002
22/04/2013	5	0.0023	0.0007
22/04/2013	6	0.0037	0.0011
22/04/2013	7	0.0039	0.0011
22/04/2013	8	0.0027	0.0008
22/04/2013	9	0.0021	0.0006
22/04/2013	10	0.0012	0.0004
22/04/2013	11	0.0028	0.0008
22/04/2013	12	0.0035	0.0010
22/04/2013	13	0.0031	0.0009
22/04/2013	14	0.0035	0.0010
22/04/2013	15	0.0019	0.0005
22/04/2013	16	0.0029	0.0008
22/04/2013	17	0.0029	0.0009
22/04/2013	18	0.0028	0.0008
22/04/2013	19	0.0018	0.0005
22/04/2013	20	0.0010	0.0003
22/04/2013	21	0.0011	0.0003
22/04/2013	22	0.0008	0.0002
22/04/2013	23	0.0001	0.0000
22/04/2013	24	0.0000	0.0000

Fuente autora

Tabla 54 Emisiones hora a hora PST y PM10-
Décimo primer día de campaña (13 de Abril)

FECHA	HORA	Emision (gPST/m2*s)	Emision (gPM10/m2*s)
23/04/2013	1	0.0002	0.0000
23/04/2013	2	0.0001	0.0000
23/04/2013	3	0.0008	0.0002
23/04/2013	4	0.0014	0.0004
23/04/2013	5	0.0057	0.0017
23/04/2013	6	0.0039	0.0011
23/04/2013	7	0.0028	0.0008
23/04/2013	8	0.0022	0.0007
23/04/2013	9	0.0017	0.0005
23/04/2013	10	0.0044	0.0013
23/04/2013	11	0.0039	0.0011
23/04/2013	12	0.0019	0.0006
23/04/2013	13	0.0025	0.0007
23/04/2013	14	0.0024	0.0007
23/04/2013	15	0.0030	0.0009
23/04/2013	16	0.0029	0.0008
23/04/2013	17	0.0033	0.0010
23/04/2013	18	0.0024	0.0007
23/04/2013	19	0.0015	0.0004
23/04/2013	20	0.0011	0.0003
23/04/2013	21	0.0001	0.0000
23/04/2013	22	0.0000	0.0000
23/04/2013	23	0.0000	0.0000
23/04/2013	24	0.0000	0.0000

Fuente autora

FECHA	HO RA	Nº Mot os	PE SO	FE (gPM10 /VKT)	Nº Aut os	PE SO	FE (gPM10 /VKT)	Nº Camio netas	PE SO	FE (gPM10 /VKT)	Nº Camp eros	PE SO	FE (gPM10 /VKT)	Nº Bu ses	PE SO	FE (gPM10 /VKT)	Nº Tanqu eros	PE SO	FE (gPM 10/V KT)	Nº Carga 2 ejes	PE SO	FE (gPM 10/V KT)	Nº Carga 3 ejes	PE SO	FE (gPM10 /VKT)	Nº Volqu etas	PE SO	FE (gPM10 /VKT)
23/04/ 2013	8	6	0.2	101.3	0	1.5	250.9	8	1.8	272.4	1	2.5	315.8	0	17	748.2	0	36	1048. 7	5	17	748.2	7	36	1048.7	0	32	994.6
23/04/ 2013	9	3	0.2	101.3	0	1.5	250.9	6	1.8	272.4	0	2.5	315.8	0	17	748.2	1	36	1048. 7	2	17	748.2	6	36	1048.7	0	32	994.6
23/04/ 2013	10	6	0.2	101.3	0	1.5	250.9	10	1.8	272.4	0	2.5	315.8	1	17	748.2	0	36	1048. 7	4	17	748.2	20	36	1048.7	0	32	994.6
23/04/ 2013	11	7	0.2	101.3	0	1.5	250.9	16	1.8	272.4	2	2.5	315.8	1	17	748.2	0	36	1048. 7	6	17	748.2	13	36	1048.7	0	32	994.6
23/04/ 2013	12	3	0.2	101.3	0	1.5	250.9	2	1.8	272.4	0	2.5	315.8	1	17	748.2	1	36	1048. 7	3	17	748.2	6	36	1048.7	1	32	994.6
23/04/ 2013	13	4	0.2	101.3	0	1.5	250.9	8	1.8	272.4	1	2.5	315.8	2	17	748.2	5	36	1048. 7	4	17	748.2	3	36	1048.7	0	32	994.6
23/04/ 2013	14	4	0.2	101.3	0	1.5	250.9	11	1.8	272.4	2	2.5	315.8	2	17	748.2	0	36	1048. 7	3	17	748.2	6	36	1048.7	1	32	994.6
23/04/ 2013	15	6	0.2	101.3	0	1.5	250.9	8	1.8	272.4	1	2.5	315.8	2	17	748.2	1	36	1048. 7	5	17	748.2	8	36	1048.7	1	32	994.6
23/04/ 2013	16	11	0.2	101.3	0	1.5	250.9	14	1.8	272.4	0	2.5	315.8	3	17	748.2	1	36	1048. 7	2	17	748.2	8	36	1048.7	0	32	994.6
23/04/ 2013	17	13	0.2	101.3	1	1.5	250.9	10	1.8	272.4	1	2.5	315.8	2	17	748.2	0	36	1048. 7	3	17	748.2	12	36	1048.7	0	32	994.6
23/04/ 2013	18	11	0.2	101.3	0	1.5	250.9	11	1.8	272.4	2	2.5	315.8	4	17	748.2	0	36	1048. 7	3	17	748.2	5	36	1048.7	0	32	994.6
23/04/ 2013	19	5	0.2	101.3	0	1.5	250.9	3	1.8	272.4	0	2.5	315.8	3	17	748.2	0	36	1048. 7	4	17	748.2	3	36	1048.7	0	32	994.6
23/04/ 2013	20	4	0.2	101.3	0	1.5	250.9	5	1.8	272.4	0	2.5	315.8	1	17	748.2	0	36	1048. 7	0	17	748.2	4	36	1048.7	0	32	994.6
23/04/ 2013	21	0	0.2	101.3	0	1.5	250.9	2	1.8	272.4	0	2.5	315.8	0	17	748.2	0	36	1048. 7	0	17	748.2	0	36	1048.7	0	32	994.6
23/04/ 2013	22	0	0.2	101.3	0	1.5	250.9	0	1.8	272.4	0	2.5	315.8	0	17	748.2	0	36	1048. 7	0	17	748.2	0	36	1048.7	0	32	994.6
23/04/ 2013	23	0	0.2	101.3	0	1.5	250.9	0	1.8	272.4	0	2.5	315.8	0	17	748.2	0	36	1048. 7	0	17	748.2	0	36	1048.7	0	32	994.6
23/04/ 2013	24	0	0.2	101.3	0	1.5	250.9	0	1.8	272.4	0	2.5	315.8	0	17	748.2	0	36	1048. 7	0	17	748.2	0	36	1048.7	0	32	994.6

Fuente autora

FECHA	HO RA	Nº Mo tos	PE SO	FE (gPST/ VKT)	Nº Au tos	PE SO	FE (gPST/ VKT)	Nº Camio netas	PE SO	FE (gPST/ VKT)	Nº Camp eros	PE SO	FE (gPST/ VKT)	Nº Bu ses	PE SO	FE (gPST/ VKT)	Nº Tanq ueros	PE SO	FE (gPST/ VKT)	Nº Ca rg a 2 eje s	PE SO	FE (gPST/ VKT)	Nº Ca rg a 3 eje s	PE SO	FE (gPST/ VKT)	Nº Volq uetas	PE SO	FE (gPST/ VKT)
23/04/2013	13	4	0.2	346.4	0	1.5	857.8	8	1.8	931.2	1	2.5	1079.5	2	17	2557.7	5	36	3585.0	4	17	2557.7	3	36	3585.0	0	32	3399.9
23/04/2013	14	4	0.2	346.4	0	1.5	857.8	11	1.8	931.2	2	2.5	1079.5	2	17	2557.7	0	36	3585.0	3	17	2557.7	6	36	3585.0	1	32	3399.9
23/04/2013	15	6	0.2	346.4	0	1.5	857.8	8	1.8	931.2	1	2.5	1079.5	2	17	2557.7	1	36	3585.0	5	17	2557.7	8	36	3585.0	1	32	3399.9
23/04/2013	16	11	0.2	346.4	0	1.5	857.8	14	1.8	931.2	0	2.5	1079.5	3	17	2557.7	1	36	3585.0	2	17	2557.7	8	36	3585.0	0	32	3399.9
23/04/2013	17	13	0.2	346.4	1	1.5	857.8	10	1.8	931.2	1	2.5	1079.5	2	17	2557.7	0	36	3585.0	3	17	2557.7	12	36	3585.0	0	32	3399.9
23/04/2013	18	11	0.2	346.4	0	1.5	857.8	11	1.8	931.2	2	2.5	1079.5	4	17	2557.7	0	36	3585.0	3	17	2557.7	5	36	3585.0	0	32	3399.9
23/04/2013	19	5	0.2	346.4	0	1.5	857.8	3	1.8	931.2	0	2.5	1079.5	3	17	2557.7	0	36	3585.0	4	17	2557.7	3	36	3585.0	0	32	3399.9
23/04/2013	20	4	0.2	346.4	0	1.5	857.8	5	1.8	931.2	0	2.5	1079.5	1	17	2557.7	0	36	3585.0	0	17	2557.7	4	36	3585.0	0	32	3399.9
23/04/2013	21	0	0.2	346.4	0	1.5	857.8	2	1.8	931.2	0	2.5	1079.5	0	17	2557.7	0	36	3585.0	0	17	2557.7	0	36	3585.0	0	32	3399.9
23/04/2013	22	0	0.2	346.4	0	1.5	857.8	0	1.8	931.2	0	2.5	1079.5	0	17	2557.7	0	36	3585.0	0	17	2557.7	0	36	3585.0	0	32	3399.9
23/04/2013	23	0	0.2	346.4	0	1.5	857.8	0	1.8	931.2	0	2.5	1079.5	0	17	2557.7	0	36	3585.0	0	17	2557.7	0	36	3585.0	0	32	3399.9
23/04/2013	24	0	0.2	346.4	0	1.5	857.8	0	1.8	931.2	0	2.5	1079.5	0	17	2557.7	0	36	3585.0	0	17	2557.7	0	36	3585.0	0	32	3399.9

Fuente autora

Anexo 3. Información de receptores sensibles

(En medio magnético)

Anexo 3. Información de receptores sensibles

En el presente anexo son presentadas las coordenadas sobre las cuales se ubicaron los receptores perpendiculares a la vía de estudio, de igual forma se presentan la distancia desde el centro de la vía a la cual se ubicaban y la altura calculada por AERMOD para cada uno de ellos (Ver tabla 1). La ilustración 1, presenta la distribución de los receptores en el área de estudio.

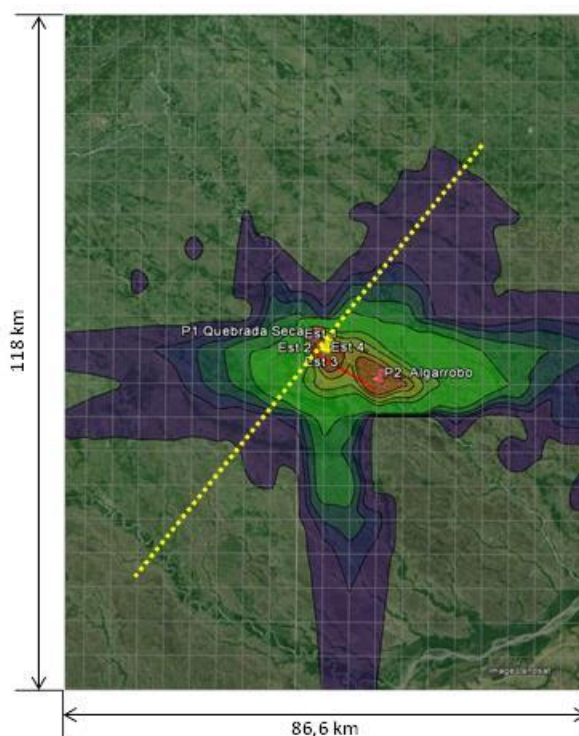


Ilustración 53 Distribución de receptores sensibles (Puntos amarillos) perpendiculares a la vía (Línea roja), Quebrada Seca- Casanare

Fuente (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

Cabe mencionar que la ubicación de estos receptores hace parte de los antecedentes con los que se contaba para el inicio de este proyecto.

