

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**MODELO PARA ESTIMAR IMPACTOS AMBIENTALES EN EL MOVIMIENTO DE  
TIERRAS EN OBRAS DE EDIFICACIONES**

Tesis para optar por el título de **Ingeniero Civil**, que presentan los bachilleres:

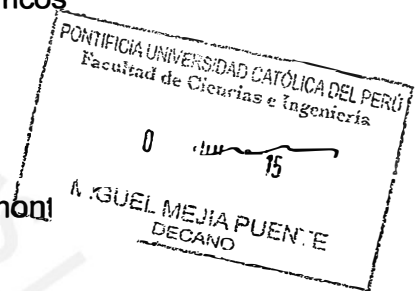
**DARIO SANTIAGO GUTIERREZ SILVA**  
**RAFU ESTANISLAO POMAR CASTROMONTE**

**ASESOR: Dr. Federico Alexis Dueñas Dávila**

Lima, Abril de 2016

## TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título	Modelo para estimar impactos ambientales en el movimiento de tierras en obras de edificaciones
Área	Medio Ambiente y Recursos Hídricos
Asesor	Federico Alexis Dueñas Dávila
Alumno	Dario Santiago Gutierrez Silva
Código	20092091.412
Alumno	Rafú Estanislao Pomar Castromont
Código	20092169.412
Tema N°	61
Fecha	21 de mayo de 2015



## DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Las actividades predominantes en los entornos y dentro de las ciudades generan aportes de sustancias hacia el aire atmosférico, dentro de estas sustancias hay elementos que no pueden ser percibidos por los sentidos humanos, y que además pueden tener una influencia nociva hacia la salud. Es por ello que la identificación, análisis, y medición resulta importante para la salud humana. (Vicente S., 2010)

El material particulado es una de los contaminantes de mayor importancias de la atmósfera de una ciudad, pueden encontrarse depositados en el suelo o estar suspendidos en el aire, esto debido a que su tamaño es del orden de los micrómetros. La movilidad es lo que caracteriza al material particulado como contaminante; en presencia de vientos, puede mantenerse en el aire durante días o semanas transportándose por diversos territorios; mientras que en la ausencia de vientos, su permanencia en el aire es de solo minutos u horas. (Vicente S., 2010). Este material se divide en dos grupos en función de su tamaño: la fracción gruesa conocida como PM10 cuyo tamaño está entre 2.5 y 10 micrómetros, y la fracción fina PM2.5, cuyo tamaño es menor de 2.5 micrómetros.

Existen diversos factores, en su mayoría complejos, que afectan el transporte y dispersión de los contaminantes del aire. A un nivel local, los principales factores que afectan son el viento y la estabilidad; mientras que a un nivel global, son las variaciones del clima. (Jorge I, 2004). Por ejemplo, el viento es generado por las diferencias de presión atmosférica, las cuales hacen que el aire se mueva de las zonas o áreas de alta presión hacia las de baja presión. Las zonas de alta presión están constituidas por el aire frío, el cual es más pesado que el aire caliente que constituye las zonas de baja presión. Por lo anterior, se puede concluir que el viento se mueve de una zona fría hacia una caliente.




La concentración de contaminantes en una determinada área es afectada, en gran medida, por la velocidad del viento. Es así que, la concentración de contaminantes o sustancias en el aire será menor mientras mayor sea la velocidad del viento, el cual puede diluir y dispersar rápidamente los contaminantes en las zonas de alrededor. (CEPIS, 2005)

La Estabilidad Atmosférica, a diferencia del viento que presenta un movimiento horizontal, se caracteriza por un movimiento vertical, el cual es generado por condiciones atmosféricas inestables. Por lo general, en el día, el aire cercano a la superficie de la tierra es más caliente debido a la energía solar absorbida, luego como es más liviano, sube de la superficie y se mezcla con el aire más frío y pesado. Este constante movimiento vertical del aire genera condiciones inestables y de paso dispersa el aire contaminado. (Jorge I, 2004)

La Precipitación en el caso de contaminantes en el aire, la precipitación es muy beneficiosa ya que lava las partículas suspendidas, y por otra parte, minimiza las partículas provenientes de las actividades como la construcción y ciertos procesos industriales. Por lo general, hay más probabilidades de que existan altas concentraciones de sustancias o contaminantes en ciudades que se encuentran rodeadas de cadenas montañosas o valles, o una topografía compleja. (CEPIS, 2005).

## ANTECEDENTES

El movimiento de tierras en obras de civiles es una acción que genera impactos ambientales al lugar o territorio donde es realizado. El conocimiento de este impacto, si es favorable o desfavorable, es una total incertidumbre, no se ha cuantificado y no se ha desarrollado estadísticas que permitan desarrollar metodologías, para luego obtener instrumentos de medición, y de esta forma con toda esa información desarrollar completamente un EIA.

A la fecha se tienen tres antecedentes de análisis y medición de material particulado como contaminante. El primero consiste en el análisis de las carreteras sin pavimentar, las cuales constituyen una fuente de contaminación y de emisión de material particulado; al final, se obtiene un modelo que estima la emisión que se producirá en función de determinados factores. El segundo caso es el desarrollo de un modelo de emisiones de variable múltiple de emisiones, este modelo proviene del Volumen III - Técnicas Básicas de Estimación de Emisiones del Manual de Inventarios de Emisiones de México. Y por último, el tercero es el modelo que presenta el Departamento de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos.

Cabe señalar que en el medio nacional, no se dispone de modelos que predigan el factor de emisión de material particulado y por tanto hacen complejo definir su impacto ambiental en obras civiles.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto de investigación es desarrollar un modelo que permita proponer un método de estimación de un determinado factor de emisión para cada actividad de movimiento de materiales tomando en cuenta las características del medio en el que se desarrolla dicha actividad (tipo de material o suelo, velocidad del viento, temperatura y otros), y las características del tipo de operación por el cual se desarrolla la actividad.



Los objetivos específicos consisten en

- i) Encontrar o determinar las causalidades (relación entre una causa y su efecto) que se den entre la actividad de movimiento de tierras y los parámetros ambientales: a) El tipo de suelo o material, b) La humedad durante la actividad, c) Velocidad, d) dirección del viento, y e) Las precipitaciones
- ii) Proponer un modelo explicativo y predictivo de las emisiones de material particulado en términos de diferentes parámetros ambientales.
- iii) Validar el modelo explicativo y predictivo de las emisiones de material particulado en términos de diferentes parámetros ambientales.

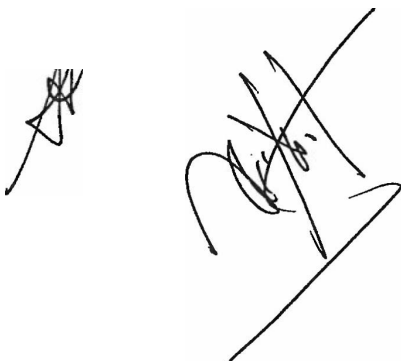
### PLAN DE TRABAJO

Para desarrollar el estudio propuesto, el alumno deberá cumplir con los siguientes aspectos:

- a. Revisión de la literatura especializada en lo referente a métodos de estimación de factores de emisión en obras civiles.
- b. Seleccionar los diferentes estudios de caso, definiendo la complejidad del mismo, y analizando su complejidad y variabilidad en cuanto a factores de emisión de material particulado (Al menos tres casos).
- c. Descripción ambiental de las operaciones de movimiento de tierras, proponiendo su clasificación e incidencia en cuanto a factores de emisión de material particulado.
- d. Diseñar y estudiar diferentes modelos explicativos y predictivos de las emisiones de material particulado en términos de diferentes parámetros ambientales.
- e. Validar y evaluar el mejor modelo explicativo y predictivo de las emisiones de material particulado en términos de diferentes parámetros ambientales.
- f. Análisis e interpretación de resultados.
- g. Redacción del documento final de la tesis, en la cual se integre todos los aspectos que fueron evaluados y de los que obtuvo resultados, considerando los comentarios y críticas señalados en la etapa de validación.

Se establecerá un rol de reuniones con los alumnos, que tendrá una frecuencia semanal a fin de garantizar el avance del estudio, sus conclusiones, el estado del arte, y la adecuada interpretación de los resultados obtenidos. La revisión del documento final de la tesis tendrá dos etapas: Un primer borrador que considera los acápites de definición del problema, justificación, objetivos, estado del arte y metodología. Un segundo borrado se centrará en el desarrollo de los resultados y su interpretación, en esta etapa también se evaluará la versión integral del documento.

Nota: máximo 100 páginas.





## RESUMEN

Esta tesis presenta los efectos producidos en la calidad del aire por el desarrollo de la actividad de movimiento de tierras en obras de edificaciones. Para ello, se postula dos modelos matemáticos que permiten calcular los factores de emisión producidos a través de dos parámetros,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Se escogió tres casos reales, en donde se obtuvo los parámetros ambientales que permitan postular el modelo, así como también validarlo con datos reales en obras con ejecución de movimiento de tierras.

La importancia de este tema de investigación radica en que se hace necesario estudiar y desarrollar este modelo matemático que permita estimar las emisiones de material particulado, lo cual contribuye un aporte para un mejor estudio o evaluación de impacto ambiental (EIA), porque por cada nuevo proyecto de construcción que se genere, es necesario analizar y evaluar su sostenibilidad ambiental, tal es el caso de la calidad del aire. Además, se elaboraron índices de calidad del aire para la estimación de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , que nos puedan mostrar el daño que se produce o existe en el ambiente.

Mediante análisis estadísticos, como el análisis de regresión, se determinó las causalidades que se dan entre las emisiones de material particulado durante la actividad de movimiento de tierras y los parámetros ambientales: Porcentaje de finos del suelo, humedad del suelo, humedad relativa, precipitación y velocidad del viento; siendo el primer parámetro el que incide en mayor cantidad y en directa proporción y el contenido de humedad el que menos influye.

El resultado obtenido es que la contaminación del aire existe en las obras de edificaciones de esta ciudad. Para los proyectos seleccionados, la cantidad de material particulado emitido obtiene la categoría de moderado según los estándares nacionales de calidad de aire planteadas por el SENAMHI.

Palabras clave: Material particulado, factor de emisión, parámetros ambientales, Estudio de Impacto Ambiental, análisis de regresión, función de transformación, porcentaje de finos, humedad del suelo, precipitación, velocidad del viento, humedad relativa.

## ABSTRACT

This thesis presents the effects on air quality, produced by the development of earth moving activities in construction sites. For this purpose, two mathematical models, which allow the calculation of emission factors produced by two parameters - PM10 and PM2.5- are postulated. Three real cases were chosen, obtaining environmental parameters that allow to postulate as well as to validate the model with real data from constructions involving earth moving work.

The importance of this research lies in the need to study and develop this mathematical model to estimate the emissions of particulate matter, which contribute to a better environmental impact assessment (EIA) or study, since for every new construction project that is generated, it is necessary to analyze and evaluate the environmental sustainability, such as in the case of air quality. In addition to this, air quality indexes for the estimation of particulate matter PM10 and PM2.5 were developed. These can show us the damage that occurs or exists in the environment.

Through statistical analysis, such as regression analysis, it was determined the existent causalities between emissions of particulate matter during earth moving activities, and environmental parameters, such as percentage of fine soil, soil moisture, relative humidity, precipitation and wind speed; being the first parameter the one with the biggest and most direct incidence, and the moisture content the one with the least influence.

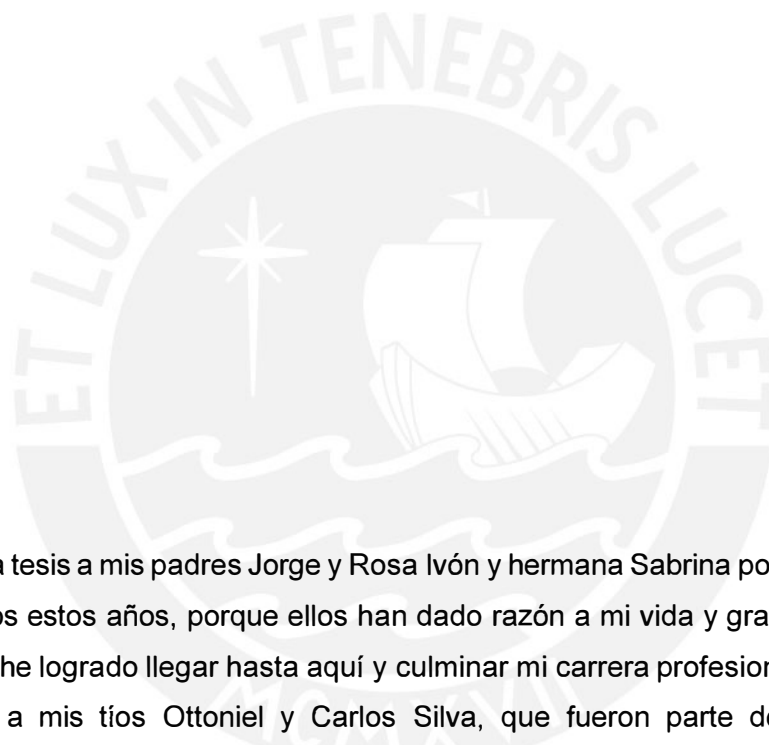
The obtained result shows that there is, indeed, air pollution in the construction sites of this city. In the selected projects, the amount of particulate matter emitted has obtained the category of moderate, according to the national air quality standards raised by the SENAMHI.