Tabla 57 Información receptores

Coordenadas		Distancia (m)	Altura (m)
X (km E)	Y (km N)		
171.748	559.380	1036.01	169.76
171.718	559.338	984.10	169.46
171.688	559.296	932.20	169.61
171.658	559.253	880.29	169.41
171.628	559.211	828.39	169.00
171.598	559.169	776.48	169.00
171.568	559.126	724.58	169.00
171.558	559.112	707.27	168.93
171.548	559.098	689.98	168.91
171.538	559.084	672.68	168.96
171.528	559.070	655.37	169.07
171.518	559.056	638.07	169.25
171.508	559.042	620.77	169.49
171.498	559.027	603.47	169.71
171.488	559.013	586.16	169.68
171.478	558.999	568.86	169.62
171.468	558.985	551.56	169.43
171.458	558.971	534.26	169.23
171.448	558.957	516.96	169.08
171.438	558.943	499.66	169.01
171.428	558.929	482.36	169.18
171.418	558.915	465.05	169.38
171.408	558.900	447.75	169.55
171.398	558.886	430.45	169.69
171.388	558.872	413.15	169.79

Coordenadas		Distancia (m)	Altura (m)
X (km E)	Y (km N)		
171.378	558.858	395.85	169.86
171.368	558.844	378.54	169.83
171.358	558.830	361.24	169.66
171.348	558.816	343.95	169.54
171.338	558.802	326.64	169.50
171.328	558.787	309.34	169.52
171.318	558.773	292.04	169.61
171.308	558.759	274.74	169.76
171.298	558.745	257.43	169.89
171.288	558.731	240.13	170.00
171.278	558.717	222.83	169.94
171.268	558.703	205.53	169.91
171.258	558.689	188.22	169.91
171.248	558.674	170.93	169.95
171.238	558.660	153.63	170.00
171.228	558.646	136.32	170.00
171.218	558.632	119.02	170.00
171.208	558.618	101.72	170.00
171.198	558.604	84.42	170.00
171.188	558.590	67.11	169.99
171.178	558.576	49.81	169.99
171.168	558.562	32.51	169.86
171.167	558.560	30.78	169.84
171.166	558.559	29.05	169.81
171.165	558.557	27.32	169.79
171.164	558.556	25.60	169.77

Coordenadas		Distancia (m)	Altura (m)
X (km E)	Y (km N)		
171.163	558.554	23.86	169.75
171.162	558.553	22.13	169.73
171.161	558.552	20.40	169.70
171.160	558.550	18.67	169.68
171.159	558.549	16.94	169.65
171.158	558.547	15.21	169.63
171.157	558.546	13.48	169.61
171.156	558.545	11.75	169.58
171.155	558.543	10.02	169.56
171.154	558.542	8.29	169.53
171.153	558.540	6.56	169.51
171.152	558.539	4.83	169.48
171.151	558.538	3.10	169.45
171.150	558.536	1.37	169.43
171.150	558.535	0.00	169.40
171.149	558.535	-0.36	169.40
171.148	558.533	-2.09	169.37
171.147	558.532	-3.59	169.35
171.147	558.531	-4.98	169.33
171.146	558.530	-6.51	169.30
171.145	558.528	-8.00	169.28
171.144	558.527	-9.74	169.25
171.143	558.526	-11.47	169.22
171.142	558.524	-13.20	169.19
171.141	558.523	-14.93	169.16
171.140	558.521	-16.66	169.13

Coordenadas		Distancia (m)	Altura (m)
X (km E)	Y (km N)		
171.139	558.520	-18.38	169.10
171.138	558.519	-20.12	169.07
171.137	558.517	-21.85	169.04
171.136	558.516	-23.58	169.00
171.135	558.514	-25.31	168.97
171.134	558.513	-27.04	168.94
171.133	558.512	-28.77	168.91
171.132	558.510	-30.50	168.88
171.131	558.509	-32.23	168.84
171.130	558.507	-33.96	168.81
171.129	558.506	-35.69	168.78
171.128	558.504	-37.42	168.74
171.127	558.503	-39.15	168.71
171.126	558.502	-40.88	168.67
171.125	558.500	-42.61	168.64
171.115	558.486	-59.91	168.27
171.105	558.472	-77.21	168.21
171.095	558.458	-94.52	168.50
171.085	558.444	-111.82	168.75
171.075	558.430	-129.12	168.91
171.065	558.416	-146.42	168.97
171.055	558.401	-163.72	168.92
171.045	558.387	-181.02	168.79
171.035	558.373	-198.32	168.93
171.025	558.359	-215.63	169.28
171.015	558.345	-232.93	169.81

Coordenadas		Distancia (m)	Altura (m)
X (km E)	Y (km N)		
171.005	558.331	-250.23	170.40
170.995	558.317	-267.53	170.67
170.985	558.303	-284.84	170.78
170.975	558.288	-302.14	170.47
170.965	558.274	-319.44	169.98
170.955	558.260	-336.74	169.58
170.945	558.246	-354.04	169.29
170.935	558.232	-371.34	169.09
170.925	558.218	-388.64	168.99
170.915	558.204	-405.94	169.01
170.905	558.190	-423.25	169.33
170.895	558.175	-440.55	169.69
170.885	558.161	-457.85	170.08
170.875	558.147	-475.15	170.51
170.865	558.133	-492.46	170.96
170.855	558.119	-509.75	171.45
170.845	558.105	-527.05	171.70
170.835	558.091	-544.36	171.67
170.825	558.077	-561.66	171.60
170.815	558.063	-578.96	171.63
170.805	558.048	-596.26	171.69
170.795	558.034	-613.57	171.75
170.785	558.020	-630.87	171.81
170.775	558.006	-648.17	171.95
170.765	557.992	-665.47	172.12
170.755	557.978	-682.78	172.32

Coordenadas		Distancia (m)	Altura (m)
X (km E)	Y (km N)		
170.745	557.964	-700.07	172.56
170.735	557.950	-717.37	172.83
170.725	557.935	-734.67	172.82
170.695	557.893	-786.58	170.04
170.665	557.851	-838.49	167.77
170.635	557.808	-890.39	167.60
170.605	557.766	-942.30	168.27
170.575	557.724	-994.20	168.34
170.545	557.681	-1046.10	168.02

Anexo 4. Archivos SFC y PFL

(En medio magnético)

Anexo 4. Archivos SFC y PFL

El presente anexo contiene los archivos Surface y Profile generados luego de realizar el pre-procesamiento meteorológico para las 12 estaciones utilizadas durante el estudio. Se encuentran organizados en tres carpetas correspondientes a los tres países tenidos en cuenta (Colombia, Estados Unidos y reino Unido). Como se mencionó en el informe la información meteorológica de diferentes lugares fue empleada para corroborar el comportamiento del perfil de concentraciones, información más puntual de cada estación es presentada en la Tabla 1.

Tabla 58 Estaciones meteorológicas utilizadas en la determinación del perfil de concentraciones

Nombre estación	País	Año	Fuente
Borrego	Colombia	2009	Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM
Calenturitas	Colombia	2009	Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM
Cerrolargo	Colombia	2009	Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM
Descanso	Colombia	2009	Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM
Texas	Estados Unidos	1990	Centro de recursos meteorológicos WEBMET
Corpus	Estados Unidos	1990	Centro de recursos meteorológicos WEBMET
Buffalo	Estados Unidos	1990	Centro de recursos meteorológicos WEBMET
Michigan	Estados Unidos	1990	Centro de recursos meteorológicos WEBMET
Alaska	Estados Unidos	1990	Centro de recursos meteorológicos WEBMET
UK113	Inglaterra	2012	Centro británico de datos atmosféricos BADC
UK19260	Inglaterra	2012	Centro británico de datos atmosféricos BADC
UK09	Inglaterra	2012	Centro británico de datos atmosféricos BADC

Fuente Autora

La estructura en la que se encuentran los archivos Surface y profile columna por columna es presentada a continuación, cuentan con un total de 8760 filas, es decir para cada parámetro evaluado se estimaron valores horarios para los 365 días del año.

Los archivos SFC cuentan con un total de 20 columnas que numeradas de izquierda a derecha corresponden a:

1. Año

2. Mes
3. Día
4. Día Juliano
5. Hora
6. Ho: Flujo de calor sensible
7. U*: Velocidad de fricción (m/s)
8. W*: Escala de velocidad convectiva
9. Gradiente de temperatura vertical
10. Zmec: Altura de mezcla mecánica (m)
11. Zcon: Altura de mezcla convectiva (m)
12. L: Longitud de Monin-Obukhov
13. Zo: Rugosidad superficial (m)
14. Bowen
15. Albedo
16. Velocidad del viento (m/s)
17. Dirección del viento
18. Zref: Altura del anemómetro (m)
19. Temperatura del aire (K)
20. Ztemp: Altura de medición de la temperatura (m)

Los archivos Profile cuentan con once columnas que numeradas de izquierda a derecha corresponden a:

1. Año
2. Mes
3. Día
4. Hora
5. Altura de medición (m)
6. Flanco: altura de medición más alta (m)
7. Dirección del viento
8. Velocidad del viento (m/s)
9. Temperatura del aire (K)
10. Desviación estándar de la dirección del viento
11. Desviación estándar dirección del viento

Anexo 5. Concentraciones PM10 y PST arrojadas por AERMOD

(En medio magnético)

Anexo 5. Concentraciones PM10 y PST arrojadas por AERMOD

El presente anexo presenta las concentraciones en μ/m^3 de PM10 y PST obtenidas a partir de AERMOD para cada una de las estaciones meteorológicas utilizadas (Ver Tabla 1). Los valores de concentración están dados en función de la distancia perpendicular a la vía, desde el centro de la vía hasta aproximadamente un kilómetro. Las ilustraciones 1 y 2 ejemplifican el comportamiento de cada caso.

Tabla 59 Concentraciones PST y PM10 para cada una de las estaciones meteorológicas evaluadas

Distancia vía (m)	Borrego		Calenturitas		Cerrolargo		Descanso		UK09		UK113		UK19260		Alaska		Texas		Michigan		Buffalo		CorpusCristi	
	PST (ug/m ³)	PM10 (ug/m ³)	PST (ug/m ³)	PM10 (ug/m ³)	PST (ug/m ³)	PM10 (ug/m ³)	PST (ug/m ³)	PM10 (ug/m ³)	PST (ug/m ³)	PM10 (ug/m ³)	PST (ug/m ³)	PM10 (ug/m ³)	PST (ug/m ³)	PM10 (ug/m ³)	PST (ug/m ³)	PM10 (ug/m ³)	PST (ug/m ³)	PM10 (ug/m ³)	PST (ug/m ³)	PM10 (ug/m ³)	PST (ug/m ³)	PM10 (ug/m ³)	PST (ug/m ³)	PM10 (ug/m ³)
1036.0	0.1	0.8	0.1	62.4	0.3	0.0	0.3	45.3	0.1	0.0	0.1	7.6	0.1	29.2	0.1	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0
984.1	0.1	0.6	0.1	57.5	0.3	0.0	0.3	45.6	0.1	0.0	0.1	71.2	0.1	37.1	0.1	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0
932.2	0.1	0.6	0.1	60.6	0.3	0.0	0.3	47.5	0.1	0.0	0.1	68.9	0.1	43.4	0.1	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0
880.3	0.1	0.7	0.1	65.1	0.3	0.0	0.3	47.5	0.2	0.0	0.1	72.0	0.1	53.7	0.1	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0
828.4	0.1	0.5	0.1	62.1	0.3	0.0	0.3	55.4	0.2	0.0	0.1	69.3	0.1	67.4	0.1	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0
776.5	0.1	0.4	0.1	50.1	0.4	0.0	0.3	42.2	0.2	0.0	0.1	55.5	0.1	60.2	0.1	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0
724.6	0.1	0.3	0.1	53.0	0.4	0.0	0.3	41.5	0.2	0.0	0.1	48.1	0.1	45.6	0.1	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0
707.3	0.1	0.3	0.1	53.0	0.4	0.0	0.3	38.8	0.2	0.0	0.1	48.3	0.1	49.0	0.1	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0
690.0	0.1	0.3	0.1	48.6	0.4	0.0	0.3	47.2	0.2	0.0	0.1	44.5	0.1	4.5	0.1	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0
672.7	0.1	0.3	0.1	49.1	0.4	0.0	0.3	43.8	0.3	0.0	0.2	70.6	0.2	43.9	0.1	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0
655.4	0.1	0.3	0.1	48.0	0.4	0.0	0.3	43.7	0.3	0.0	0.2	60.1	0.2	5.0	0.1	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0
638.1	0.1	0.3	0.1	53.0	0.4	0.0	0.3	42.6	0.2	0.0	0.2	43.6	0.2	42.0	0.1	0.0	0.4	0.0	0.4	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0
620.8	0.1	0.3	0.1	47.5	0.4	0.0	0.3	42.7	0.3	0.0	0.2	48.6	0.2	46.1	0.1	0.0	0.5	0.0	0.4	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0
603.5	0.1	0.4	0.1	48.6	0.4	0.0	0.3	42.6	0.3	0.0	0.2	44.1	0.2	33.2	0.1	0.0	0.5	0.0	0.4	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0
586.2	0.1	0.4	0.1	54.9	0.4	0.0	0.4	41.9	0.3	0.0	0.2	41.6	0.2	38.1	0.1	0.0	0.5	0.0	0.4	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0
568.9	0.1	0.3	0.1	50.0	0.5	0.0	0.4	44.6	0.3	0.0	0.2	4.3	0.2	33.9	0.1	0.0	0.5	0.0	0.4	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0
551.6	0.1	0.3	0.1	46.6	0.5	0.0	0.4	46.2	0.3	0.0	0.2	43.0	0.2	35.3	0.2	0.0	0.5	0.0	0.4	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0
534.3	0.1	0.3	0.1	62.4	0.5	0.0	0.4	49.1	0.3	0.0	0.2	4.1	0.2	41.7	0.2	0.0	0.5	0.0	0.4	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0
517.0	0.1	0.3	0.1	56.2	0.5	0.1	0.4	49.7	0.4	5.4	0.2	43.4	0.2	30.0	0.2	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0

Distan cia vía (m)	Borrego		Calenturitas		Cerro Largo		Descanso		UK09		UK113		UK19260		Alaska		Texas		Michigan		Buffalo		CorpusCristi	
	PST (ug/m 3)	PM10 (ug/m 3)	PST (ug/m 3)	PM10 (ug/m 3)	PST (ug/m 3)	PM10 (ug/m 3)	PST (ug/ m3)	PM10 (ug/ m3)	PST (ug/ m3)	PM10 (ug/ m3)	PST (ug/ m3)	PM10 (ug/ m3)	PST (ug/ m3)	PM10 (ug/ m3)	PST (ug/ m3)	PM10 (ug/ m3)	PST (ug/ m3)	PM10 (ug/ m3)	PST (ug/ m3)	PM10 (ug/ m3)	PST (ug/ m3)	PM10 (ug/ m3)	PST (ug/ m3)	PM10 (ug/ m3)
6.6	5.7	4.2	2.3	85.7	4.2	0.7	4.8	77.6	64.7	1051. 5	19.3	369.4	28.4	509.8	6.1	0.6	8.5	0.7	10.0	0.7	2.6	0.4	6.0	0.4
4.8	6.7	4.9	2.5	98.0	4.7	0.7	5.5	79.1	74.1	1226. 4	23.0	433.6	34.4	597.2	6.8	0.7	9.4	0.8	11.1	0.8	2.9	0.4	6.7	0.5
3.1	8.0	5.9	3.0	114.9	5.3	0.8	6.4	75.4	90.6	1454. 1	28.6	521.1	42.9	716.6	7.7	0.8	10.6	0.9	12.5	0.9	3.4	0.5	7.6	0.5
1.4	9.9	7.2	3.4	138.7	6.1	0.9	7.1	87.1	113.0	1762. 7	35.5	644.9	54.5	879.1	8.9	0.9	12.1	1.0	14.3	1.0	3.8	0.5	8.7	0.6
0.0	12.6	9.0	4.2	175.8	7.2	1.1	9.0	95.9	146.2	2195. 7	47.7	83.4	72.8	1122. 5	10.5	1.0	14.3	1.2	16.8	1.2	4.6	0.6	10.2	0.7

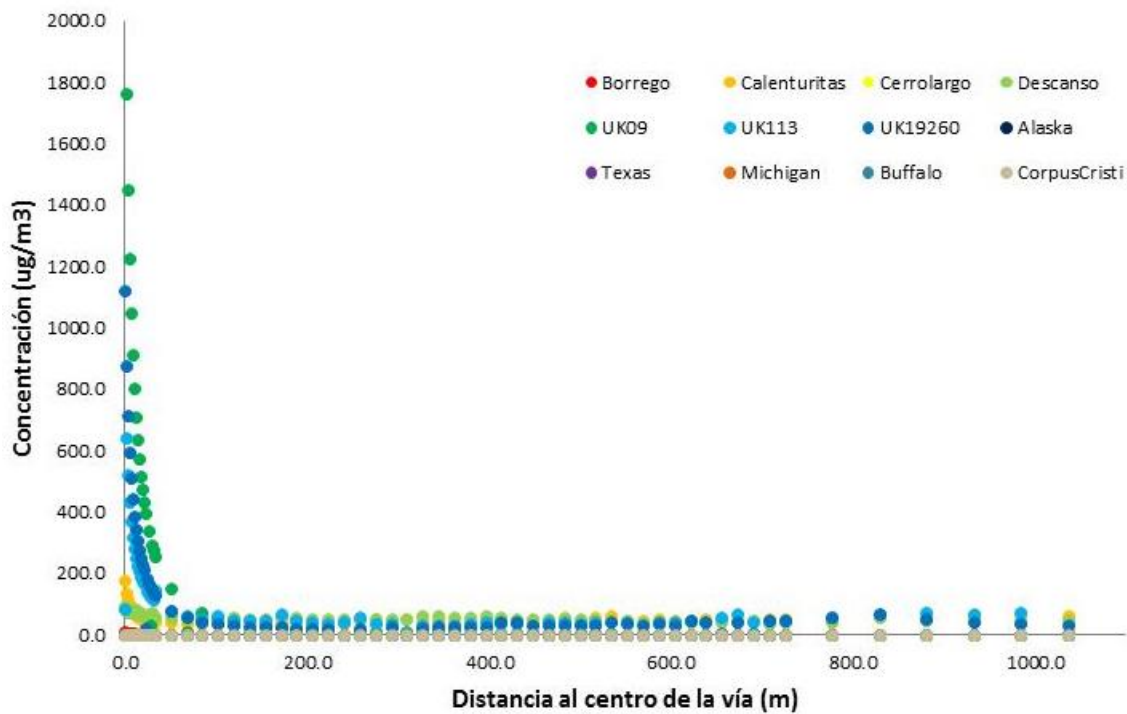


Ilustración 54 concentraciones PM10 vs. Distancia
Fuente Autora

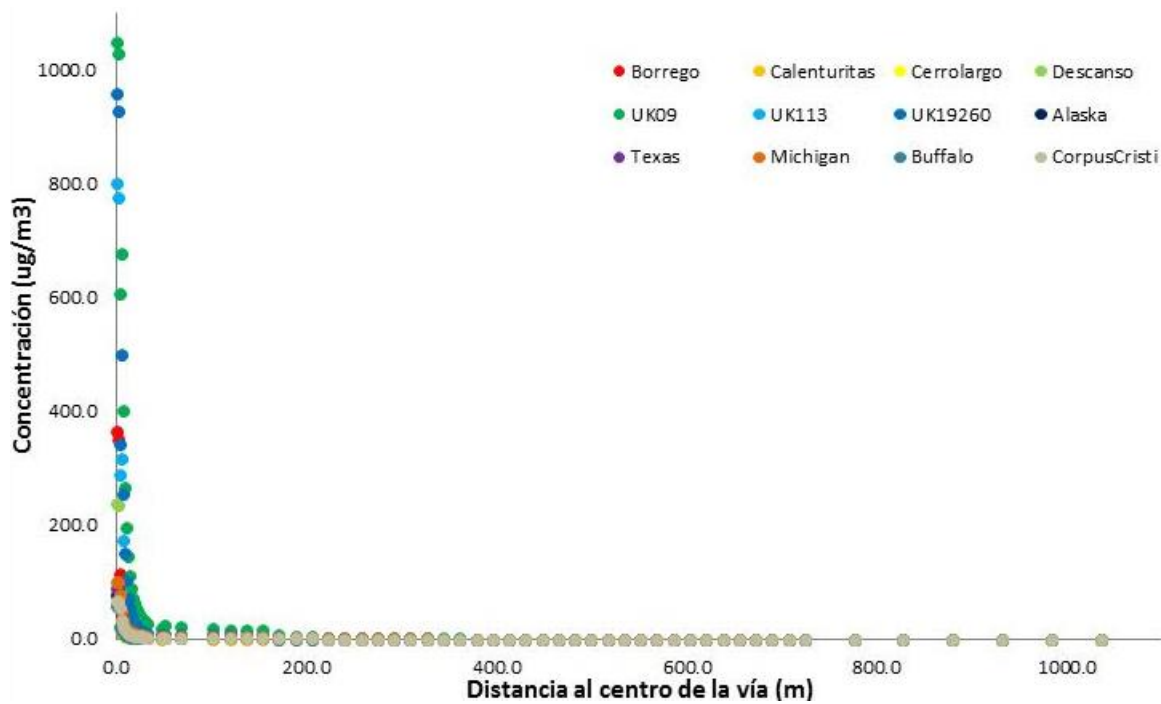


Ilustración 55 Concentraciones PST vs. Distancia
Fuente Autora

Anexo 6. Resultados EasyFit

(En medio magnético)

Anexo 6. Resultados EasyFit

EasyFit es un software de análisis estadístico que permite ajustar muestras de datos a diferentes distribuciones. Mediante pruebas de bondad como Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling y Chicuadrado, EasyFit compara los datos de las muestras ingresadas con cerca de 50 funciones de probabilidad distintas, a partir de estas el usuario es capaz de decidir cuál es la función que mejor representa su muestra de datos.

Para el presente estudio, la prueba que se tomó como referencia principal fue la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S). Esta consiste en el cálculo de la discrepancia máxima entre valores de la función acumulada empíricos (valores ingresado por el usuario) y valores de la función acumulada teóricos (valores obtenidos a partir de la función contra la que se compara). Para evaluar la prueba de bondad se plantean como hipótesis nula (H_0) y como hipótesis alterna (H_1) las premisas enunciadas a continuación:

- H_0 : Los datos se ajustan a la función evaluada
- H_1 : Los datos no se ajustan a la función evaluada

Estas hipótesis son evaluadas para cada una de las funciones con las que se comparan los datos ingresados, en donde se rechazará la hipótesis nula si la función evaluada no representa el comportamiento de los datos. Para este estudio, se compararon los datos de concentraciones en la distancia contra todas las funciones que contiene EasyFit (61 funciones), a partir de lo cual se halló que la función que mejor representa el comportamiento de los datos es la función Beta. En el presente anexo se presentan los resultados obtenidos para cada una de las 12 estaciones tenidas en cuenta, los resultados de concentraciones PM10 y PST son presentados a continuación.

Los resultados obtenidos se encuentran a continuación en la Tabla 1. en esta tabla se presenta la función que mejor se ajustó a la muestra de datos, si bien en algunos casos se encontró que más de una función podía representar el perfil de los datos, solo se enseña la función que tuvo el mejor ajuste junto con los resultados de la prueba de bondad K-S y el gráfico de función de probabilidad acumulada.

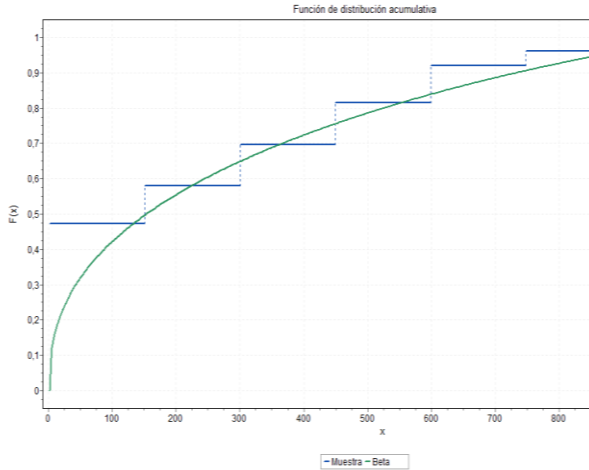
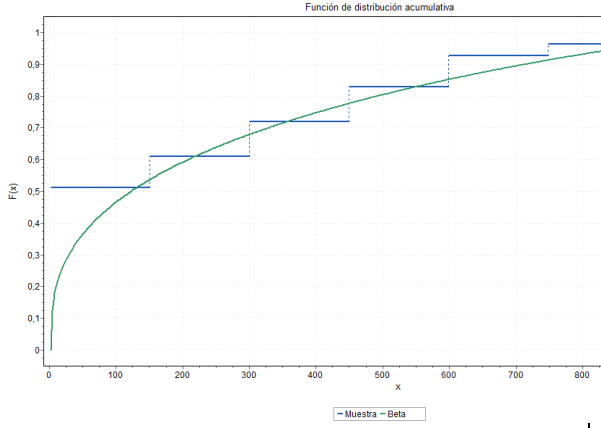
A partir de la Tabla 1 es posible observar que el perfil normalizado de concentraciones de PST del 83% de las estaciones evaluadas puede ser representado correctamente por la función Beta. En el caso del perfil normalizado de concentraciones de PM10 del 50% de estaciones evaluadas puede ser representado por una función Beta.

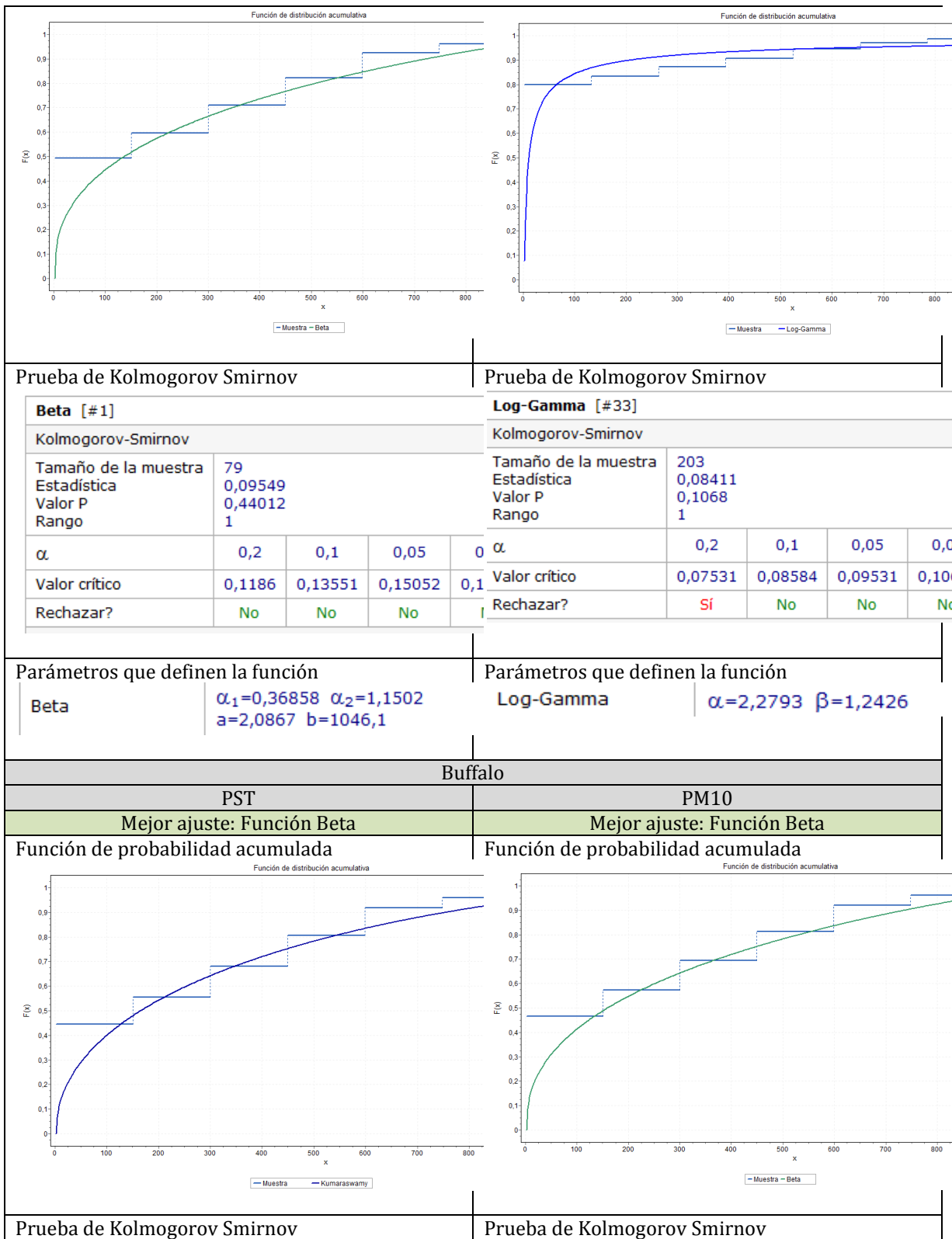
Si bien al evaluar las concentraciones de PM10, estaciones como Michigan y Texas (estaciones señaladas en azul) se ajustaron mejor a una función gamma, según los resultados de EasyFit también se ajustan a una función beta, razón por la cual a fin de identificar una sola función que representara el perfil de concentraciones se seleccionó la función Beta.