Keywords: particulate matter emission factor, environmental parameters, Environmental Impact Study, regression analysis, transformation function, percentage of fines, soil moisture, precipitation, wind speed, relative humidity.

**Dedicatorias:**

“A mis padres Armando y Olga por todo su esfuerzo y sacrificio, por el apoyo incondicional durante toda la trayectoria universitaria y por su empeño por darme un futuro mejor”

*Rafu Estanislao Pomar Castromonte*



“Quiero dedicar esta tesis a mis padres Jorge y Rosa Ivón y hermana Sabrina por su amor, trabajo y sacrificios en todos estos años, porque ellos han dado razón a mi vida y gracias a ellos y sus palabras de aliento he logrado llegar hasta aquí y culminar mi carrera profesional. Por otro lado, quiero dedicársela a mis tíos Ottoniel y Carlos Silva, que fueron parte de mi crecimiento profesional desde muy pequeño y me ayudaron a forjar mis fortalezas y carácter.”

*Darío Santiago Gutierrez Silva*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	Descripción del Estudio.....	1
1.1	Alcance.....	1
1.2	Justificación.....	1
1.3	Objetivos.....	2
2.	Marco Teórico.....	2
2.1	El Aire.....	2
2.1.1	Propiedades Físicas del Aire.....	2
2.2	El Material Particulado como Contaminante del Aire.....	3
2.2.1	Material Particulado – PM <sub>10</sub> .....	4
2.2.2	Material Particulado – PM <sub>2.5</sub> .....	4
2.3	Transporte y Dispersión de Contaminantes.....	6
2.3.1	El Viento.....	6
2.3.2	La Estabilidad Atmosférica.....	7
2.3.3	La Precipitación.....	7
2.3.4	La Topografía.....	7
2.3.5	El Suelo.....	7
2.4	Índices de Calidad del Aire.....	8
2.4.1	Características y Objetivos de los Índices de Calidad del Aire (ICA).....	8
2.4.2	El Índice de Calidad del Aire (ICA) como herramienta.....	9
2.5	Función de Transformación.....	11
2.5.1	Modelos que miden Impactos Ambientales en el Aire.....	12
2.6	Movimiento de Tierras.....	14
2.6.1	Tipos de Movimiento de Tierras.....	14
2.6.2	Proceso Constructivo.....	16
2.6.3	Descripción ambiental de las operaciones de Movimiento de Tierras.....	16
2.7	Modelos Teóricos de Estimación de Emisiones.....	17
2.7.1	Carreteras no pavimentadas.....	18
2.7.2	Manejo de agregados y depósito de materiales.....	20
3.	Metodología.....	21
3.1	Variables que influyen en la emisión de material particulado.....	21
3.1.1	Porcentaje de finos.....	21
3.1.2	Contenido de humedad.....	22
3.1.3	Precipitación.....	22



3.1.4	Velocidad del viento.....	23
3.1.5	Humedad relativa.....	23
3.2	Limitaciones del estudio.....	24
3.3	Selección de casos.....	24
3.3.1	Edificio Génova.....	25
3.3.2	Edificio Flat Arequipa.....	27
3.3.3	Proyecto Costanera.....	28
3.3.4	Procesamiento de datos.....	29
3.4	Análisis de datos y obtención del modelo.....	31
3.4.1	Análisis Exploratorio de Datos (AED).....	31
3.4.2	Regresión y construcción del modelo.....	33
3.5	Validación del modelo.....	36
4.	Resultados.....	37
4.1	Modelo de estimación del factor de emisión de material particulado PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> .....	37
4.1.1	Comportamiento de los parámetros del modelo.....	37
4.1.2	Análisis de regresión del modelo.....	44
4.2	Validación del modelo.....	52
4.2.1	Diferencia de medias.....	52
4.2.2	Comparación entre el modelo propuesto y la medición directa.....	54
4.2.3	Función de Transformación.....	65
5.	Discusión de resultados.....	66
5.1	Variables que inciden en la emisión de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> .....	66
5.2	Diferencia y nivel de error del modelo propuesto y validación del modelo.....	74
6.	Conclusiones y recomendaciones.....	78
7.	Referencias bibliográficas.....	81
8.	Anexos.....	

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Material particulado $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ .....	4
Figura 2 – CA del aire en función del contenido de monóxido de carbono. ....	12
Figura 3 – CA del aire en función del nivel de óxidos de azufre. ....	13
Figura 4 – CA del aire en función del nivel de hidrocarburos. ....	13
Figura 5 – CA del aire en función de la presencia de partículas en suspensión. ....	14
Figura 6 – Tipos de movimiento de tierra. ....	15
Figura 7 – Ubicación del proyecto génova. ....	25
Figura 8 – Proyecto génova. ....	25
Figura 9 – Ubicación del equipo de medición. ....	26
Figura 10 – Ubicación del proyecto flat arequipa. ....	27
Figura 11 – Proyecto flat arequipa. ....	27
Figura 12 – Excavación del material y ubicación del equipo de medición. ....	28
Figura 13 – Ubicación en el mapa de puntos de medición. ....	29
Figura 14 – Datos a recolectar del reporte de medición. ....	30
Figura 15 – Sensor de medición de calidad del aire EVM-7. ....	30
Figura 16 – Histograma de porcentaje de finos. ....	40
Figura 17 – Histograma de contenido de humedad. ....	40
Figura 18 – Histograma de precipitación. ....	41
Figura 19 – Histograma de velocidad del viento. ....	41
Figura 20 – Histograma de la humedad relativa. ....	42
Figura 21 – Histograma de mat. particulado 10 mic. ....	43
Figura 22 – Histograma de mat. particulado 2,5 mic. ....	43
Figura 23 – Histograma de la regresión de residuo tipificado ( $PM_{10}$ ) .....	47
Figura 24 – Gráfico p-p normal de regresión residuo tipificado ( $PM_{10}$ ).....	47
Figura 25 – Histograma de la regresión de residuo tipificado ( $PM_{2.5}$ ) .....	51
Figura 26 – Gráfico p-p normal de regresión residuo tipificado ( $PM_{2.5}$ ) .....	51
Figura 27 – Excavación y depósito del material al camión volquete. ....	54
Figura 28 – Plan general de datos edificio genova para $PM_{10}$ .....	55
Figura 29 – Gráfica de datos de registro edificio genova para $PM_{10}$ .....	56
Figura 30 – Plan general de datos edificio genova para $PM_{2.5}$ .....	57
Figura 31 – Gráfica de datos de registro edificio genova para $PM_{2.5}$ .....	58
Figura 32 – Depósito del material al recipiente metálico y al camión volquete .....	59
Figura 33 – Plan general de datos edificio flat arequipa para $PM_{10}$ .....	60
Figura 34 – Gráfica de datos de registro edificio flat arequipa para $PM_{10}$ .....	61
Figura 35 – Plan general de datos edificio flat arequipa para $PM_{2.5}$ .....	62
Figura 36 – Gráfica de datos de registro edificio flat arequipa para $PM_{2.5}$ .....	63
Figura 37 – Función de transformación para $PM_{10}$ .....	65
Figura 38 – Función de transformación para $PM_{2.5}$ .....	65
Figura 39 – Relación entre porcentaje de finos y $PM_{10}$ .....	66
Figura 40 – Relación entre humedad del suelo y $PM_{10}$ .....	67
Figura 41 – Relación entre precipitación y $PM_{10}$ .....	67
Figura 42 – Relación entre velocidad del viento y $PM_{10}$ .....	68
Figura 43 – Relación entre humedad relativa y $PM_{10}$ .....	69
Figura 44 – Relación entre porcentaje de finos y $PM_{2.5}$ .....	69
Figura 45 – Relación entre humedad del suelo y $PM_{2.5}$ .....	70
Figura 46 – Relación entre precipitación y $PM_{2.5}$ .....	71
Figura 47 – Relación entre velocidad del viento y $PM_{2.5}$ .....	71
Figura 48 – Relación entre humedad relativa y $PM_{2.5}$ .....	72
Figura 49 – Comparación de estimación de $PM_{10}$ entre el modelo propuesto y la medición directa ....	75
Figura 50 – Comparación de estimación de $PM_{2.5}$ entre el modelo propuesto y la medición directa....	76

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Valores límites de concentración establecidos por el Reglamento.....	5
Tabla 2 - Valores límites de concentración establecidos por el Reglamento para el $PM_{2.5}$ .....	6
Tabla 3 – Clasificación de la Estabilidad Atmosférica propuesta por Pasquill.....	7
Tabla 4 - Índice de Calidad del Aire.....	10
Tabla 5 - Clasificación de los estados de calidad del aire.....	10
Tabla 6 - Impactos directos de las operaciones de movimiento de tierras.....	17
Tabla 7 - Ubicación de los puntos de medición.....	29
Tabla 8 - Medidas descriptivas y representaciones gráficas en función de la escala de medida.....	32
Tabla 9 - Clasificación de $R^2$ .....	35
Tabla 10 – Matriz de parámetros ambientales y factores de emisión medidos en campo.....	38
Tabla 11 – Estadísticos descriptivos de cada variable.....	39
Tabla 12 – Variables introducidas ( $PM_{10}$ ).....	44
Tabla 13 – Resumen del modelo ( $PM_{10}$ ).....	44
Tabla 14 – Resumen del análisis de la varianza ( $PM_{10}$ ).....	45
Tabla 15 – Constante y coeficientes de las variables explicativas ( $PM_{10}$ ).....	45
Tabla 16 – Resumen de constante y coeficientes de las variables ( $PM_{10}$ ).....	45
Tabla 17 – Estadísticos sobre los residuos ( $PM_{10}$ ).....	46
Tabla 18 – Variables introducidas ( $PM_{2.5}$ ).....	48
Tabla 19 – Resumen del modelo ( $PM_{2.5}$ ).....	48
Tabla 20 – Resumen del análisis de la varianza ( $PM_{2.5}$ ).....	49
Tabla 21 – Constante y coeficientes de las variables explicativas ( $PM_{2.5}$ ).....	49
Tabla 22 – Resumen de constante y coeficientes de las variables ( $PM_{2.5}$ ).....	49
Tabla 23 – Estadísticos sobre los residuos ( $PM_{2.5}$ ).....	50
Tabla 24 – Estadísticos de los grupos ( $PM_{10}$ ).....	52
Tabla 25 – Prueba de diferencia de medias de muestras independientes ( $PM_{10}$ ).....	52
Tabla 26 – Estadísticos de los grupos ( $PM_{2.5}$ ).....	53
Tabla 27 – Prueba de diferencia de medias de muestras independientes ( $PM_{2.5}$ ).....	53
Tabla 28 – Parámetros y FE de $PM_{10}$ .....	64
Tabla 29 – Parámetros y FE de $PM_{2.5}$ .....	64
Tabla 30 – Comparación entre medición directa y pronóstico del modelo ( $PM_{10}$ ).....	64
Tabla 31 – Comparación entre medición directa y pronóstico del modelo ( $PM_{2.5}$ ).....	64
Tabla 32 – Resumen de valores de coeficiente de determinación.....	73
Tabla 33 – Análisis residual y nivel de error del modelo respecto de las mediciones directas ( $PM_{10}$ )...	75
Tabla 34 – Análisis residual y nivel de error del modelo respecto de las mediciones directas ( $PM_{2.5}$ )..	76

## 1. Descripción del Estudio

### 1.1 Alcance

El proyecto consiste en determinar el impacto sobre el ambiente que produce la actividad de movimiento de tierras en obras de edificaciones. El impacto se determina a través del desarrollo de un modelo matemático que permita estimar el factor de emisión de material particulado suspendido en el aire debido a la actividad antes mencionada.