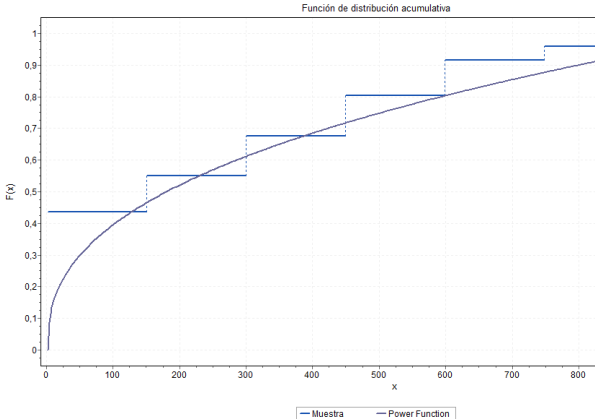
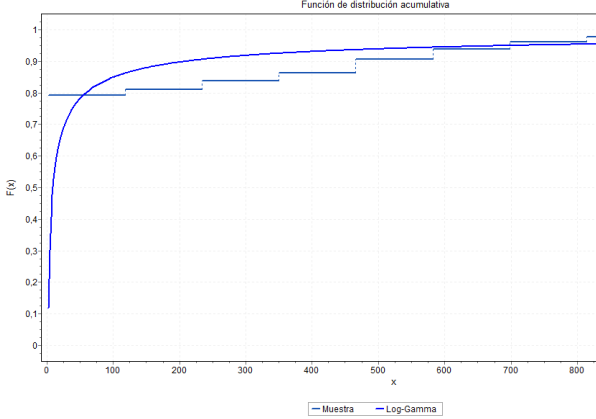
En el caso de estaciones como Borrego, Calenturitas, Descanso, UK09, UK113 y UK19260 para concentraciones de PM10, indicaron tener un mejor ajuste hacia funciones como Log-Logistic, Log Pearson, Log -Gamma, sin embargo al evaluar los resultados de la prueba K-S la hipótesis

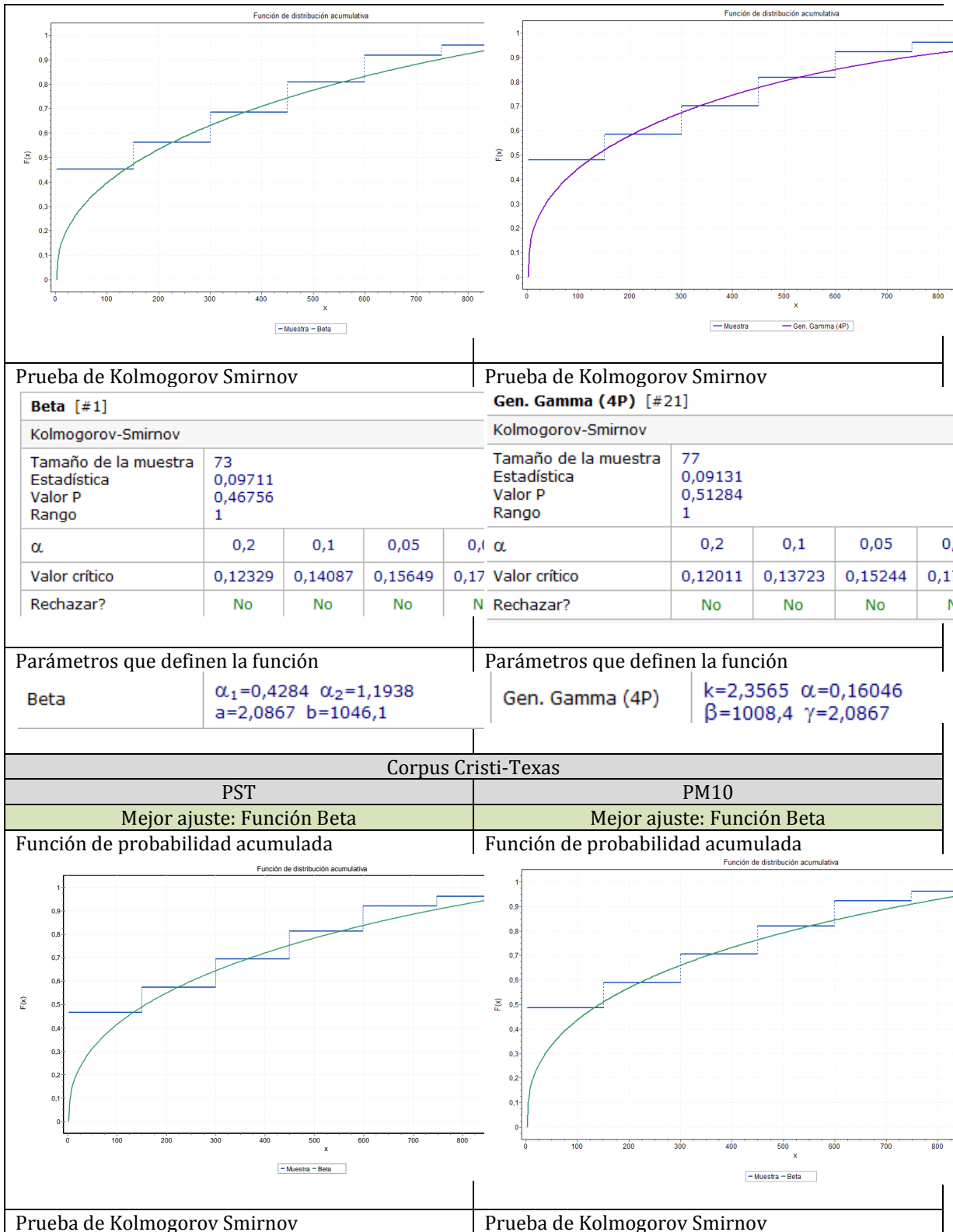
nula para todos los niveles de significancia evaluados (20%, 10%, 5%, 2%, 1%) fue rechazada, indicando que estos datos no pueden ser representados por alguna función en específico. De igual forma sucede para las estaciones UK 09 y UK19260 en concentraciones de PST. Estas estaciones se encuentran señaladas en la tabla por color rojo.

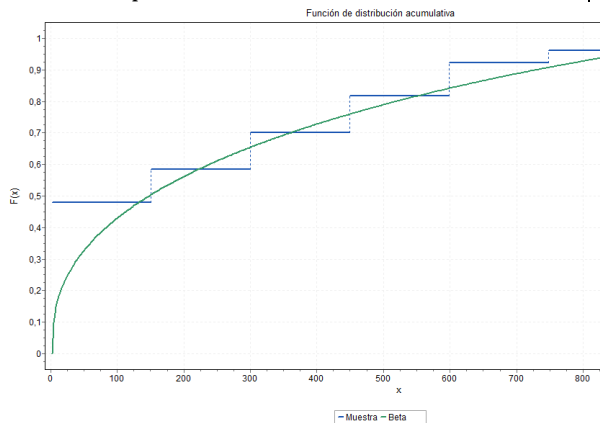
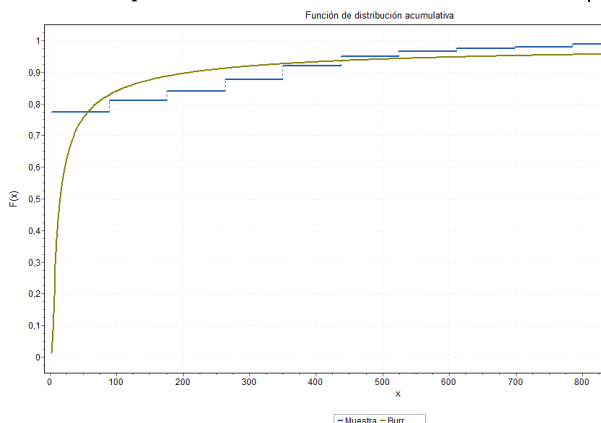
Tabla 60 Resultados EasyFit para cada estación analizada

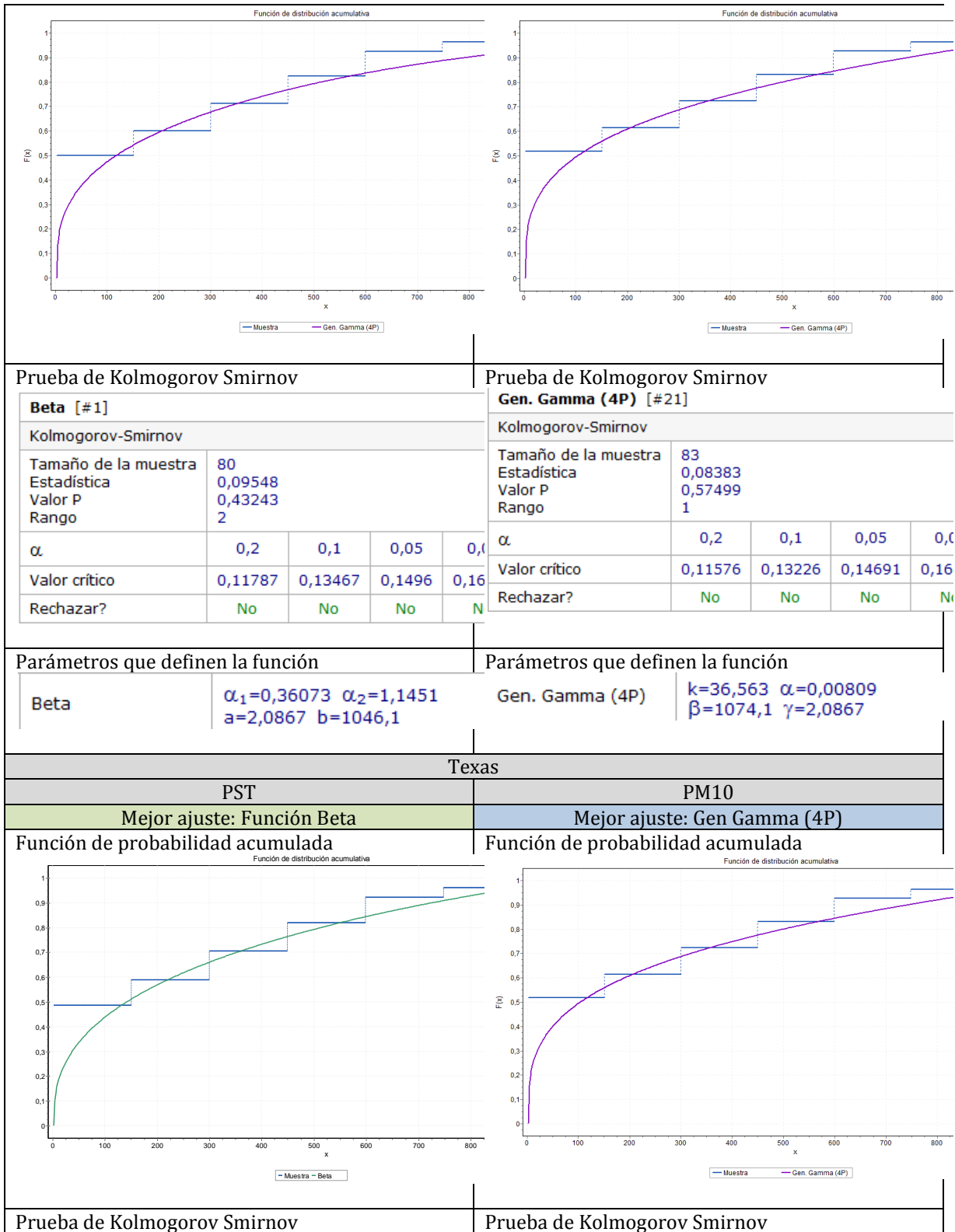
Alaska									
PST					PM10				
Mejor ajuste: Función Beta					Mejor ajuste: Función Beta				
Función de probabilidad acumulada					Función de probabilidad acumulada				
									
Prueba de Kolmogorov Smirnov					Prueba de Kolmogorov Smirnov				
Beta [#1] Kolmogorov-Smirnov					Beta [#1] Kolmogorov-Smirnov				
Tamaño de la muestra		76			Tamaño de la muestra		82		
Estadística		0,09646			Estadística		0,09511		
Valor P		0,45124			Valor P		0,42227		
Rango		1			Rango		1		
α	0,2	0,1	0,05	0,01	α	0,2	0,1	0,05	0,01
Valor crítico	0,12088	0,13811	0,15342	0,17000	Valor crítico	0,11645	0,13305	0,14779	0,16000
Rechazar?	No	No	No	No	Rechazar?	No	No	No	No
Parámetros que definen la función					Parámetros que definen la función				
Beta		$\alpha_1=0,39614$ $\alpha_2=1,1702$ $a=2,0867$ $b=1046,1$			Beta		$\alpha_1=0,34571$ $\alpha_2=1,1349$ $a=2,0867$ $b=1046,1$		
Borrego									
PST					PM10				
Mejor ajuste: Función Beta					Mejor ajuste: Log-Gamma				
Función de probabilidad acumulada					Función de probabilidad acumulada				

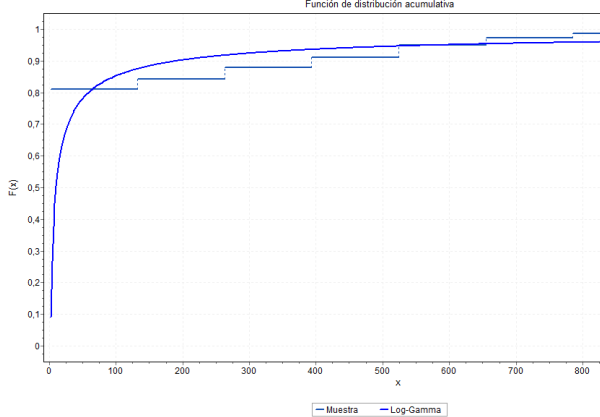
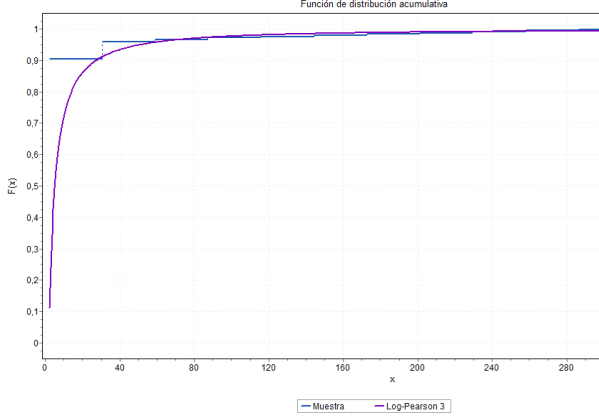


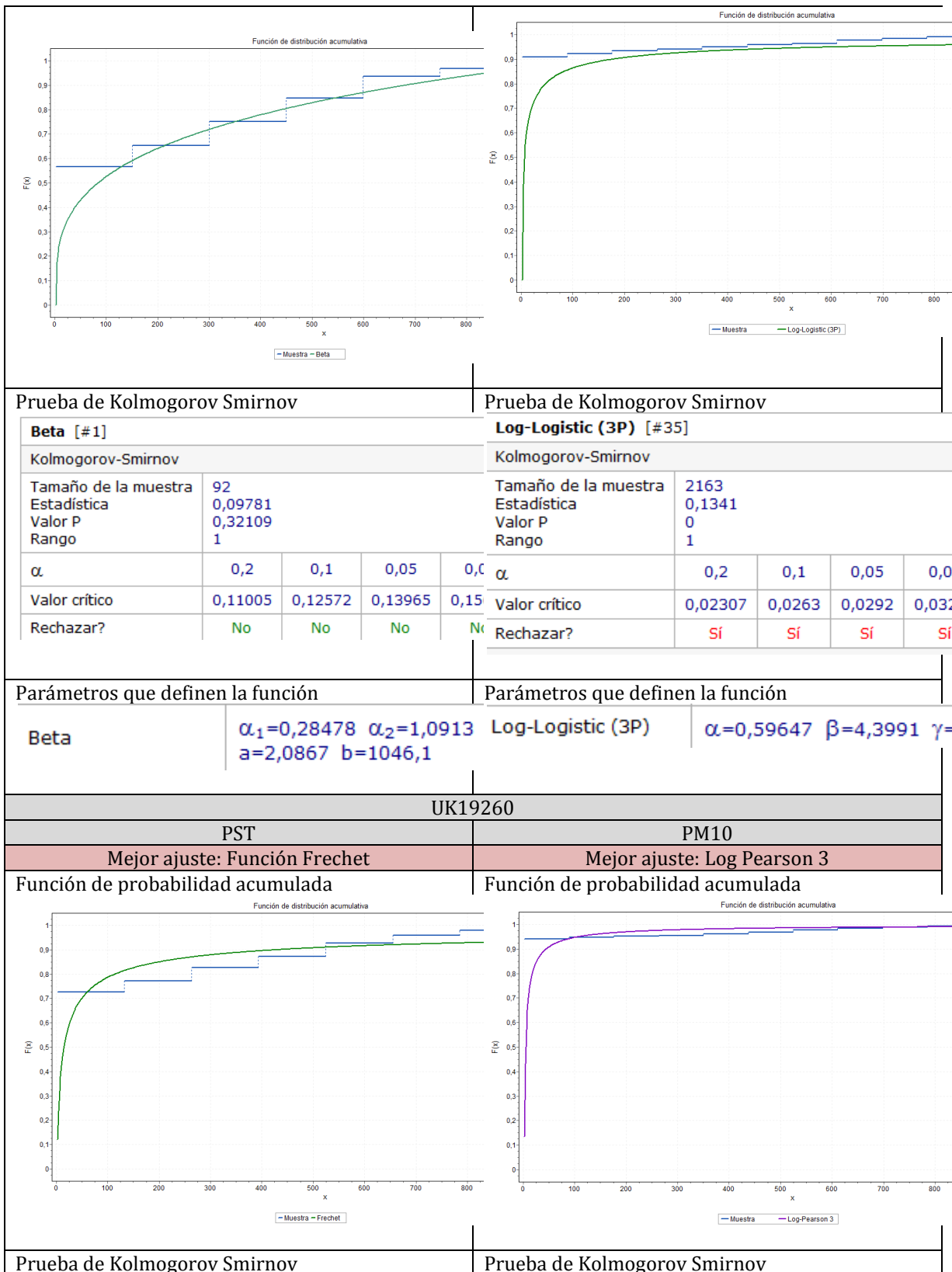
Beta [#1]					Beta [#1]				
Kolmogorov-Smirnov					Kolmogorov-Smirnov				
Tamaño de la muestra	72				Tamaño de la muestra	75			
Estadística	0,09717				Estadística	0,09679			
Valor P	0,47535				Valor P	0,455			
Rango	3				Rango	1			
α	0,2	0,1	0,05	0,01	α	0,2	0,1	0,05	0,01
Valor crítico	0,12413	0,14183	0,15755	0,17448	Valor crítico	0,12167	0,13901	0,15442	0,17189
Rechazar?	No	No	No	No	Rechazar?	No	No	No	No
Parámetros que definen la función					Parámetros que definen la función				
Beta	$\alpha_1=0,4403$ $\alpha_2=1,2024$ $a=2,0867$ $b=1046,1$				Beta	$\alpha_1=0,40643$ $\alpha_2=1,1778$ $a=2,0867$ $b=1046,1$			
Calenturitas									
PST					PM10				
Mejor ajuste: Función Beta					Mejor ajuste: Log-gamma				
Función de probabilidad acumulada					Función de probabilidad acumulada				
									
Prueba de Kolmogorov Smirnov					Prueba de Kolmogorov Smirnov				
Beta [#1]					Log-Gamma [#33]				
Kolmogorov-Smirnov					Kolmogorov-Smirnov				
Tamaño de la muestra	71				Tamaño de la muestra	374			
Estadística	0,09726				Estadística	0,11807			
Valor P	0,48291				Valor P	5,3053E-5			
Rango	2				Rango	1			
α	0,2	0,1	0,05	0,01	α	0,2	0,1	0,05	0,01
Valor crítico	0,12499	0,14281	0,15864	0,17546	Valor crítico	0,05548	0,06324	0,07022	0,07704
Rechazar?	No	No	No	No	Rechazar?	Sí	Sí	Sí	Sí
Parámetros que definen la función					Parámetros que definen la función				
Beta	$\alpha_1=0,45307$ $\alpha_2=1,2119$ $a=2,0867$ $b=1046,1$				Log-Gamma	$\alpha=1,8412$ $\beta=1,4636$			
Cerro Largo									
PST					PM10				
Mejor ajuste: Función Beta					Gen Gamma (4P)				
Función de probabilidad acumulada					Función de probabilidad acumulada				



Beta [#1]					Beta [#1]				
Kolmogorov-Smirnov					Kolmogorov-Smirnov				
Tamaño de la muestra	75				Tamaño de la muestra	78			
Estadística	0,09679				Estadística	0,09604			
Valor P	0,455				Valor P	0,44064			
Rango	1				Rango	1			
α	0,2	0,1	0,05	0,01	α	0,2	0,1	0,05	0,01
Valor crítico	0,12167	0,13901	0,15442	0,17045	Valor crítico	0,11935	0,13636	0,15147	0,16451
Rechazar?	No	No	No	No	Rechazar?	No	No	No	No
Parámetros que definen la función					Parámetros que definen la función				
Beta	$\alpha_1=0,40643$ $\alpha_2=1,1778$ $a=2,0867$ $b=1046,1$				Beta	$\alpha_1=0,37759$ $\alpha_2=1,157$ $a=2,0867$ $b=1046,1$			
Descanso									
PST					PM10				
Mejor ajuste: Función Beta					Mejor ajuste: Función Beta				
Función de probabilidad acumulada					Función de probabilidad acumulada				
									
Prueba de Kolmogorov Smirnov					Prueba de Kolmogorov Smirnov				
Beta [#1]					Beta [#1]				
Kolmogorov-Smirnov					Kolmogorov-Smirnov				
Tamaño de la muestra	77				Tamaño de la muestra	2529			
Estadística	0,09607				Estadística	0,3019			
Valor P	0,44819				Valor P	0			
Rango	1				Rango	35			
α	0,2	0,1	0,05	0,01	α	0,2	0,1	0,05	0,01
Valor crítico	0,12011	0,13723	0,15244	0,17045	Valor crítico	0,02134	0,02432	0,027	0,0303
Rechazar?	No	No	No	No	Rechazar?	Sí	Sí	Sí	Sí
Parámetros que definen la función					Parámetros que definen la función				
Beta	$\alpha_1=0,38637$ $\alpha_2=1,163$ $a=2,0867$ $b=1046,1$				Beta	$\alpha_1=0,17227$ $\alpha_2=1,3667$ $a=2,0867$ $b=1046,1$			
Michigan									
PST					PM10				
Mejor ajuste: Función Beta					Mejor ajuste: Gen Gamma (4P)				
Función de probabilidad acumulada					Función de probabilidad acumulada				



Beta [#1]					Gen. Gamma (4P) [#21]				
Kolmogorov-Smirnov					Kolmogorov-Smirnov				
Tamaño de la muestra	78				Tamaño de la muestra	83			
Estadística	0,09604				Estadística	0,08383			
Valor P	0,44064				Valor P	0,57499			
Rango	1				Rango	1			
α	0,2	0,1	0,05	0,01	α	0,2	0,1	0,05	0,01
Valor crítico	0,11935	0,13636	0,15147	0,16715	Valor crítico	0,11576	0,13226	0,14691	0,16054
Rechazar?	No	No	No	No	Rechazar?	No	No	No	No
Parámetros que definen la función					Parámetros que definen la función				
Beta	$\alpha_1=0,37759$ $\alpha_2=1,157$ $a=2,0867$ $b=1046,1$				Gen. Gamma	$k=0,79298$ $\alpha=0,72383$ $\beta=330,7$			
UK09									
PST					PM10				
Mejor ajuste: Función Log Gamma					Mejor ajuste: Log pearson				
Función de probabilidad acumulada					Función de probabilidad acumulada				
									
Prueba de Kolmogorov Smirnov					Prueba de Kolmogorov Smirnov				
Log-Gamma [#33]					Log-Pearson 3 [#36]				
Kolmogorov-Smirnov					Kolmogorov-Smirnov				
Tamaño de la muestra	215				Tamaño de la muestra	4998			
Estadística	0,09332				Estadística	0,11956			
Valor P	0,04426				Valor P	0			
Rango	1				Rango	1			
α	0,2	0,1	0,05	0,01	α	0,2	0,1	0,05	0,01
Valor crítico	0,07318	0,08341	0,09261	0,10179	Valor crítico	0,01518	0,0173	0,01921	0,02134
Rechazar?	Sí	Sí	Sí	Sí	Rechazar?	Sí	Sí	Sí	Sí
Parámetros que definen la función					Parámetros que definen la función				
Log-Gamma	$\alpha=2,1345$ $\beta=1,2837$				Log-Pearson 3	$\alpha=2,448$ $\beta=0,69083$ $\gamma=0,00000$			
UK113									
PST					PM10				
Mejor ajuste: Función Beta					Mejor ajuste: Log Pearson (3P)				
Función de probabilidad acumulada					Función de probabilidad acumulada				



Frechet [#15]					Log-Pearson 3 [#36]				
Kolmogorov-Smirnov					Kolmogorov-Smirnov				
Tamaño de la muestra	149				Tamaño de la muestra	2637			
Estadística	0,12039				Estadística	0,13411			
Valor P	0,02438				Valor P	0			
Rango	1				Rango	1			
α	0,2	0,1	0,05	0,01	α	0,2	0,1	0,05	0,01
Valor crítico	0,0879	0,10019	0,11125	0,12039	Valor crítico	0,0209	0,02382	0,02645	0,02958
Rechazar?	Sí	Sí	Sí	No	Rechazar?	Sí	Sí	Sí	Sí
Parámetros que definen la función					Parámetros que definen la función				
Frechet (3P)	$\alpha=0,14836$ $\beta=0,00287$ $\gamma=0,00000$				Log-Pearson 3	$\alpha=1,3743$ $\beta=1,1653$ $\gamma=0,00000$			

Fuente: Autora

Anexo 7. Información tramo vial ubicado en el departamento de Meta

(En medio magnético)

Anexo 7. Información valores experimentales

Inicialmente se propusieron dos vías para realizar el diseño de la metodología. Una de ellas correspondió a la vía ubicada en el departamento de Casanare tomada como punto base de estudio. La segunda vía corresponde al tramo vial ubicado en el municipio de Puerto Gaitán, departamento de Meta. La ubicación de ambas vías es presentada en la Tabla 1 e Ilustración 1.