De otro lado, se valida el modelo estimado comparando los resultados con las mediciones directas que toman en cuenta principalmente el tipo de material que se puede encontrar en los proyectos de construcción; y las condiciones atmosféricas como temperatura, velocidad del viento, humedad, precipitaciones, entre otras.

### 1.2 Justificación

El sector de la industria de la construcción ha crecido a una tasa de aproximadamente 10% anual en los últimos años en nuestro país (Huerta, 2012) y, en base a las estimaciones de diversas consultoras, como Intéligo SAB, se estima un crecimiento de aproximadamente 4,4% para el año 2016 (Mendieta, 2015). El creciente aumento de los ingresos económicos de la población ha generado una mayor demanda de viviendas en el sector inmobiliario y obras de carácter público

El crecimiento de la construcción ha generado, en su proceso, múltiples impactos ambientales como las emisiones de gases, cambios en la topografía, generación de residuos, entre otros, esto debido a que esta industria requiere de un consumo de una cantidad importante de recursos naturales que va aumentando progresivamente con los años; y además, realiza una variedad de actividades generadoras de impactos.

Es por ello que se hace necesario estudiar y desarrollar un modelamiento matemático de estimación de emisiones de material particulado que contribuya un aporte para un mejor Estudio o Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), porque en los últimos años ha cobrado interés y es necesario para analizar y evaluar la sostenibilidad ambiental de cada proyecto de construcción que aporte al crecimiento económico.

El desarrollo implica un mejoramiento continuo de la calidad de vida del ser humano, este desarrollo está relacionado inequívocamente a la solución de los problemas ambientales, debido a que la degradación del medio ambiente pone en riesgo el propio desarrollo humano (Del Saz, 2008).



El aporte de este proyecto de investigación es aplicable a todas aquellas obras de edificaciones en donde se proyecte movimientos de tierras masivas y en donde se pueda obtener datos que puedan ser ingresados al modelo y así obtener el factor de emisión de las actividades de movimiento de tierras involucradas.

### 1.3 Objetivos

El objetivo principal es el desarrollar un modelo que permita la estimación del factor de emisión para la actividad de movimiento de materiales en obras de edificaciones, tomando en cuenta las características del medio donde se desarrolla dicha actividad (tipo de material o suelo, velocidad del viento, temperatura, entre otros).

Los objetivos específicos consisten en determinar las relaciones de causalidad que se den entre la actividad de movimiento de tierras y los siguientes parámetros:

- El tipo de suelo y la cantidad de finos
- Humedad del suelo
- Humedad del ambiente durante la actividad
- Velocidad del viento
- Precipitaciones

Hallar estas relaciones entre estos componentes contribuirá con el logro del objetivo principal de este proyecto.

## 2. Marco Teórico

### 2.1 El Aire

El aire es una mezcla de gases que constituye la atmósfera terrestre, la cual permanece alrededor de la Tierra debido a la acción de la fuerza de gravedad (Guanche, 2013). El aire está compuesto, en proporciones ligeramente variables, por las siguientes sustancias:

- Nitrógeno (78%)
- Oxígeno (21%)
- Vapor de agua (entre 0 a 7%)
- Otras sustancias: ozono, dióxido de carbono y algunos gases nobles (1%)

#### 2.1.1 Propiedades Físicas del Aire

Entre las propiedades físicas que posee el aire se encuentran la expansión, contracción y la fluidez. La expansión es el aumento de volumen de una masa de aire al reducirse la presión

ejercida por una determinada fuerza. Otra forma de aumentar el volumen del aire es introducir calor, esto produce que las moléculas comiencen a moverse a una alta velocidad y choquen unas con otras, lo que hace que se alejen rápidamente (Guanche, 2013).

La contracción consiste en la reducción del volumen de aire a causa de estar presionado por una fuerza; pero esto tiene un límite, después del cual el aire tiende a expandirse de nuevo. De otro lado, la fluidez consiste en el flujo de aire de un lugar de mayor concentración a menor concentración, esto ocurre en zonas en donde la presión atmosférica es alta, generalmente el aire que fluye es más frío y fluye hacia lugares en donde hay menor presión atmosférica, es decir, hacia donde el aire alcanza mayor temperatura.

## 2.2 El Material Particulado como Contaminante del Aire

Las actividades predominantes en los entornos y dentro de las ciudades generan aportes de sustancias hacia el aire atmosférico, dentro de estas sustancias hay elementos que no pueden ser percibidos por los sentidos humanos, y que además pueden tener una influencia nociva hacia la salud. Es por ello que la identificación, análisis, y medición de estas sustancias resulta importante para la salud humana (Silva, 2010).

El material particulado es un conjunto de partículas sólidas tales como el hollín, partículas de la agricultura, de las vías, y polvos resultantes de procesos productivos emitidos directamente al aire, que además, debido a su minúsculo tamaño y densidad, permanecen suspendidos (Conesa, 2009).

La movilidad es una de las características del material particulado como contaminante. En presencia de vientos, puede mantenerse en el aire durante días o semanas transportándose por diversos territorios; mientras que en ausencia de ellos, su permanencia en el aire es de solo minutos u horas (Silva, 2010).

Estas partículas presentan tamaño, forma y composición variada, es por ello que para su identificación, se dividen en dos grupos en función de su diámetro aerodinámico: la fracción gruesa conocida como  $PM_{10}$  cuyo tamaño está entre 2,5 y 10 micrómetros, y la fracción fina  $PM_{2,5}$ , cuyo tamaño es menor de 2,5 micrómetros, como se aprecia en la figura 01, ambas partículas cuentan con un tamaño microscópico a tal punto que solo son reconocidas a través de un microscopio.

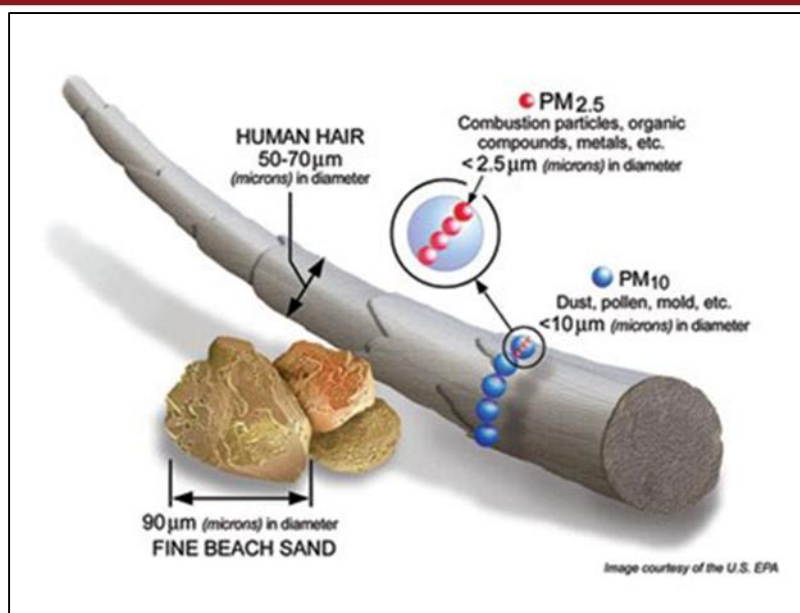


Figura 1 – Material Particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>

Fuente: Airnow, visible desde [http://www3.epa.gov/airnow/teachers/rb\\_particleactivity.pdf](http://www3.epa.gov/airnow/teachers/rb_particleactivity.pdf)

### 2.2.1 Material Particulado – PM<sub>10</sub>

Estas partículas son de gran interés debido a los efectos sobre la salud de las personas, pueden permanecer fácilmente en suspensión por un largo período de tiempo pudiendo ser inhaladas fácilmente, una vez dentro del interior del cuerpo, las partículas se adhieren a las paredes de las vías respiratorias y llegan a alojarse en las paredes pulmonares, lo cual ocasiona enfermedades del tipo respiratorio, sobretodo, si es que hay una constante exposición en zonas donde se presenta el material en suspensión (Swisscontact, 2006).

El PM<sub>10</sub> representa el grueso de partículas que pueden ingresar al sistema respiratorio, éstas se forman principalmente por medio de procesos mecánicos como las obras de construcción, el viento y la suspensión del polvo en las pistas y caminos no pavimentados (OMS, 2006).

### 2.2.2 Material Particulado – PM<sub>2.5</sub>

Este material de tamaño más fino resulta ser aún más peligroso porque es más fácil que penetre en los pulmones, tales como los tejidos pulmonares o alvéolos donde quedan alojados (Swisscontact, 2006). Por lo general, estas partículas provienen de fuentes de combustión como la quema de combustibles, incendios forestales, procesos industriales, entre otros.

El material particulado forma parte de las sustancias que generan mayor impacto en la salud de las personas (Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), Material Particulado (PM), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>), Ozono (O<sub>3</sub>), Plomo (Pb) y Sulfuro de Hidrógeno (H<sub>2</sub>S)), es

por ello que se generó una normativa, en donde se establecen los límites legales de concentración de dichas sustancias con el objetivo de reducir sus efectos nocivos.

En el Perú, se emitió el Decreto Supremo N° 074-2001-PCM, el cual estipula el Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire, donde se establece las concentraciones límites para cada sustancia contaminante según la siguiente tabla 1 (Presidencia del Consejo de Ministros, 2001).

Tabla 1 - Valores límites de concentración establecidos por el Reglamento.

CONTAMINANTES	PERIODO	FORMA DEL ESTANDAR		MÉTODO DE ANÁLISIS
		VALOR( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	FORMATO	
Dióxido de Azufre	Anual	80	Media aritmética anual	Fluorescencia UV (método automático)
	24 horas	365	NE más de 1 vez al año	
PM - 10	Anual	50	Media aritmética anual	Separación inercial/ filtración (Gravimetría)
	24 horas	150	NE más de 3 veces/año	
Monóxido de Carbono	8 horas	10000	Promedio móvil	Infrarrojo no dispersivo(NDIR) (Método automático)
	1 hora	30000	NE más de 1 vez/año	
Dióxido de Nitrógeno	Anual	100	Promedio aritmético anual	Quimiluminiscencia (Método automático)
	1 hora	200	NE más de 24 Veces/año	
Ozono	8 horas	120	NE más de 24 Veces/año	Fotometría UV (Método automático)
Plomo	Anual			Método para PM10 (Espectrofotometría de absorción atómica)
	Mensual	1.5	NE más de 4 Veces/año	
Sulfuro de Hidrógeno	24 horas			Fluorescencia UV (método automático)

Fuente: DS N° 074-2001-PC, 2001

En la tabla se puede observar que para el  $\text{PM}_{10}$ , el Reglamento establece que, para un período de un año, la concentración media no debe ser mayor a 50 microgramos por metro cúbico y que para un periodo de 24 horas, la concentración máxima debe ser de 150 microgramos por



metro cúbico y que además esta concentración máxima no debe aparecer más de tres veces al año.

Para el caso del  $PM_{2.5}$ , el Reglamento establece que para un periodo de un año, la concentración máxima debe ser de 15 microgramos por metro cúbico, y para un periodo de 24 horas, la concentración máxima debe ser de 65 microgramos por metro cúbico, tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2 - Valores límites de concentración establecidos por el Reglamento para el  $PM_{2.5}$ .

CONTAMINANTE	PERIODO	FORMA DEL ESTÁNDAR	MÉTODO DE ANÁLISIS
		VALOR ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	
PM – 2.5	Anual	15	Separación inercial / filtración (gravimetría)
	24 horas	65	

Fuente: DS N° 074-2001-PC, 2001

Como se puede ver de lo anterior, el material particulado es una de las sustancias consideradas como nocivas para la salud humana, a tal punto que se estableció un Reglamento que establece los límites de concentración de este material en determinados periodos de tiempo.

### 2.3 Transporte y Dispersión de Contaminantes

Existen diversos factores, en su mayoría complejos, que afectan el transporte y dispersión de los contaminantes del aire. A un nivel local, los principales factores que afectan son el viento y la estabilidad; mientras que a un nivel global, son las variaciones del clima (Inche, 2004).

#### 2.3.1 El Viento

El viento se genera por las diferencias de presión atmosférica, las cuales hacen que el aire se mueva de las zonas o áreas de alta presión hacia las de baja presión. Las zonas de alta presión están constituidas por aire frío, el cual es más pesado que el aire caliente que constituye las zonas de baja presión (CEPIS, 2005). Por lo anterior, se puede concluir que el viento se mueve de una zona fría hacia una caliente.

La concentración de contaminantes en un área es afectada, en gran medida, por la velocidad del viento. La concentración de contaminantes o sustancias en el aire será menor mientras mayor sea la velocidad del viento, el cual puede diluir y dispersar rápidamente los contaminantes en las zonas de alrededor y viceversa (CEPIS, 2005).