Tabla 61. Coordenadas UTM de los puntos inicial y final para cada uno de los tramos viales

	Meta		Casanare	
	X (m)	Y(m)	X(m)	Y(m)
Punto Inicial	831547.00 E	429288.00 N	169268.00 E	560351.00 N
Punto Final	190567.00 E	415376.00 N	179885.00 E	553155.00 N

Fuente Autora

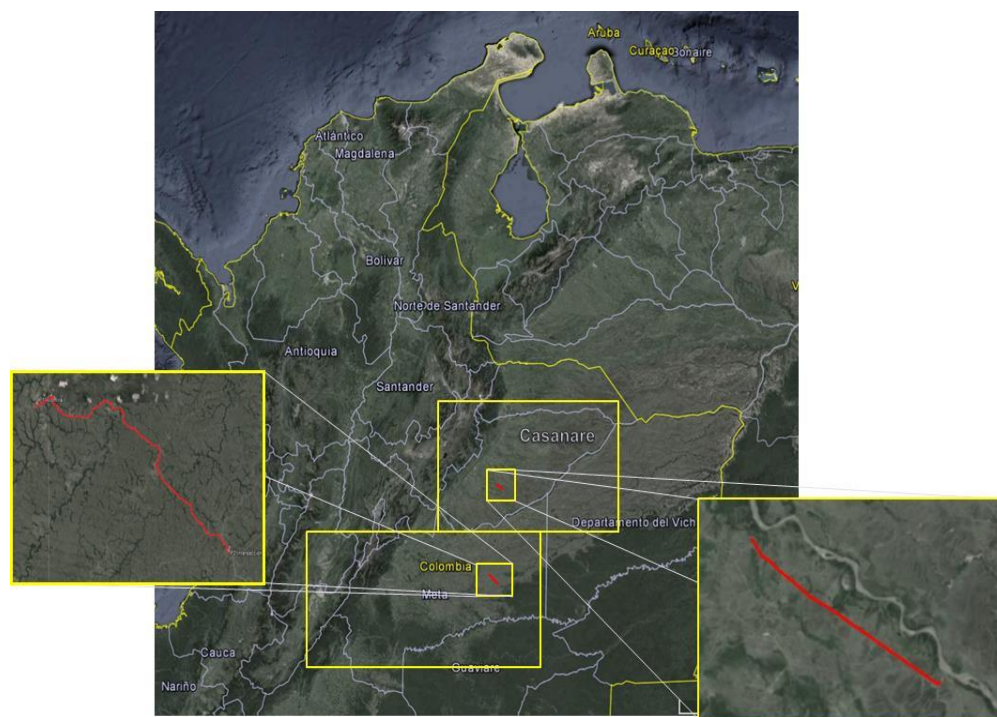


Ilustración 56 Ubicación tramos viales seleccionados. Departamentos de Meta y Casanare

Fuente Autora

Para ambos tramos viales se recopiló el mismo tipo de información. Sin embargo debido a que ambas vías contaban con condiciones similares solo se utilizó la vía de Casanare en la modelación. La información correspondiente al tramo vial del departamento de Meta es presentada en este anexo.

Para el estudio de cada uno de los tramos viales se ubicaron 4 estaciones de monitoreo, las tablas 2 y 3 presentan los equipos instalados en cada una de ellas junto con su ubicación. Las campañas

de medición fueron realizadas del 25 de Marzo al 5 de Abril de 2013 para el departamento de Meta y del 13 al 23 de Abril para el departamento de Casanare. El 2 de abril no se realizaron monitoreos en el tramo vial del departamento de Meta.

Tabla 62. Equipos de monitoreo, Puerto Gaitán- Meta

# Estación	Puerto Gaitán- Meta			
	Estación 1	Estación 2	Estación 3	Estación 4
Ubicación (UTM)	X=181,43 km Y=424,70 km	X=181,45 km Y=424,71 km	X=181,51 km Y=424,71 km	X=181,56 km Y=424,70 km
Ubicación (a partir del borde de la vía)	5 m Vientos arriba	5 m Vientos arriba	60 m Vientos abajo	125 m Vientos abajo
Equipo Hi- Vol VFC PM10	X	X	X	X
Equipo Hi- Vol VFC PST	X	X	X	X
Equipo Automático	X	X		
Estación Meteorológica		X	X	

Fuente (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

Tabla 63. Equipos de monitoreo, Quebrada Seca- Casanare

# Estación	Quebrada Seca- Casanare			
	Estación 1	Estación 2	Estación 3	Estación 4
Ubicación (UTM)	X=171,13 km Y=558,46 km	X=171,12 km Y=558,50 km	X=171,11 km Y=558,55 km	X=171,09 km Y=558,62 km
Ubicación (a partir del borde de la vía)	5 m Vientos arriba	5 m Vientos arriba	60 m Vientos abajo	125 m Vientos abajo
Equipo Hi- Vol VFC PM10	X	X	X	X
Equipo Hi- Vol VFC PST	X	X	X	X
Equipo Automático	X	X		
Estación Meteorológica		X	X	

Fuente (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

El registro de concentraciones diarias de PST y PM10 por equipos Hi-vol para los tramos evaluados se presentan en las tablas 4 a 7.

Tabla 64 Mediciones Equipos Hi-Vol, Quebrada Seca-Casanare. Concentraciones PST

Fecha	Estación 1. -5 metros vientos arriba	Estación 2. -5 metros vientos abajo	Estación 3. -60 metros vientos abajo	Estación 4. -120 metros vientos abajo
13/04/2013	561.38	252.97	112.58	41.55

Fecha	Estación 1. -5 metros vientos arriba	Estación 2. -5 metros vientos abajo	Estación 3. -60 metros vientos abajo	Estación 4. -120 metros vientos abajo
14/04/2013	48.06	42.32	27.1	27.7
15/04/2013	26.84	270	92.3	47.87
16/04/2013	276.1	553.23	156.14	71.78
17/04/2013	47.37	61.11	121.93	86.73
18/04/2013	190.14	78.67	33.72	22.9
19/04/2013	43.04	140.95	44.69	26.18
20/04/2013	92.69	309.74	138.53	74.52
21/04/2013	294.07	468.47	176.53	136.64
22/04/2013	36.05	842.17	352.5	157.16

Fuente (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

Tabla 65. Mediciones Equipos Hi-Vol, Quebrada Seca-Casanare. Concentraciones PM10

Fecha	Estación 1. -5 metros vientos arriba	Estación 2. -5 metros vientos abajo	Estación 3. -60 metros vientos abajo	Estación 4. -120 metros vientos abajo
13/04/2013	177.78	189.35	174.07	27.16
14/04/2013	9.6	12.08	11.38	8.79
15/04/2013	1.06	108.25	60.84	15.14
16/04/2013	84.78	274.32	103.27	34.1
17/04/2013	22.26	40.75	93.12	47.75
18/04/2013	43.36	47.05	36.77	14.34
19/04/2013	12.08	65.57	96.51	13.31
20/04/2013	37.24	146.18	82.37	36.25
21/04/2013	94.46	219.86	172.7	68.56
22/04/2013	18.03	375.14	205.82	70.39

Fuente (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

Tabla 66 Mediciones Equipos Hi-Vol, Puerto Gaitán Meta. Concentraciones PST

Fecha	Estación 1. -5 metros vientos arriba	Estación 2. -5 metros vientos abajo	Estación 3. -60 metros vientos abajo	Estación 4. -120 metros vientos abajo
25/03/2013	1840.72	1032.04	203.18	113.5
26/03/2013	1747.02	2152.2	1042.72	842.47
27/03/2013	2166.85	666.06	148.4	100.89
28/03/2013	1380.92	1434.89	631.06	489.45
29/03/2013	595.16	682.4	135.52	73.35
30/03/2013	1170.19	1113.27	200.22	106.11
31/03/2013	1730.63	2354.73	476.74	233.44

Fecha	Estación 1. -5 metros vientos arriba	Estación 2. -5 metros vientos abajo	Estación 3. -60 metros vientos abajo	Estación 4. -120 metros vientos abajo
01/04/2013	-	-	1117.42	797.55
03/04/2013	2017.03	749.92	156.85	116.83
04/04/2013	1174.06	979.38	252.4	175.56
05/04/2013	2392.71	443.4	-	-

Fuente (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

Tabla 67 Mediciones Equipos Hi-Vol, Puerto Gaitán -Meta Concentraciones PM10

Fecha	Estación 1. -5 metros vientos arriba	Estación 2. -5 metros vientos abajo	Estación 3. -60 metros vientos abajo	Estación 4. -120 metros vientos abajo
25/03/2013	744.44	446.04	91.8	56.25
26/03/2013	823.55	1076.74	608.04	437.27
27/03/2013	709.63	399.04	86.76	53.38
28/03/2013	481.1	514.35	257.17	212.54
29/03/2013	180.63	231.62	52.76	23.26
30/03/2013	385.11	394.94	89.5	46.65
31/03/2013	648.81	1085.99	230.93	120.55
01/04/2013	-	-	530.08	324.21
03/04/2013	681.87	359.79	89.09	65.81
04/04/2013	452.08	434.83	125.6	90.98
05/04/2013	825.67	242.79	-	-

Fuente (Huertas C, Huertas B, & Betancur, 2013)

Previamente al presente estudio, se evaluó la correlación entre concentraciones arrojadas por equipos automáticos y por equipos manuales. Los resultados obtenidos son presentados en la Ilustración 57, donde se observa que no hay relación lineal entre los valores medidos por equipos manuales Hi-Vol y por equipos Automáticos, razón por la cual se decidió trabajar con equipos Manuales ya que su rango de error es menor en comparación con los equipos automáticos.

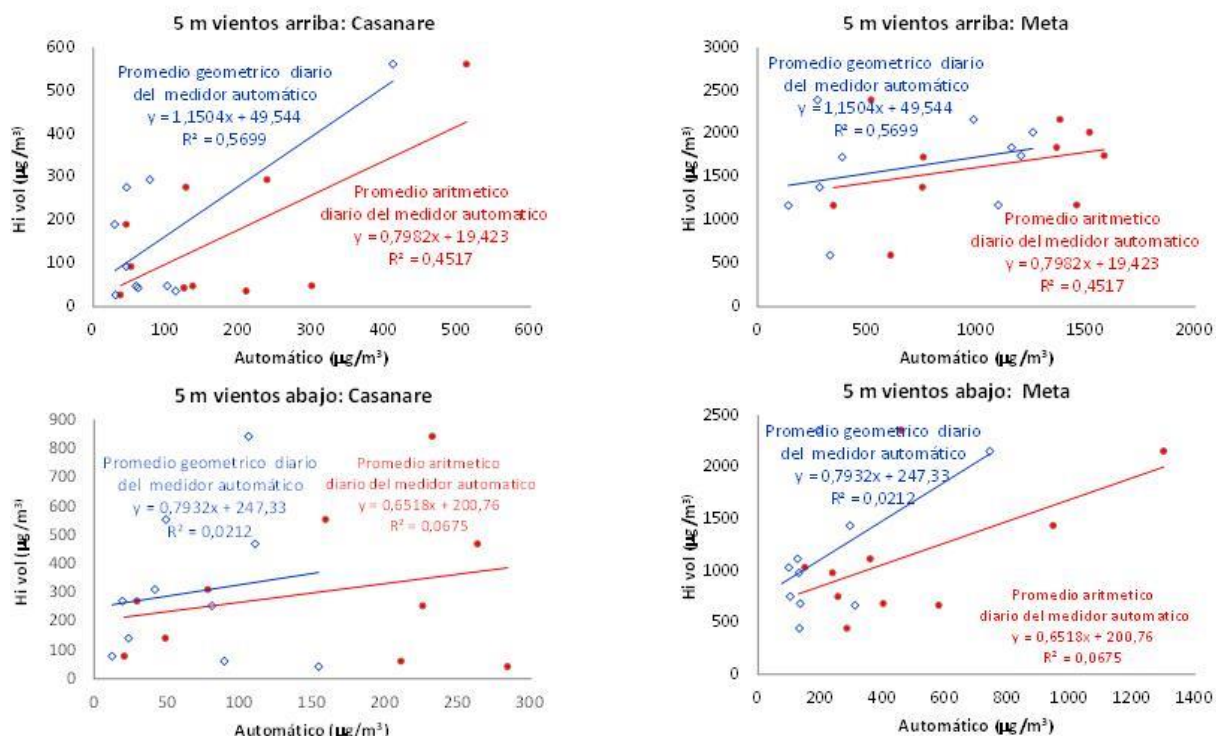


Ilustración 57. Equipos Manuales vs Equipos Automáticos, Meta y Casanare

Finalmente se calcularon promedios geométricos para concentraciones de PST y aritméticos para concentraciones de PM10 con base en las mediciones diarias. De igual forma se clasificaron las concentraciones de primeros máximos diarios tanto para PST como para PM10. Los resultados para los tramos viales de Casanare y Meta se presentan en la Tabla 8, a partir de estos resultados se realiza la calibración de la función propuesta.

Tabla 68 Concentraciones experimentales PM10 y PST Departamentos de Casanare y Meta

Dist. (m)	PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
	Promedio geométrico		Máximo diario		Promedio aritmético		Máximo diario	
	Casanare	Meta	Casanare	Meta	Casanare	Meta	Casanare	Meta
5	205,2	1021,0	842,2	2354,7	147,9	518,6	375,1	1086,0
60	96,4	320,0	352,5	1117,4	103,6	196,6	205,8	608,0
120	56,5	206,0	157,2	842,5	33,6	143,0	70,4	436,3

Fuente Autora

Anexo 8. Información complementaria de la aplicación del método propuesto

(En medio magnético)

Anexo 8. Información adicional aplicación del método propuesto

En el presente anexo se presenta de manera más detallada los resultados obtenidos para la aplicación del método.

La información de los aforos tenidos en cuenta para calcular las emisiones de ambos escenarios es presentada en las Tablas 1 y 2. Las emisiones fueron calculadas como ya se ha explicado en otras secciones a partir de los factores de emisión propuestos por la EPA para vías industriales no pavimentadas.

La emisión para el peor escenario fue calculado a partir del número de vehículos máximo por hora presentado para cada categoría. La emisión para el escenario extremo fue calculada a partir del promedio de diferentes aforos vehiculares provenientes de vías de alto flujo vehicular de cuatro ciudades de estados unidos y una de México.

Tabla 69 Número máximo de vehículos de cada categoría por hora tenidos en cuenta en el diseño del peor escenario

Categoría	N. vehículos
Motos	9
Automóviles	2
Camionetas	18
Camperos	5
Buses	15
Tanqueros	5
Carga de 2 ejes	18
carga de 3 ejes	110
Volquetas	7
Total	189

Fuente Autora

Tabla 70 Aforos vehiculares tenidos en cuenta para el diseño del escenario extremo

Lugar	N. vehículos/hora
Virginia	536.60
Indiana	123.34
North Carolina	275.38
Toluca	825
Montana	150.50
Promedio	382.16

Fuente autora

Las emisiones obtenidas a partir de dichos aforos tanto para Pm10 como para PST se presentan en la Tabla 3.