### 2.3.2 La Estabilidad Atmosférica

A diferencia del viento que se caracteriza por un movimiento horizontal, la estabilidad atmosférica se caracteriza por un movimiento vertical, el cual es generado por condiciones atmosféricas inestables. Por lo general, en el día, el aire cercano a la superficie de la tierra es más caliente debido a la energía solar absorbida, luego como es más liviano, sube de la superficie y se mezcla con el aire más frío y pesado (Inche, 2004).

Existen diferentes tipos de estabilidad atmosférica, las cuales fueron propuestas por Pasquill (1970) y se diferencian por la razón de variación de la temperatura con la altura (Salcedo, 2009), tal como se describe en la siguiente tabla 3.

Tabla 3 – Clasificación de la Estabilidad Atmosférica propuesta por Pasquill

Clase	Descripción	Variación de la temperatura con la altura
A	Muy inestable	Descendiente más de 5,6°C cada 1000 m,
B	Medianamente inestable	Descendiente entre de 5,1°C y 5,6°C cada 1000 m,
C	Ligeramente inestable	Descendiente entre de 4,5°C y 5°C cada 1000 m,
D	Neutra	Descendiente entre de 1,5°C y 4,4°C cada 1000 m,
E	Ligeramente estable	Aumenta de 1,5°C a 4,5°C cada 1000 m,
F	Medianamente estable	Aumenta entre 4,6°C y 12°C cada 1000 m,
G	Muy estable	Aumenta más de 12°C cada 1000 m,

Fuente: Salcedo, Abraham 2009

### 2.3.3 La Precipitación

En el caso de contaminantes en el aire, la precipitación es muy beneficiosa porque; de una parte, lava las partículas suspendidas, y de otra, minimiza la posibilidad de que otras partículas provenientes de las actividades como la construcción y ciertos procesos industriales terminen suspendiéndose en el aire (Inche, 2004).

### 2.3.4 La Topografía

Por lo general, hay más probabilidades que existan altas concentraciones de sustancias o contaminantes en ciudades que se encuentran rodeadas de cadenas montañosas o valles, o una topografía compleja (CEPIS, 2005).

### 2.3.5 El Suelo

El flujo y el transporte de contaminantes en el suelo es un proceso complejo, en donde intervienen distintos fenómenos físicos, químicos y biológicos. Los principales procesos de

flujo y transporte de contaminantes son: La difusión molecular, la dispersión y la advección (Braja, 2011).

La difusión molecular hace referencia a los contaminantes solutos, los cuales se pueden difundir de zonas de mayor a menor concentración; en el caso de la dispersión, los contaminantes, al mezclarse con el suelo, tienden a disolverse en sus componentes, ésta puede ser de dos tipos: mecánica o hidrodinámica. Por último, la advección se presenta cuando el contaminante adquiere movimiento por acción del medio líquido de transporte (agua), lo cual puede ser importante cuando el contaminante se encuentra en el subsuelo o aguas subterráneas.

## 2.4 Índices de Calidad del Aire

Un índice son herramientas numéricas de síntesis que proporcionan una idea de la situación ambiental de un entorno o territorio. Hacen posible la disposición de información amplia, compleja y completa; además, da imágenes sintéticas del problema ambiental que simplifican la formación de opinión en el momento de tomar decisiones públicas o privadas. En otras palabras, cubren con la necesidad de reducir una cantidad de información científica del ambiente a tan solo un número de parámetros apropiados para la toma de decisiones (Conesa, 2009).

Un índice de calidad del aire (ICA) se obtiene al aplicar una función de transformación a los datos obtenidos de mediciones de niveles de concentración de contaminantes en el aire. Por lo tanto, el índice es un número o valor que indica los efectos posibles de la contaminación atmosférica y va en un rango de 0 a 1, comportándose bajo las características de una probabilidad.

### 2.4.1 Características y Objetivos de los Índices de Calidad del Aire (ICA)

Entre las principales características de un ICA se encuentran los siguientes:

- Simplicidad: De carácter sintético, orientado hacia una comunicación con facilidad y de fácil interpretación incluso hacia usuarios no cualificados.
- Comprensibilidad: Simple y claro, con un significado prácticamente obvio y de fácil comprensión por no especialistas.
- Representatividad: La información contenida debe ser representativa de la condición del todo y tener un significado espacial claro.
- Validez científica: Debe poseer base científica y sus atributos y significados deben estar bien sustentados.

- Relevancia: La información proporcionada debe ser de relevancia con tal de determinar objetivos y metas.
- Cuantificación: Dentro de lo posible, debe tener la posibilidad de ser medido, al menos de manera cualitativa
- Cobertura geográfica: Aplicable a nivel nacional, regional, local y puntual.
- Comparabilidad: Debe ser presentado de tal forma que permita comparaciones con otros valores.

Los objetivos que debe seguir son:

- En casos de contaminación atmosférica, ser de utilidad en el sentido de que su fácil comprensión permita que el público o la población comprenda las estrategias de control y las decisiones tomadas.
- Servir de apoyo a un sistema sencillo de evaluación y predicciones de contaminación de una determinada área.
- Proporcionar al público información confiable y clara sobre los niveles de contaminación a los que se está expuesto.

#### **2.4.2 El Índice de Calidad del Aire (ICA) como herramienta**

La salud de las personas es afectada, en parte, por la calidad del aire, causándoles, en casos de contaminación, disminución de visibilidad, irritación de la garganta, ojos, entre otros. Es por ello que es necesario una evaluación de carácter cuantitativa sobre la calidad del aire, es decir, una medición de la concentración de contaminantes que se presenten en un determinado lugar.

El ICA es una herramienta muy simple que explica o brinda información de manera clara y directa sobre la calidad del aire de cada zona monitoreada. El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) emite diariamente el estado de calidad del aire a través de su portal institucional, en donde categoriza la calidad del aire como bueno, moderado, malo, muy malo y alerta máxima. En primer lugar se tiene la tabla 4, en donde se muestra una clasificación de índices de calidad de acuerdo al factor de emisión medido en el aire, tales como  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$  y  $O_3$ .



Tabla 4 - Índice de Calidad del Aire

Índice de calidad del aire (ICA)	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
	24h	24h	1h	8h
0-50	0-50	0-20	0-40	0-60
>50 – 100	> 50 – 150	> 20 – 80	> 40 – 200	> 60 – 120
>100 – 200	> 150 – 250	> 80 – 500	> 200	> 120
>200 – 300	> 250 – 420	> 500 – 2500		
> 300	> 420	> 2500		

Fuente: Senamhi, visible desde [www.senamhi.gob.pe](http://www.senamhi.gob.pe)

Tabla 5 - Clasificación de los estados de calidad del aire

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

Fuente: Senamhi, visible desde [www.senamhi.gob.pe](http://www.senamhi.gob.pe)

En segundo lugar, en la tabla 5 se muestra como el Índice de Calidad del Aire nos permite identificar las zonas que son riesgosas para la salud a través de la medición de concentración de los contaminantes anteriores, para nuestro caso de estudio específicamente  $PM_{10}$  y, de esta manera, permite tomar acciones preventivas.

## 2.5 Función de Transformación

Un problema usual, en el trabajo de determinación de impactos ambientales, es que las magnitudes medidas están en unidades heterogéneas y por tanto la cuantificación de resultados globales sobre un componente ambiental, sistema o subsistema resulta muy difícil (Conesa, 2009). Surge la necesidad de homogeneizar los resultados con sus diferentes unidades de medida, de tal manera de expresar resultados globales como unidades abstractas que contengan un valor ambiental. La unidad de medida común a la que todas las magnitudes se transforman es la unidad de impacto ambiental (UIA).

La tarea de homogeneizar los resultados es una tarea muy compleja y que en muchas ocasiones se define una función distinta para cada indicador de impactos, siempre con la finalidad de obtener un índice de calidad ambiental (CA) de un determinado factor en función de la magnitud del impacto que se recibe. Esta relación se expresa en la siguiente fórmula general:

$$CA_i = f(M_i) \dots \dots \dots (1)$$

Fuente: Conesa, V. 2009.

En dónde:

- CA: Calidad ambiental
- M: Magnitud de impacto recibido

Esta función puede tener una configuración lineal o no, con pendientes positivas y negativas. Por tanto, los factores ambientales que resulten positivos que terminen mejorando la calidad del medio presentarán funciones directas con pendientes positivas; mientras que, aquellos factores que sean negativos y perjudiciales y deterioren la calidad del medio presentarán funciones inversas con pendientes negativas. Es importante mencionar que los resultados de la calidad ambiental varían entre 0 y 1, confiriendo el valor de 1 al extremo óptimo de calidad ambiental y 0 al valor más desfavorable.

### 2.5.1 Modelos que miden Impactos Ambientales en el Aire

Los modelos que pueden medir la calidad ambiental de determinadas acciones se representan por las funciones de transformación. Como se ha dicho, estas funciones, permiten homogeneizar las diferentes unidades de medida de los indicadores de los factores afectados por cada proyecto o actividad objeto del EIA y expresarlas en unidades abstractas, homogéneas y de valor ambiental.

A continuación se muestran algunas funciones de transformación específicamente orientada a la calidad del aire afectadas por diferentes acciones:

- Calidad del aire derivada del monóxido de carbono

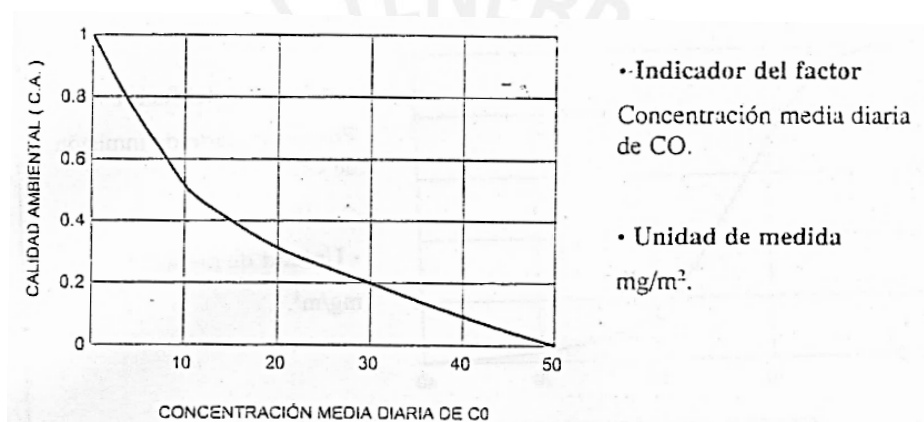


Figura 2 - CA del aire en función del contenido de monóxido de carbono.

Fuente: V. Conesa, 2009

En la figura 2 se observa una función referida a la calidad ambiental del aire en función de la concentración media diaria de monóxido de carbono en miligramos por metro cuadrado. Esta función es exponencial e inversamente proporcional a la concentración media diaria de monóxido de carbono, es decir, mientras menor sea la concentración diaria del gas, mayor será la calidad ambiental del aire, y por el contrario, mientras mayor sea la concentración diaria, menor será la calidad ambiental.

– Calidad del aire derivada del nivel de óxidos de azufre

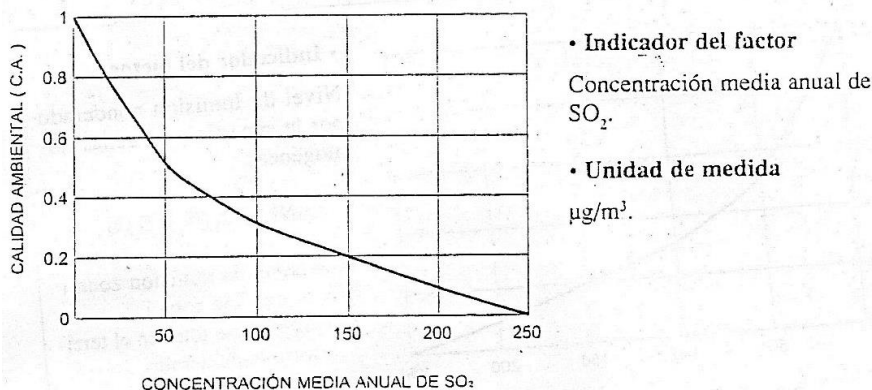


Figura 3 - CA del aire en función del nivel de óxidos de azufre.  
Fuente: V. Conesa, 2009

En la figura 3 se muestra una función referida a la calidad ambiental del aire en relación a la concentración media anual de óxidos de azufre en microgramos por metro cúbico. La función es exponencial e inversamente proporcional a la concentración del óxido de azufre: mientras menor sea la concentración diaria del contaminante, mayor será la calidad ambiental del aire, y por el contrario, mientras mayor sea la concentración media anual, menor será la calidad ambiental.

– Calidad del aire derivada del nivel de hidrocarburos

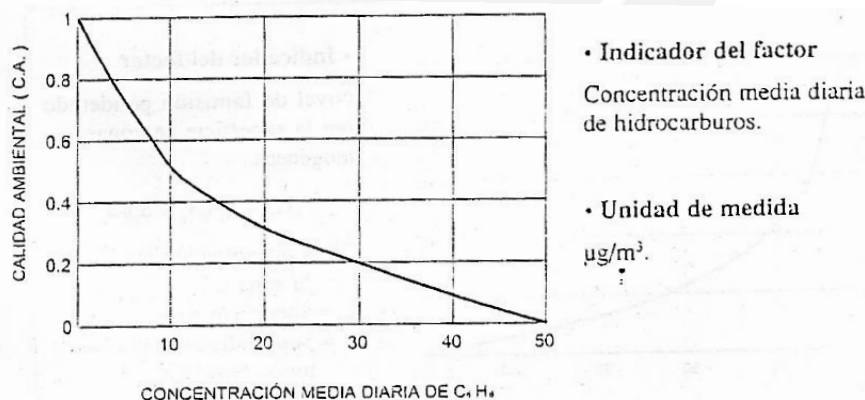


Figura 4 - CA del aire en función del nivel de hidrocarburos.  
Fuente: V. Conesa, 2009

En la figura anterior se muestra la función referida a la calidad ambiental del aire respecto a la concentración media diaria de hidrocarburos en microgramos por metro cúbico. Esta función es exponencial y se puede interpretar que mientras menor sea la concentración diaria del

contaminante, mayor será la calidad ambiental del aire, y por el contrario, mientras mayor sea la concentración media diaria, menor será la calidad ambiental.

- Calidad del aire derivada de la presencia de partículas en suspensión

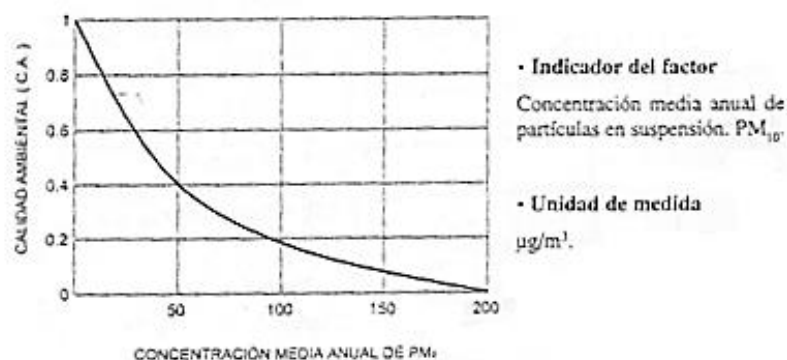


Figura 5 - CA del aire en función de la presencia de partículas en suspensión.

Fuente: V. Conesa, 2009

En la figura 5 se observa la curva de la función referida a la calidad ambiental del aire en relación a la concentración media anual de PM<sub>10</sub> en microgramos por metro cúbico. Esta función tiene forma exponencial y es inversamente proporcional a la concentración o la presencia de partículas en suspensión, es decir, mientras menor sea la concentración anual de partículas, mayor será la calidad ambiental del aire, y por el contrario, mientras mayor sea la concentración media anual, menor será la calidad ambiental.

## 2.6 Movimiento de Tierras

Es el conjunto de operaciones que se realiza sobre el terreno natural con el fin de modificar su forma. Normalmente viene precedida de actividades como nivelación del terreno, remoción de estructuras, señalización de las obras, entre otros, de tal manera que puedan ser aprovechados en la ejecución de obras públicas, industriales o de edificaciones (González y Cherné, 1997).

Las fases que comprenden el movimiento de tierras son: excavación y arranque, acarreo, carga, transporte, vertido o descarga, extendido, compactación, refinado y saneo.

### 2.6.1 Tipos de Movimiento de Tierras

Los tipos de excavaciones se pueden dividir en tres grupos:

- A cielo abierto: En este caso, los trabajos se realizan en seco o con baja humedad. El método de excavación dependerá del tipo de terreno que se encuentre. Así, por ejemplo, si se encuentra roca fija, se utilizará sistemáticamente explosivos; si el terreno es roca



fracturada, se requerirá el uso de maquinarias con accesorios especiales (rippers u otros) y explosivos de pequeña magnitud; y por último, si lo que se tiene es material suelto, se requerirá solo el empleo de maquinarias y/o mano de obra.

- Subterránea: Este tipo de excavación usualmente se dan el caso de excavaciones de túneles, galerías y pozos. Normalmente se utiliza explosivos, rozadores o martillos de percusión.
- Subacuática: Son aquellas excavaciones en donde no es posible realizar la excavación desde superficie o terreno natural siendo necesario utilizar dragas y bombas.

En la figura 6 se observa los diferentes tipos de excavaciones (a cielo abierto, subterránea y subacuática).



Figura 6 – Tipos de movimiento de tierra

Fuente: Antolin, visible desde: <http://www.aridosantolin.es/trabajos/excavaciones/excavaciones.htm>.

Euroinnova bussiness Scholl, visible desde: <http://www.euroinnova.do/lexm0310-Excavacion-Subterranas-Mecanizada-A-Seccion-Completa-Con-Tuneladoras-Online>.

### 2.6.2 Proceso Constructivo

El tipo de excavaciones a realizar puede ejecutarse empleando diferentes métodos y técnicas, de acuerdo a la obra a desarrollar.

En primer lugar, se inicia con la nivelación del terreno, el cual comprende los trabajos iniciales de corte y relleno necesarios para dar al terreno la nivelación especificada en planos utilizando motoniveladora, tractor de arado, entre otros. Las excavaciones masivas, por su magnitud, se ejecuta necesariamente con maquinaria pesada, tales como: retroexcavadoras, cargador frontal y tractores. Por último, las excavaciones simples se ejecutan preferentemente con la utilización de mano de obras y/o equipos.

Los rellenos comprende la ejecución de trabajos para rellenar zanjas, como es el caso de colocación de tuberías, cimentaciones enterradas; o el relleno de zonas requeridas por los niveles de pisos establecidos en los planos. El relleno puede realizarse con material propio, el cual proviene de las excavaciones de la misma obra, cumpliéndose con las condiciones adecuadas como estar limpio, homogéneo y libre de materias orgánicas. También, se puede utilizar material de préstamo como relleno, este material proviene de otras excavaciones y es utilizado cuando el material propio no cumple con las condiciones para ser utilizado como relleno.

Por último, se efectúa una nivelación final mediante un apisonado manual o con máquina. Por lo general, el apisonado se realiza por capas de un espesor determinado con el objetivo de asegurar una mejor compactación.

### 2.6.3 Descripción ambiental de las operaciones de Movimiento de Tierras

Las operaciones de movimiento de tierras impactan negativamente el ambiente natural, es por ello que debe conocerse qué factores se afectan, cuales son las principales acciones impactantes, así como los efectos de dichos impactos; esto con el fin de mitigarlos mediante acciones correctoras (Orta, 2013).

En general, los impactos originados por movimiento de tierras consisten en la modificación del estado físico de los suelos. En la tabla 6 se puede observar la relación de factores afectados, las acciones impactantes y los impactos directos que se genera en las operaciones de movimiento de tierras.

Tabla 6 - Impactos directos de las operaciones de movimiento de tierras

Factor afectado	Acciones impactantes	Impactos directos
Suelo	Uso de maquinaria pesada, apertura de préstamos y canteras.	Dstrucción de capa vegetal, compactación de suelos, contaminación, erosión y creación de barreras físicas.
Agua	Afectaciones y modificaciones al drenaje natural. Vertido de sustancias nocivas y aguas albañales.	Contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, destrucción y desvíos de acuíferos y disminución del nivel freático.
Aire	Generación de polvo atmosférico en la obra, apertura de canteras y voladuras.	Contaminación del hábitat por gases, polvo y ruido, modificación del microclima, modificación del régimen de vientos, afectación del bienestar humano.

Fuente: Orta, 2013

## 2.7 Modelos Teóricos de Estimación de Emisiones

Las estimaciones de emisiones se desarrollan mediante la utilización de factores de emisión, que vienen a ser una relación lineal entre la tasa de emisión y una determinada unidad de actividad (tasa de producción, densidad poblacional, tasa de empleo, cantidad de combustible consumido, etc.). Para ciertos tipos de fuentes de emisión, se usa modelos matemáticos o factores de emisión de cierta complejidad (Radian Corporation, 1996), para los cuales se estudia o se analiza la relación funcional entre las emisiones, procesos múltiples y las variables ambientales involucradas.

Los modelos de emisiones están diseñados para generar estimaciones más exactas, el nivel de exactitud dependerá de los supuestos que sustentan el modelo y de la calidad de los datos que se ingresen a él (Radian Corporation, 1996).

Existen tres tipos de modelos de emisiones de contaminantes: modelos adaptativos, de múltiples variables y mecánicos (Radian Corporation, 1996). Los adaptativos son modelos de alta complejidad que se basan en conceptos de redes neuronales, lógica difusa y sistemas caóticos. Los de múltiples variables consisten en una metodología que combina enfoques de inventarios de emisiones, información específica del sistema dentro de un marco de extrapolación de datos, este modelo expresa la estimación de las emisiones en función del conjunto de variables que define al sistema que se modela. (Radian Corporation, 1996). Los

modelos mecánicos describen tasas de emisión de un tipo de fuente en particular basándose en ecuaciones, utilizando fundamentos de Química, Física y Biología. (Radian Corporation, 1996).

La EPA (Environmental Protection Agency) desarrolló modelos de estimación de emisiones para diversas categorías de fuentes, entre ellas, se encuentra la categoría de los polvos fugitivos, los cuales consisten en material particulado expuestos a las corrientes de aire y se generan a través de las perturbaciones mecánicas de material granulado.

Las fuentes más comunes de polvos fugitivos, a nivel regional, son los depósitos de materiales de agregados, operaciones agrícolas, caminos pavimentados y no pavimentados y operaciones de construcción.

Para las fuentes anteriores, el proceso de generación de polvo es causado por 2 fenómenos físicos básicos:

- Pulverización y abrasión del material superficial mediante la aplicación de fuerzas mecánicas como las generadas por los neumáticos, cuchillas, palas mecánicas, etc. (EPA AP 42, 2011)
- Arrastre de partículas por la acción de las corrientes de aire turbulentas como en el caso de la erosión eólica de una superficie expuesta por vientos de velocidades mayores a 19 kilómetros por hora (EPA AP 42, 2011).

### **2.7.1 Carreteras no pavimentadas**

Una fuente de contaminación del aire la constituyen las carreteras sin pavimentar en diversos proyectos y actividades. Cuando un vehículo viaja sobre una carretera no pavimentada, la fuerza de los neumáticos sobre la superficie de la carretera genera pulverización del material superficial. Estas partículas son elevadas y descendidas debido al movimiento giratorio de las ruedas.

Además de lo anterior, el material pulverizado de la superficie de la carretera es expuesto a fuertes corrientes de aire turbulentos cortantes con la superficie. Por último, la estela turbulenta de aire que se genera detrás del vehículo continúa actuando sobre la superficie de la carretera después de que el vehículo haya pasado (EPA AP 42, 2011).

La cantidad de material emitido al aire para un tramo de carretera determinado va a variar en función del volumen de tráfico que se presente, de la velocidad media del vehículo, y de las características propias de la carretera, tales como la textura, la humedad de la superficie y la cantidad de limo presente en la superficie de la carretera.

No obstante, todas las carreteras están sujetas a una cierta magnitud de mitigación natural debida a las lluvias y otras precipitaciones, es por ello que el promedio anual de emisiones es inversamente proporcional al número de días con una precipitación mayor o igual a 0,01 pulgadas (0,254 mm).

Las siguientes expresiones empíricas estiman la cantidad de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> emitido para una carretera no pavimentada en función de los parámetros antes mencionados:

- PM<sub>10</sub>

$$EF = \frac{1.8\left(\frac{s}{12}\right)\left(\frac{S}{30}\right)^{0.5}}{\left(\frac{M}{0.5}\right)^{0.2}} - 0,00047 \dots\dots\dots(2)$$

$$EF_{ext} = EF\left(1 - \frac{p}{365}\right) \dots\dots\dots(3)$$

$$E = VMT \times EF_{ext} \dots\dots\dots(4)$$

Fuente: EPA AP 42, 2011.