Tabla 71 Emisiones para Peor escenario y Escenario extremo

Escenario	Emisión (g/s m²)	
	PST	PM10
Extremo	0.0203	0.006
Peor	0.0647	0.0189

Fuente: Autores

Las distancias que delimitan el área de influencia y los valores estimados para el área de influencia por resuspensión de material particulado PST y PM10 en vías no pavimentadas son presentadas en las tablas 4 y 5.

Tabla 72 Distancias que delimitan el área de influencia

Contaminante/Periodo	Distancia peor escenario (m)		Distancia escenario extremo (m)	
	PST	PM10	PST	PM10
Anual	0.7	2	3.2	9.2
Diaria	0.5	1.35	1.85	5.5

Fuente autora

Tabla 73 Áreas de influencia para cada escenario y periodo evaluado

Contaminante/Periodo	Área peor escenario (km2)		Área escenario extremo (km2)	
	PST	PM10	PST	PM10
Anual	18.354	52.44	83.904	241.224
Diaria	13.11	35.397	48.507	144.21

Fuente autora

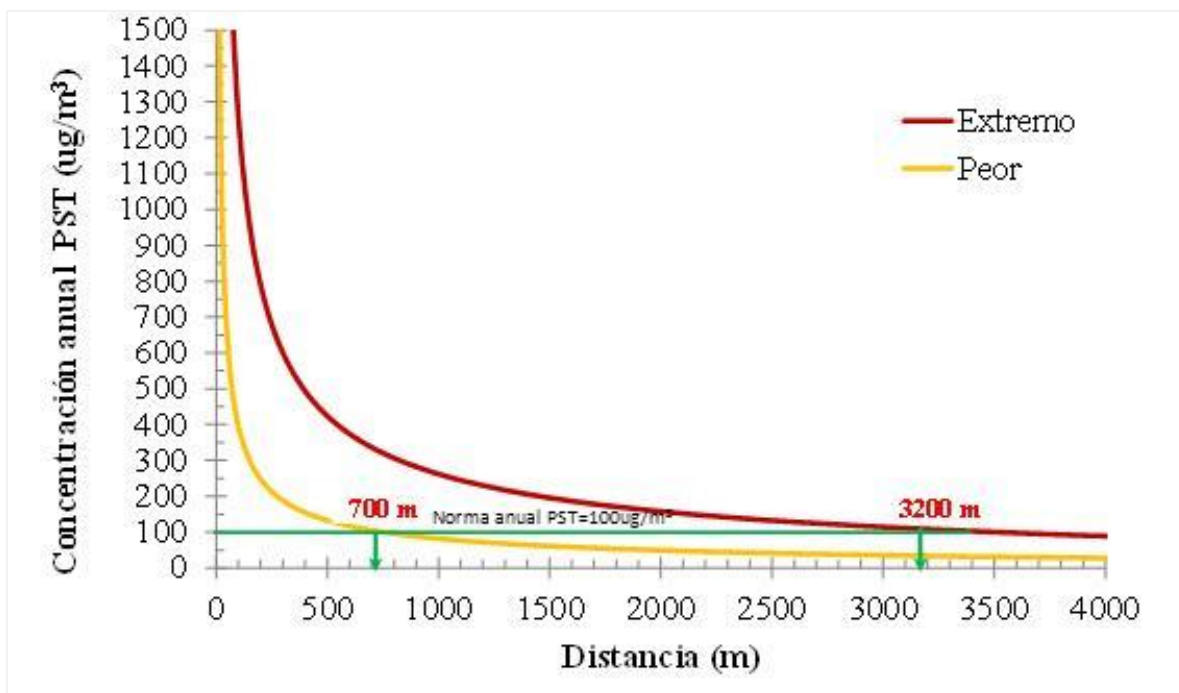


Ilustración 58 Distancia que delimita el área de influencia bajo escenarios Peor y Extremo para concentraciones anuales de PST en Casanare

Fuente autora

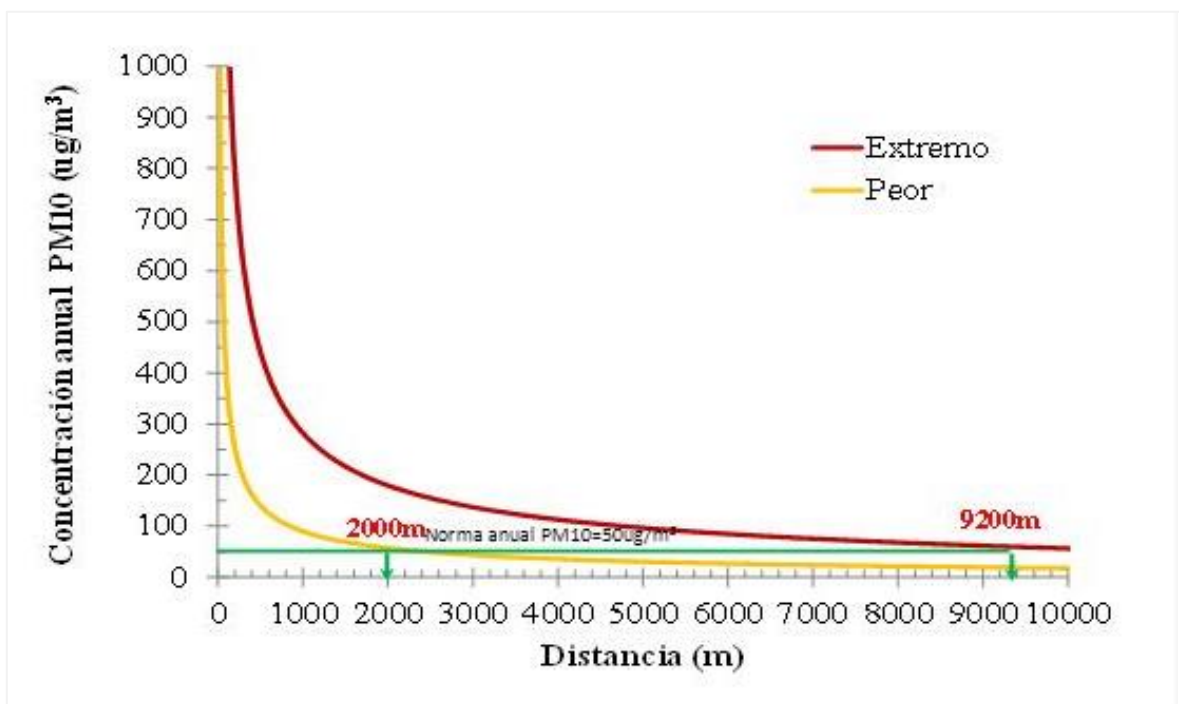


Ilustración 59 Distancia que delimita el área de influencia bajo escenario peor y extremo para concentraciones anuales de PM10 en Casanare.

Fuente autora

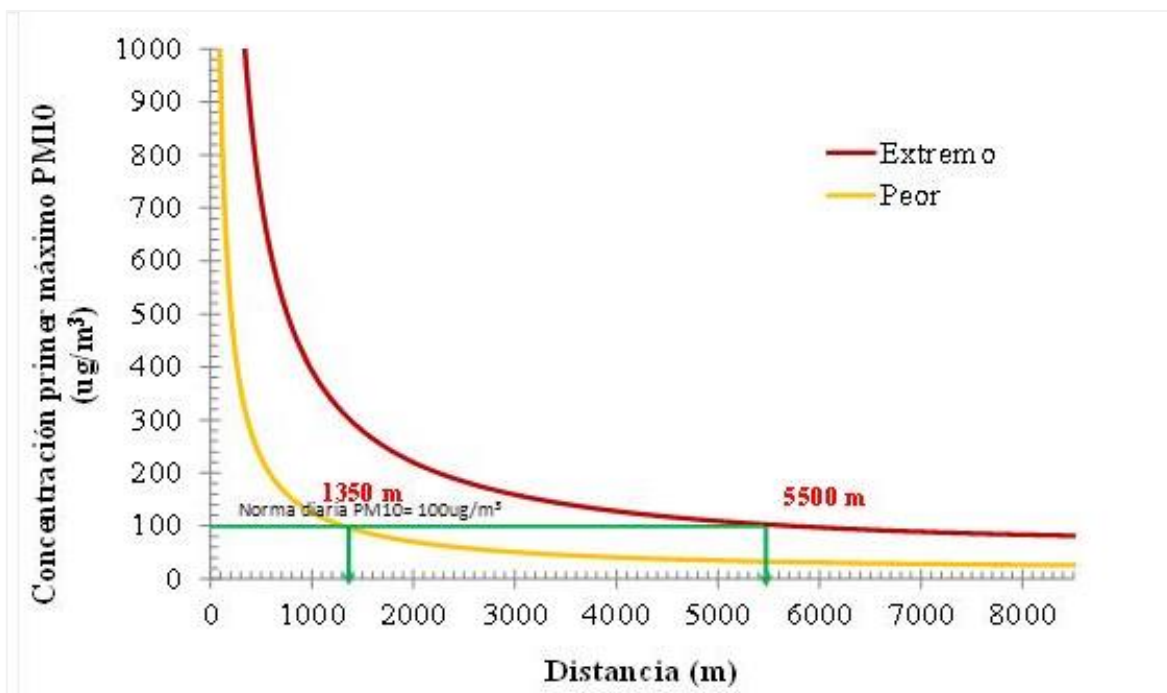


Ilustración 60 Distancia que delimita área de influencia bajo escenarios peor y extremo para concentraciones primeros máximos de PM10 en Casanare

Fuente autora

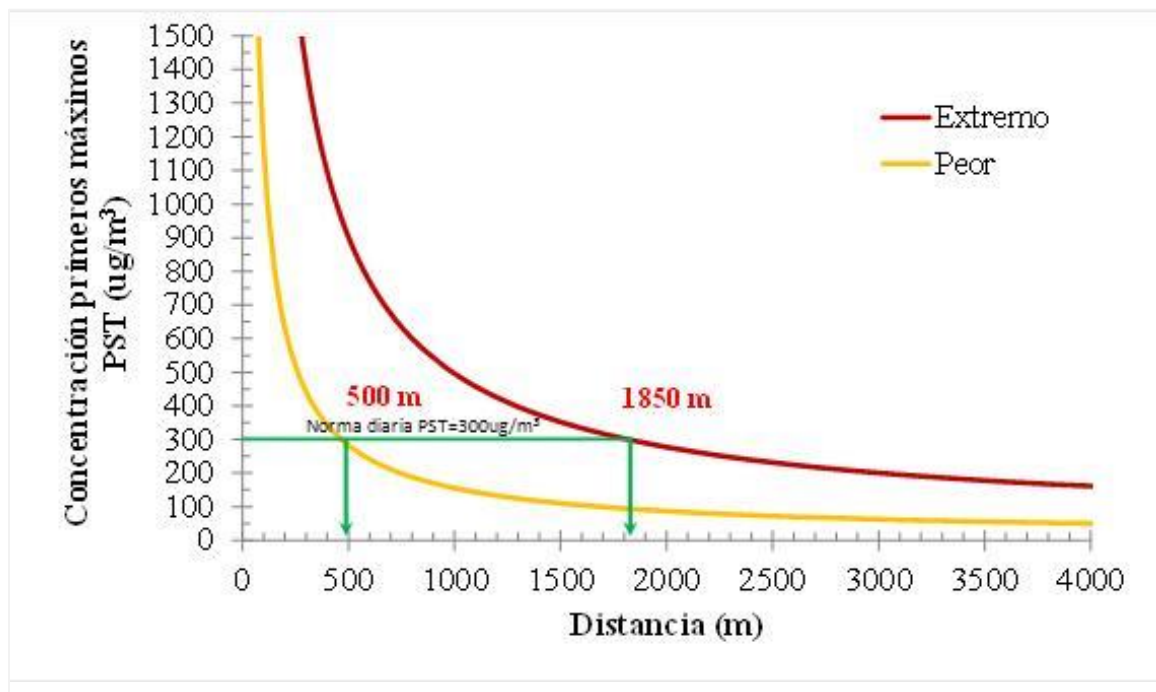


Ilustración 61 Distancia que delimita área de influencia bajo escenarios peor y extremo para concentraciones de primeros máximos de PST en Casanare.