- PM<sub>2.5</sub>

$$EF = \frac{0.18\left(\frac{s}{12}\right)\left(\frac{S}{30}\right)^{0.5}}{\left(\frac{M}{0.5}\right)^{0.2}} - 0,00036 \dots\dots\dots(5)$$

$$EF_{ext} = EF\left(1 - \frac{p}{365}\right)$$

$$E = VMT \times EF_{ext}$$

Fuente: EPA AP 42, 2011.

En dónde:

- E: Tasa de emisión promedio anual, lb/año
- E<sub>ext</sub>: Factor de emisión anual extrapolado para mitigaciones naturales lb/VMT
- VMT: Millas de vehículo recorrido por año
- EF: Factor de emisión, lb/VMT
- p: número de días al año con una precipitación mínima de 0,254 mm.
- s: Contenido de limo en la superficie de la carretera, %.
- S: Velocidad media del vehículo, millas/hora.
- M: Contenido de humedad en el material de la superficie de la carretera.



### 2.7.2 Manejo de agregados y depósito de materiales

Los cúmulos o depósitos de almacenamiento de agregados se encuentran, por lo general, al aire libre o descubiertos, esto debido a la necesidad frecuente de transferencia del material.

Las emisiones de material particulado ocurren en varios puntos del ciclo de almacenamiento del agregado, tales como la descarga de éste hacia el depósito, perturbaciones por corrientes de vientos fuertes y carga de agregado desde el depósito. A su vez, el movimiento de camiones y equipos de carga en la zona del depósito es también una fuente importante de emisión de material particulado.

La cantidad de emisión de polvo varía proporcionalmente con el volumen de agregados que pasa por el ciclo de almacenamiento. Las emisiones también depende de tres parámetros referentes a las condiciones de un depósito en particular: antigüedad del depósito, contenido de humedad y proporción de agregados finos (EPA AP 42, 2011).

El máximo potencial de emisión de material particulado se da cuando se descarga agregado fresco al depósito de almacenamiento, el material fino es fácilmente desagregado y liberado a la atmósfera expuesta a corrientes de aire. Mientras el depósito de agregado se mantiene sin ninguna alteración, la cantidad de polvo emitido se reduce en gran medida.

La humedad reduce la emisión de polvo dado que posibilita la cementación del material fino a la superficie de partículas más grandes; las precipitaciones es otro factor que reduce las emisiones ya que el interior del depósitos es humedecido lo cual genera un proceso de secado muy lento manteniendo el depósito húmedo (EPA AP 42, 2011).

La cantidad total de material particulado emitido por manejo de agregados y depósito de materiales es resultado de distintas actividades dentro del ciclo de almacenamiento, las cuales consisten en: descarga de agregados en los depósitos de almacenamiento, tráfico de equipos y vehículos en el área de almacenamiento, erosión eólica de la superficie del depósito y carga de agregados del depósito para ser transportados.

Por lo general, bien sea que se adicione o remueva agregado del depósito, esta actividad implica dejar caer una determinada cantidad de agregado sobre una superficie receptora (depósito de almacenamiento o camión volquete), lo cual genera emisión de material particulado, cuya cantidad depende de los parámetros y factores antes descritos.

La siguiente expresión empírica estima la cantidad de material particulado emitido por manejo de agregados.

$$E = Q \times EF \dots \dots \dots (6)$$

$$EF = k(0,0016) \frac{\left(\frac{U}{2,2}\right)^{1,3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1,4}} \dots \dots \dots (7)$$

Fuente: EPA AP 42, 2011.

En dónde:

- E: Tasa de emisión promedio anual en masa, kg/año
- EF: Factor de emisión, kg/mg
- Q: Cantidad de material transferido, Mg/año
- k: factor del tamaño de la partícula, adimensional
- U: Velocidad media del viento, m/s
- M: Contenido de humedad del material, %

El factor “k” varía según el tamaño aerodinámico de la partícula. Para el caso del PM<sub>10</sub>, la EPA recomienda un valor de 0,35; mientras que para el PM<sub>2,5</sub>, el valor de “k” es 0,053.

### 3. Metodología

#### 3.1 Variables que influyen en la emisión de material particulado

Las emisiones de material particulado en las actividades de movimiento de tierras dependen de las características del entorno en el que se desarrolla dicha actividad fuente de emisión. Este entorno está constituido por el ambiente y el suelo sobre el que se trabaja; por ello las variables influyentes se encuentran en las características del suelo y del ambiente, en el momento en el que se desarrolla la actividad.

Las características del suelo que influyen en la emisión de material particulado corresponden al porcentaje de finos y humedad del suelo. De la misma manera, las características del ambiente son la precipitación, velocidad del viento y humedad relativa.

##### 3.1.1 Porcentaje de finos

Los suelos presentan partículas de tamaños variables, el rango de tamaños y la cantidad o porcentaje de material con un tamaño determinado se estima mediante el análisis granulométrico del suelo. Dicho análisis consiste en separar las partículas en rangos de tamaños diferentes por medio de tamices de distintas dimensiones.

El análisis granulométrico por tamizado llega a separar las partículas del suelo hasta un tamaño mínimo de 75 µm (malla #200). La cantidad o el porcentaje del suelo que pasa la malla

#200 es denominado como porcentaje de finos, es decir, las partículas del suelo con diámetro menor a 75  $\mu\text{m}$  corresponde a la fracción fina del suelo, el cual se expresa en porcentaje (%).

Dado que las partículas en estudio son de un tamaño menor o igual a 10  $\mu\text{m}$ , se puede estimar que la cantidad de material particulado que suspende durante las actividades de movimiento de tierras será mayor mientras mayor sea el porcentaje de finos del suelo. Los valores de este parámetro para el estudio fueron tomados de los estudios de mecánica de suelos de los casos seleccionados (ver Anexo 8.1).

### 3.1.2 Contenido de humedad

Todos los suelos, en estado natural, se encuentran en menor o mayor grado húmedos. El agua que contiene es una característica importante que permite correlacionar el comportamiento del suelo con sus propiedades físicas. Dependiendo de la cantidad o contenido de humedad, un suelo con un alto porcentaje de finos puede adquirir ciertas propiedades como la adhesión, cohesividad, contracción y plasticidad. Un alto contenido de humedad hace que el suelo sea más consistente y sea menos susceptible al intemperismo.

El contenido de humedad se obtiene mediante el secado de un espécimen o muestra del suelo en un horno durante el tiempo suficiente para que dicha muestra tenga un peso constante, el peso que se pierde por el secado corresponde al peso de agua. Por último, el contenido de humedad se obtiene dividiendo el peso del agua entre el peso del suelo seco, el resultado se expresa en porcentaje (%).

Dado que un suelo es más consistente mientras tenga mayor contenido de humedad, se puede estimar que la humedad es una variable, que de estar presente en gran medida, disminuirá las emisiones de material particulado, es decir, a mayor presencia de humedad en el suelo, menor serán las emisiones de material particulado. Al igual que el parámetro anterior, porcentaje de finos, los valores utilizados para el estudio se obtuvieron de los estudios de suelos respectivos (ver Anexo 8.1).

### 3.1.3 Precipitación

Las lluvias se generan por la condensación del vapor de agua contenido en la atmósfera, para que la condensación pueda producirse, es necesario que el aire se encuentre totalmente húmedo, es decir, que la humedad relativa sea del cien por ciento (100%). En el caso de la ciudad de Lima, este valor de precipitación se obtiene principalmente por lluvias y lloviznas.

Las precipitaciones se miden con el pluviómetro, con él se calcula el agua que cae sobre un metro cuadrado de superficie durante 24 horas. Los datos de precipitaciones fueron tomados de la estación meteorológica Campo de Marte (código 006617) ubicada en las siguientes coordenadas: 12°04'13.9''S Latitud, 77°02'35,4''W Longitud, 123msnm de altitud, se escogió dicha estación por ser la más cercana a los puntos de medición en nuestros casos de estudio. Por otro lado, los datos de la estación fueron tomados en concordancia con la fecha en que se realizaron los monitoreos en campo, las mediciones tomadas para este parámetro fueron valores diarios.

Como se puede observar, las precipitaciones o lluvias disipan la emisión de material particulado y además, humedecen el suelo dándole mayor contenido de humedad. Por tanto, se puede estimar que la cantidad de material particulado que se emita disminuirá mientras mayor sea la cantidad de precipitaciones. La unidad de medida de esta variable es el milímetro (mm).

#### **3.1.4 Velocidad del viento**

El viento es el aire en movimiento en dirección horizontal a lo largo de la superficie de la tierra, y además, a mayor velocidad del viento las concentraciones de contaminantes suspendidos en el aire será menor.

La medición de la velocidad del viento se realiza a través del anemómetro, el cual consiste en un molinete de tres brazos separados por ángulos de 120°, los cuales se mueven alrededor de un eje vertical, estos datos fueron medidos en campo (ver anexo 8.2).

La velocidad del viento, al igual que otras variables del clima, depende del día en el que se realizó la medición, su valor se indicará en metros por segundo (m/s).

#### **3.1.5 Humedad relativa**

La humedad relativa o humedad del aire depende del vapor de agua que se encuentre en el aire, se define como el porcentaje de vapor de agua que tiene una masa de aire en un momento determinado.

Existen diversos instrumentos de medición de la humedad del aire. Al igual que la precipitación, los datos de humedad fueron tomados de la estación meteorológica Campo de Marte (código 006617) ubicada en las siguientes coordenadas: 12°04'13,9''S Latitud, 77°02'35,4''W Longitud, 123msnm de altitud, se escogió dicha estación por ser la más cercana a los puntos

de medición en nuestros casos de estudio. Por otro lado, se pudo tomar mediciones en campo con el equipo EVM-7. Esta variable se expresa en porcentaje (%) (ver Anexo 8.2).

### 3.2 Limitaciones del estudio

En este estudio se busca estimar, con un modelo, un factor de emisión que exprese la cantidad de material particulado emitido durante las operaciones de excavación y movimiento de tierras en obras de edificaciones. Es por ello que para la validación de este estudio fue necesario llevar a cabo mediciones en obra, en donde la ejecución se encuentre en la etapa de excavaciones y movimiento de tierras, con ayuda de un equipo de medición de alta precisión.

En la ciudad de Lima se concentra sin número de obras de edificaciones. Sin embargo, a pesar de tener varios casos de obras para poder realizar las mediciones, se presentaron las siguientes limitaciones.

Localización y Ubicación de obras: Si bien es cierto que existen diversas obras en ejecución, se presentó dificultades para ubicar obras que se encuentren específicamente en la etapa de excavaciones y movimiento de tierras. En las páginas webs, por lo general, solo se encuentra información de proyectos casi terminados y los contactos con los que se cuenta no disponían de obras en la etapa o fase requerida.

Permisos para ingresar a obra: Una de las mayores limitaciones que se tuvo fue la obtención de permisos para poder ingresar a las respectivas obras. Muchas veces en las que se encontró proyectos en la fase de excavaciones, se negó el permiso de ingreso, en la mayoría de los casos por cuestiones de seguridad.

Presupuesto limitado: Fue necesario el uso de un equipo especializado para la medición directa de material particulado en obra. Dicho equipo es un sensor de alta capacidad y como tal, el costo de alquiler era alto, por lo cual solo se alquiló para intervalos de tiempo muy cortos que no supera las 48 horas.

### 3.3 Selección de casos

Los criterios de selección para realizar las mediciones fueron, en primer lugar, que la obra en ejecución se encuentre en la fase de movimiento de tierras; además, las condiciones de trabajo debieron ser tal que posibilite la ubicación del equipo de medición en un lugar adecuado para realizar las mediciones correctamente y de tal manera que no interfiera en los trabajos. Por último, las obras seleccionadas son representativas de la zona central de la ciudad de Lima debido a sus ubicaciones.



### 3.3.1 Edificio Génova

Este proyecto se encuentra ubicado en la Av. Arenales N° 1475 en el distrito de Santa Beatriz, tal como se muestra en la figura 7. Consiste en un edificio de departamentos multifamiliar con un área total aproximada de 1000 m<sup>2</sup>, la futura construcción contará con 20 pisos de altura y dos sótanos y medio. La empresa constructora encargada del proyecto es la Constructora Corporación Inmobiliaria Nérida María SAC.

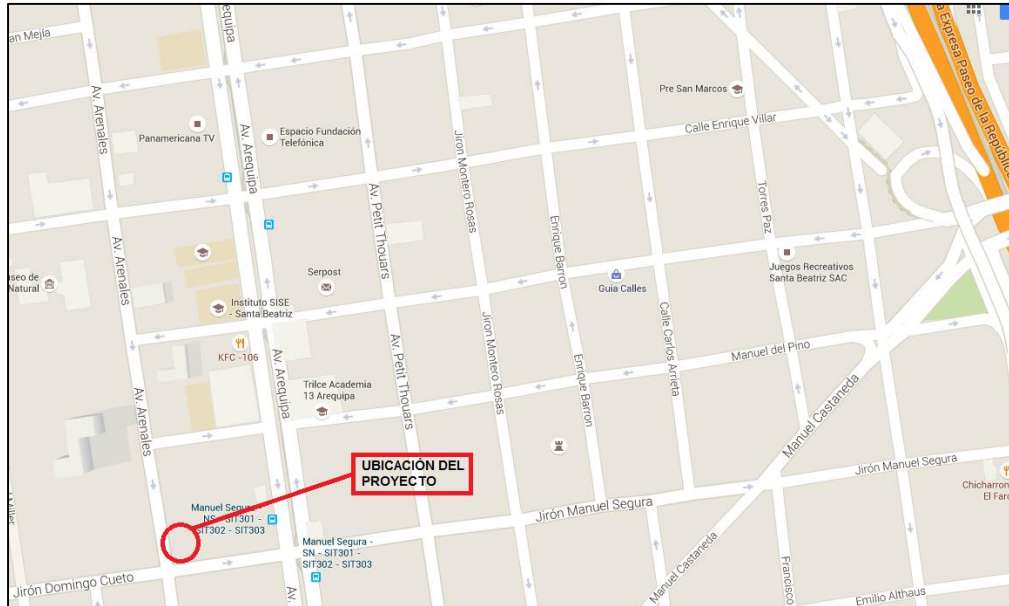


Figura 7 - Ubicación del proyecto Génova.  
Fuente: Google Maps

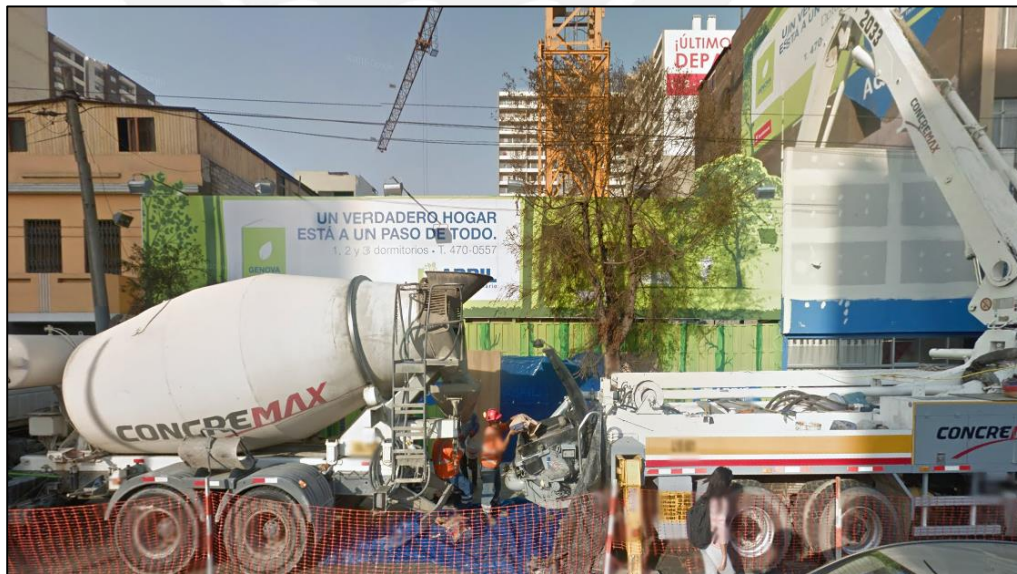


Figura 8 - Proyecto Génova.  
Fuente: Google Maps

La figura 8 muestra una vista del proyecto inmobiliario en ejecución, en la cual se tiene un solo ingreso de vehículos y/o camiones y personal obrero, lugar donde se realizaron las mediciones.

Según el estudio de mecánica de suelos realizado en la zona, las condiciones climáticas del área estudiada presenta características de un tipo de clima templado y con un alto grado de humedad, los niveles de temperatura máxima y mínima anual oscilan ente los 30°C y 15°C. El valor de la precipitación se tomó de los reportes meteorológicos de ese día y para la hora del estudio.

Para obtener los parámetros y características del suelo, se basó en el estudio de mecánica de suelos, el cual indica el porcentaje de finos a través del ensayo granulométrico y el contenido de humedad del suelo por medio del ensayo de humedad. Además, se tomó en cuenta la profundidad en la que se encontraban las excavaciones para poder tomar los parámetros del suelo correspondientes.

El equipo fue ubicado en un punto cercano a las actividades de excavación (figura 9). La excavación se realiza mediante palas excavadoras que recogen el material y lo depositan directamente al camión volquete (ver tomas 5 y 6 del Proyecto Genova en Anexo 8.4).



Figura 9 - Ubicación del equipo de medición.

*Fuente: Propia*

### 3.3.2 Edificio Flat Arequipa

Este proyecto se encuentra ubicado en la Av. Arequipa N° 2635 Lince, tal como se muestra en las figuras 10 y 11. Se trata de un edificio de vivienda multifamiliar con un área total 1100 m<sup>2</sup>, la futura construcción tendrá 20 pisos de altura y siete sótanos. La empresa constructora encargada del proyecto es la constructora WC Peru SAC.

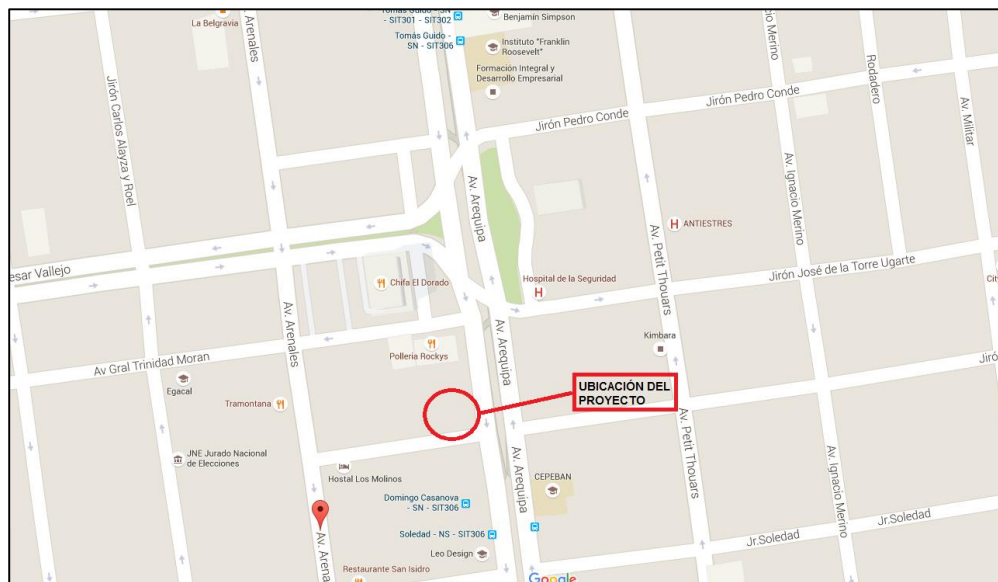


Figura 10 - Ubicación del proyecto Flat Arequipa  
Fuente: Google Maps



Figura 11 - Proyecto Flat Arequipa  
Fuente: Google Maps

Del estudio de mecánica de suelos se obtiene que las condiciones climáticas del área de estudio corresponden a un clima templado y con un alto grado de humedad, la temperatura máxima es de aproximadamente 30°C en las épocas de verano y de 12°C en los meses de invierno.



De igual manera, para obtener los parámetros y características del suelo, se obtuvo del estudio de mecánica de suelos del proyecto, el cual indica el porcentaje de finos a través del ensayo granulométrico y el contenido de humedad del suelo por medio del ensayo de humedad. Además, se tomó en cuenta la profundidad en la que se encontraban las excavaciones para poder tomar los parámetros del suelo correspondientes

Al igual que en el proyecto anterior, las excavaciones se realizaron con palas excavadoras, las cuales depositaban el material a un recipiente metálico de determinada capacidad de carga, el cual a su vez transportaba el material al camión volquete. En este caso, el equipo se ubicó al nivel superficial de la obra, es decir, no al mismo nivel de excavación; sin embargo, fue ubicado en un punto adecuado para la recepción de emisiones de material particulado porque, visto desde planta, el equipo se ubicó cerca a las actividades de excavación (ver tomas 5 y 6 del Proyecto Flat Arequipa en Anexo 8.4)

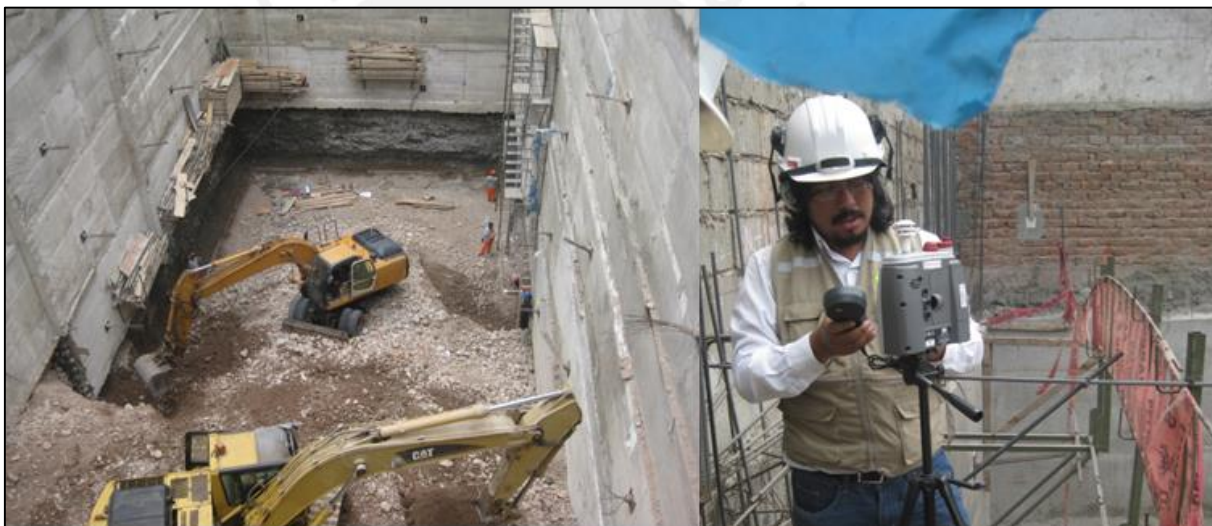


Figura 12 - Excavación del material y ubicación del equipo de medición.  
Fuente: Propia

### 3.3.3 Proyecto Costanera

Este proyecto se encuentra ubicado en el distrito de San Miguel, consiste en la generación de áreas y espacios para la construcción de edificaciones sobre rellenos de terreno ganados al mar, se extiende a lo largo de aproximadamente cuatro kilómetros de manera paralela al circuito de playas.

La medición de material particulado se hizo en diez puntos ubicados a lo largo de todo el proyecto, los cuales presentan las coordenadas mostradas en la tabla 7 y se muestran en la figura 13.

Tabla 7 - Ubicación de los puntos de medición.