Fuente autora

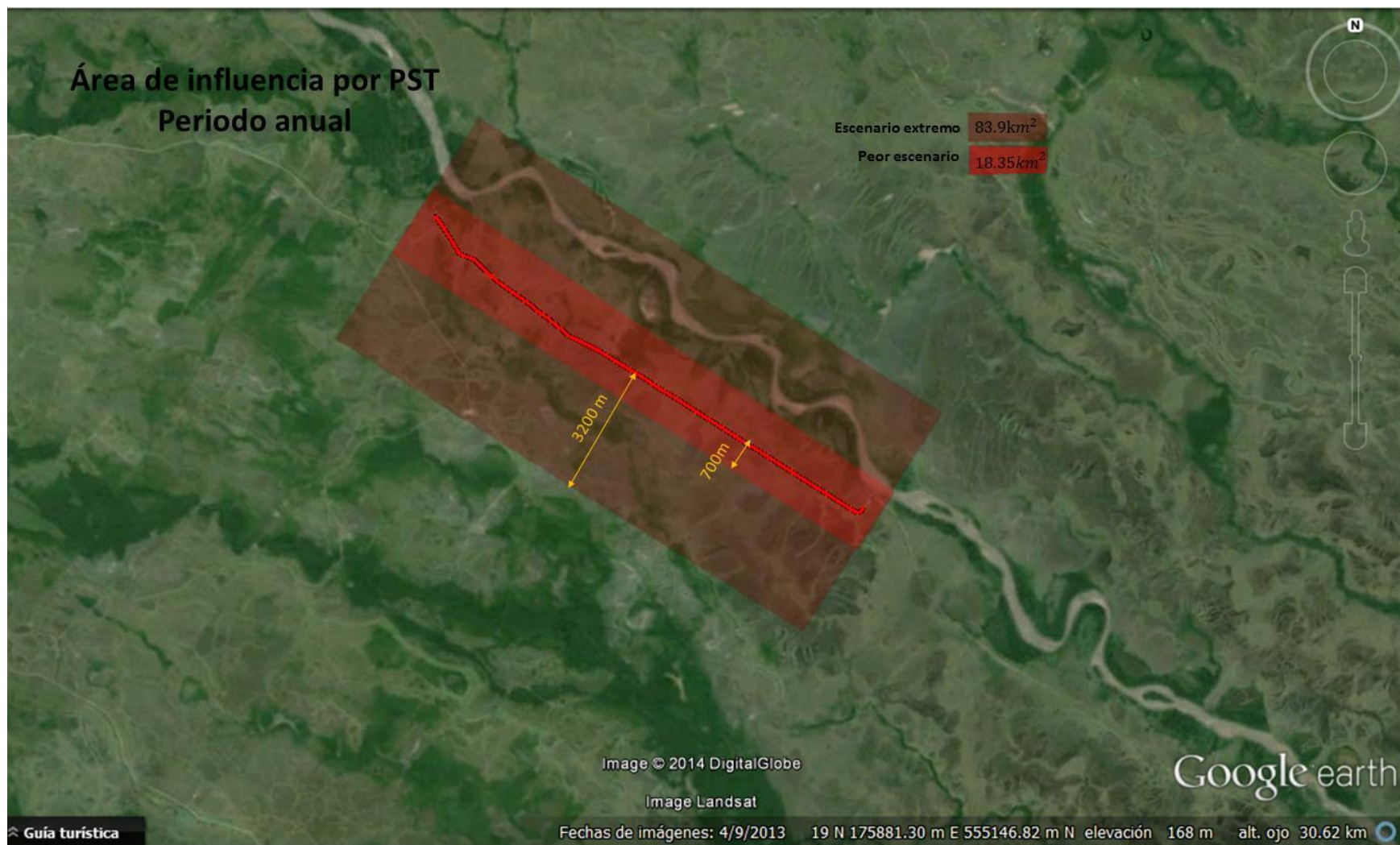


Ilustración 62 Área de influencia por PST para periodo anual
Fuente Autora

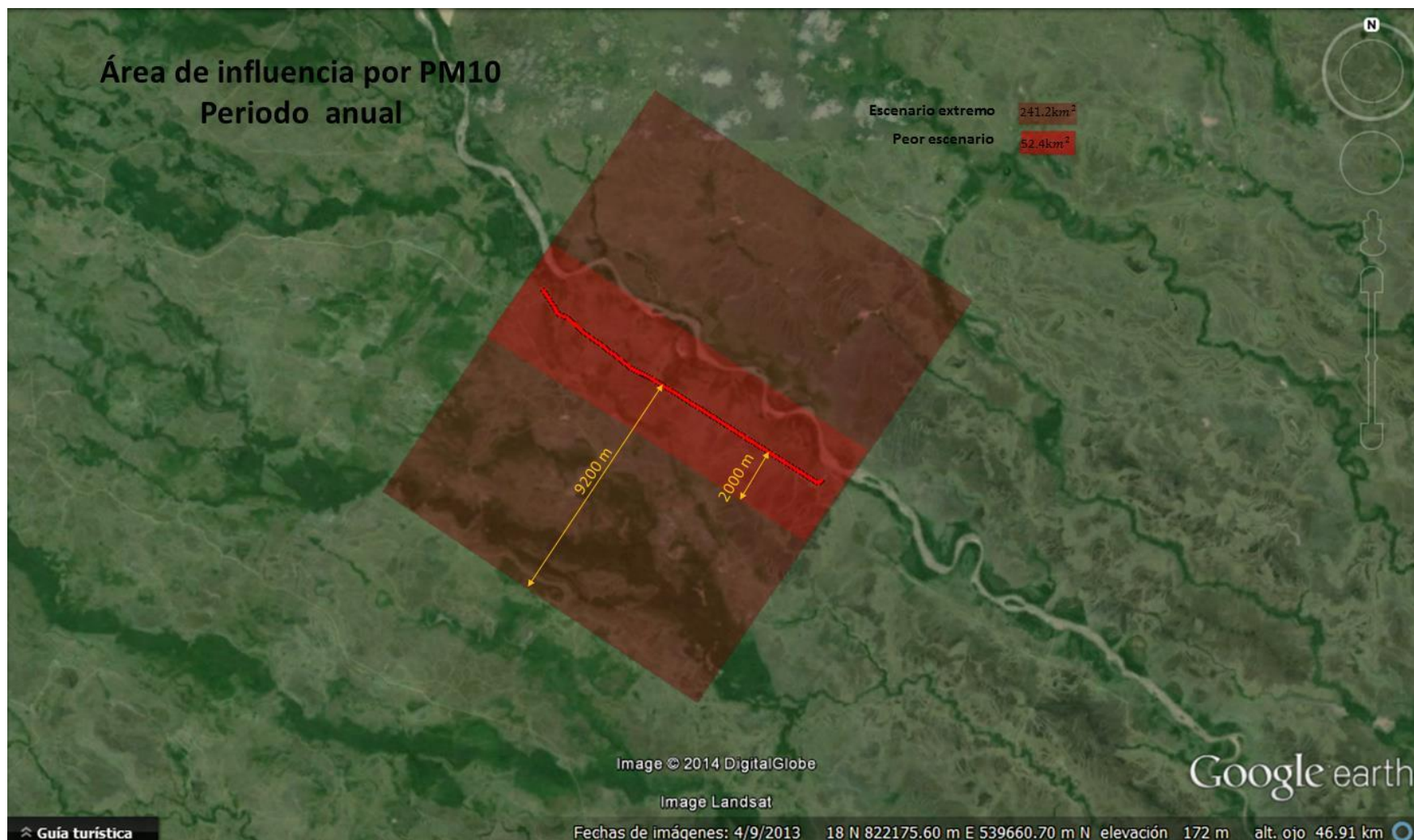


Ilustración 63 Área de influencia por PM10 para periodo anual
Fuente Autora

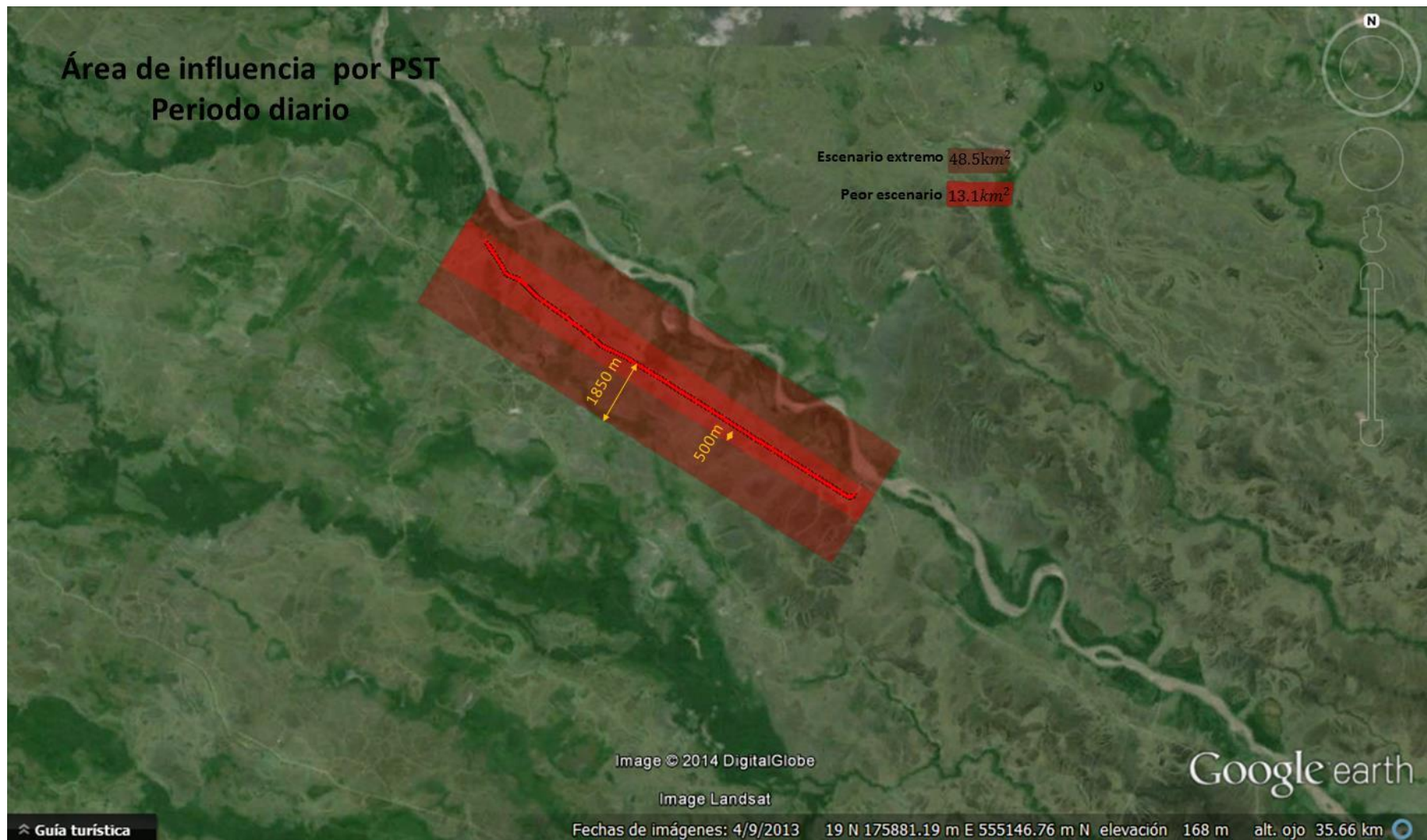


Ilustración 64 Área de influencia por PST para periodo diario
Fuente Autora

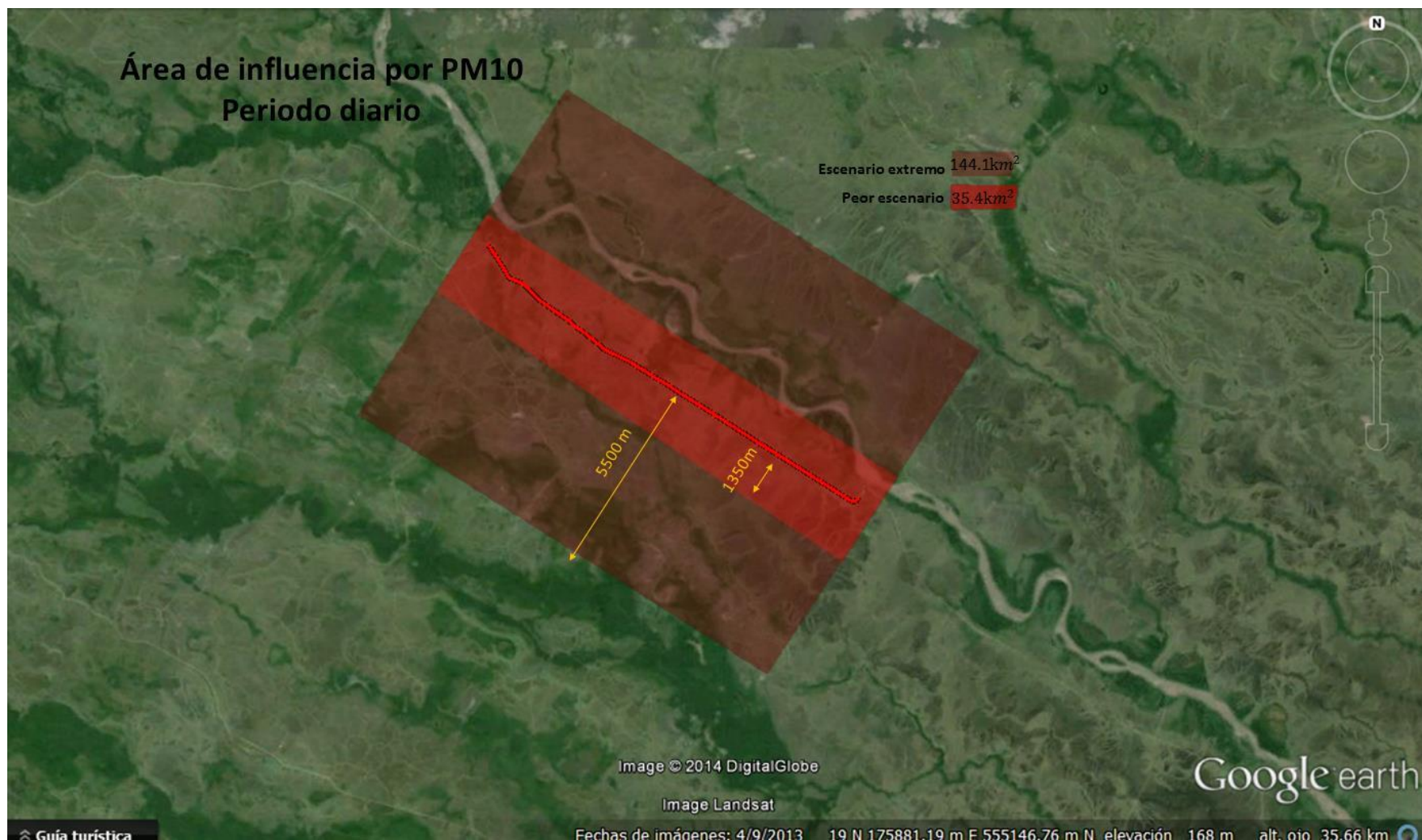


Ilustración 65 Área de influencia por PM10 para periodo diario
Fuente autora