Ubicación de los puntos de medición		
Ingreso a campamento	12° 5'21,68"S	77° 5'27,81"O
PM-001	12° 5'16,69"S	77° 5'40,12"O
PM-002	12° 5'9,82"S	77° 5'55,37"O
PM-003	12° 5'4,49"S	77° 6'9,88"O
PM-004	12° 4'56,74"S	77° 6'24,31"O
PM-005	12° 4'49,95"S	77° 6'35,33"O
PM-006	12° 4'49,33"S	77° 6'31,25"O
PM-007	12° 4'57,21"S	77° 6'16,81"O
PM-008	12° 5'2,50"S	77° 6'0,98"O
PM-009	12° 5'9,48"S	77° 5'45,95"O

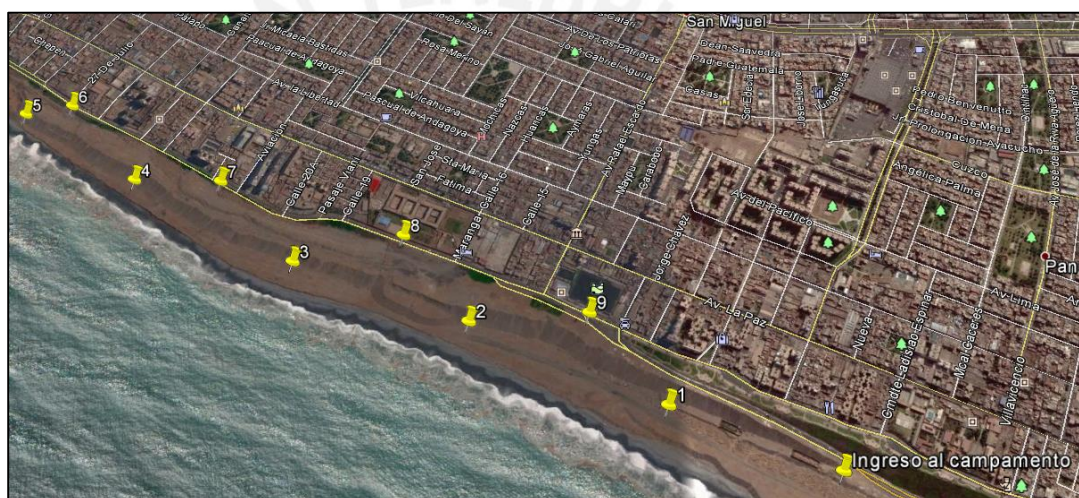


Figura 13 – Ubicación en el mapa de puntos de medición.  
Fuente: Google Earth

### 3.3.4 Procesamiento de datos

Los datos obtenidos del reporte de medición del equipo se recolectaron luego de realizar las mediciones de material particulado en los proyectos mencionados. El equipo EVM-7 tiene la capacidad de brindar reportes digitalizados, de los cuales solo tomamos ciertos parámetros que corresponden para el presente estudio, los cuales son la humedad promedio, el promedio de polvo y el polvo máximo, tal como se muestra en la siguiente figura.



**Panel de datos de resumen**

Descripción	Valor	Descripción	Valor
Promedio de temperatura	15 °C	Mín. de temperatura	14.7 °C
Máx. de temperatura	16 °C	Tiempo mín. de temperatura	18/09/2014 09:21:49 a.m.
Tiempo máx. de temperatura	18/09/2014 09:07:59 a.m.	Humedad máxima	90.1 %
Humedad promedio	89.2 %	Humedad mínima	83.3 %
Fecha de humedad máxima	18/09/2014 09:27:36 a.m.	Fecha de humedad mínima	18/09/2014 09:07:59 a.m.
Promedio de polvo	0.002 mg/m <sup>3</sup>	Mín. de polvo	0.000 mg/m <sup>3</sup>
Máx. de polvo	0.103 mg/m <sup>3</sup>	STEL de polvo	0.003 mg/m <sup>3</sup>
TWA de polvo	0.000 mg/m <sup>3</sup>	Tiempo mínimo de polvo	18/09/2014 09:08:15 a.m.
Tiempo máximo de polvo	18/09/2014 09:08:47 a.m.	Tiempo de STEL máx. de polvo	18/09/2014 09:22:59 a.m.
CO2Ave	71 PPM	CO2Min	59 PPM
CO2Max	117 PPM	CO2STEL	76 PPM
CO2TWA	7 PPM	CO2MinTime	18/09/2014 09:49:51 a.m.
CO2MaxTime	18/09/2014 09:08:09 a.m.	CO2STELTime	18/09/2014 09:23:10 a.m.
COAve	0 PPM	COMax	0 PPM
COMaxTime	18/09/2014	COMin	0 PPM

Figura 14 - Datos a recolectar del reporte de medición.  
Fuente: Propia

De acuerdo con el manual, el sensor de medición EVM-7 es un equipo portátil, compacto, sencillo y adaptable a las condiciones de trabajo en donde se requiera su uso, tal como se muestra en la figura 15. Es un equipo adecuado cuando se trata de monitorear una gran variedad de riesgos, en la calidad del aire, porque permite medir simultáneamente los siguientes parámetros: Partículas suspendidas, compuestos volátiles orgánicos, gases tóxicos, dióxido de carbono, humedad relativa, temperatura y velocidad del viento.



Figura 15 - Sensor de medición de calidad del aire EVM-7  
Fuente: Propia

Entre las características principales del equipo se puede encontrar que puede medir, de manera simultánea, partículas y concentraciones de gases además de otros parámetros, con lo cual reduce la necesidad de múltiples instrumentos de medición. En el aspecto de material particulado, tiene la capacidad de medir partículas de tamaños 2,5  $\mu\text{m}$ , 4  $\mu\text{m}$  y 10  $\mu\text{m}$ . Además, cuenta con salidas analógicas y digitales que permiten realizar funciones externas; también cuenta con un software de administración de datos, el cual hace más fácil exportar, crear reportes y compartir datos.

Según las especificaciones del equipo, está diseñado para medir y ayudar a identificar los contaminantes del aire. La metodología utilizada implica un puñado de componentes que incluye: una entrada de aire, el impactador (que es el tamaño de partícula selector), la colección de partículas, muestreo gravimétrico y la bomba.

### **3.4 Análisis de datos y obtención del modelo**

Una vez finalizada la tarea de recolección de datos, se dispone de éstos para desarrollar el modelo que permita estimar las emisiones de material particulado. Sin embargo, la masa de datos por sí sola no garantiza un modelo bien desarrollado si previamente no se ejerce sobre éstos una serie de actividades que tiendan a organizarlos y someterlos a un análisis e interpretación (Monje, 2011).

Es necesario procesar y analizar los datos de manera ordenada y coherente con el objetivo de discernir patrones y relaciones. Dado que la naturaleza de los datos es de carácter cuantitativo, se aplica un análisis estadístico mediante el cálculo de porcentajes, medias aritméticas, correlaciones y pruebas de significación.

Luego, viene el proceso de interpretación de los resultados, es decir, del modelo obtenido, en donde se señala las características que toman las distribuciones de variables y sus correlaciones.

#### **3.4.1 Análisis Exploratorio de Datos (AED)**

Para llegar a tener un entendimiento básico de los datos y de las relaciones existentes entre las variables analizadas, es necesario realizar un AED, el cual está basado en un análisis descriptivo de cada variable, comprende un conjunto de técnicas estadísticas y proporciona métodos sistemáticos sencillos que permiten organizar y preparar los datos, detectar fallos y datos atípicos (Salvador y Gargallo, 2003).

Para realizar un correcto AED se realizó los siguientes pasos:

1. Los datos se hicieron accesibles a cualquier técnica estadística, se creó la matriz de datos, seleccionamos el método de entrada y se eligió un paquete estadístico adecuado. Para el caso del presente estudio, el paquete estadístico es el SPSS.
2. Con la matriz de datos elaborada, se hace una primera revisión de ésta con el objetivo de encontrar posibles errores que puedan alterar el estudio. Esta primera revisión de datos consiste en calcular estadísticos descriptivos de todas las variables, es decir, las frecuencias absolutas, los mínimos y máximos; de esta manera, se verifica que no haya ningún valor ajeno a los valores lógicos de la variable.
3. Se procede a realizar un análisis estadístico gráfico y numérico de las variables y se elige el tipo de análisis a realizar en función de la escala de medida de los datos. La siguiente tabla muestra las medidas descriptivas numéricas y las representaciones gráficas a utilizar en función de la escala de medida de la variable. Este análisis permite dar una idea inicial de la información contenida en el conjunto de datos, además de poder detectar posibles errores o datos anormales.

Tabla 8 - Medidas descriptivas y representaciones gráficas en función de la escala de medida.

Escala de medida	Representaciones gráficas	Medidas de tendencia central	Medidas de dispersión
Nominal	Diagrama de barras, líneas o sectores	Moda	-
Ordinal	Boxplot	Mediana	Rango intercuartílico
Intervalo	Histogramas, polígono de frecuencia	Media	Desviación típica
Razón	-	Media geométrica	Coefficiente de variación

Fuente: Salvador y Gargallo, 2003

4. Luego, se procede a utilizar los indicadores estadísticos, los cuales permiten estudiar las características de las variables tales como la tendencia, la media, la varianza y otros. Los indicadores estadísticos a utilizar son los siguientes:
  - Indicadores de tendencia central: media aritmética, error de la media y moda.
  - Indicadores de dispersión: varianza, desviación típica, mínimo y máximo.
  - Indicadores de posición: cuartiles y percentiles.
  - Indicadores de forma: asimetría y su error, curtosis y su error.
5. Luego, se procede a identificar los posibles casos atípicos y analizar el impacto que podrían generar en los posteriores análisis estadístico.

### 3.4.2 Regresión y construcción del modelo

Al estudiar dos o más variables que no son independientes, la relación entre ellas puede ser explicada matemáticamente de manera funcional mediante una relación exacta, por ejemplo, espacio recorrido por un vehículo que circula a velocidad constante y el tiempo empleado en recorrerlo. Otra relación entre dichas variables puede ser explicada de manera estadística, es decir, a diferencia de una relación matemática exacta, solo hay una relación aproximada entre las variables, por ejemplo, incremento del costo de un proyecto en función del área y del tiempo de ejecución (Pardo y Ruiz, 2005).

En este tema de estudio se observa que existen diversas variables explicativas (porcentaje de finos, contenido de humedad, precipitación, velocidad del viento y humedad relativa) que influyen en otra variable dependiente, el cual es la emisión de material particulado.

Entonces, interesa estudiar el grado de dependencia existente entre cada variable explicativa y la variable dependiente. Se realiza considerando que los valores de la variable dependiente se generaron mediante una combinación lineal de los valores de las variables explicativas y un término aleatorio, se desarrolla un modelo matemático para estimar el valor de emisión de material particulado basándose en los valores de las variables explicativas, en lo que se denomina análisis de regresión lineal múltiple.

Se tiene una variable Y que es explicada por cinco variables independientes X por el modelo siguiente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \epsilon \dots\dots\dots(8)$$

Fuente: Pardo y Ruiz, 2003

Dónde:

- Y: Variable dependiente (Emisión de material particulado).
- $X_n$ : Variables explicativas (porcentaje de finos, contenido de humedad, precipitación, velocidad del viento y humedad relativa).
- $\beta_0$ : Término constante
- $\beta_n$ : Coeficiente que indica el peso relativo de su respectiva variable en la ecuación
- $\epsilon$ : Residuos, perturbaciones aleatorias, error del modelo (diferencia entre los valores observados y pronosticados).

los criterios que deben cumplir las variables explicativas son los siguientes:

- La relación entre variables explicativas y variables dependientes debe ser proporcional, es decir, lineal
- Las variables consideradas deben tener cierta justificación teórica.
- No puede haber variables repetidas o redundantes.

Los coeficientes de las variables explicativas deben ser determinados a partir de los datos de las muestras y empleándose el método de mínimos cuadrados con el objetivo de llegar a la ecuación estimada de regresión que más se aproxima a la relación lineal entre la variable dependiente y las variables explicativas.

Los datos deben cumplir con ciertas consideraciones para que se pueda realizar un análisis lineal múltiple, las cuales son:

- Los valores de la variable dependiente deben estar relacionados de manera lineal con los valores de las variables descriptivas. De esta manera, la variable dependiente resultará ser una combinación lineal de variables independientes.
- Los residuos de las variables independientes se distribuyen de una forma normal con media cero.
- No debe existir ninguna relación lineal entre las variables independientes.

Si los datos presentan estas características, entonces se puede establecer que el método de estimación de mínimos cuadrados va a generar estimadores óptimos, es decir, el parámetro estimado (emisión de material particulado) va a presentar valores centrados y van a ser de una mínima varianza.

**a) Coeficiente de correlación lineal “R”:** El coeficiente de correlación lineal o coeficiente de correlación de Pearson es un indicador de correlación lineal entre dos variables, cuantifica la dependencia lineal de una variable dependiente con una variable aleatoria o independiente. Su valor oscilará entre los -1 y +1, en el caso que el coeficiente sea igual a 1, todos los puntos están sobre una misma recta con pendiente positiva, y cuando el valor sea -1, todos los puntos estarán sobre una misma recta pero con pendiente negativa, tal como se muestra en la siguiente expresión.

$$R = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \dots\dots\dots(9)$$

**b) Coeficiente de determinación “R<sup>2</sup>”:** El coeficiente de determinación R<sup>2</sup> mide la bondad de ajuste del modelo, se puede interpretar como la proporción de variabilidad de la variable dependiente que puede ser explicada con el modelo de regresión múltiple. Al ser multiplicado por cien, se interpreta de manera porcentual la variación de “Y” que se explica con la ecuación de regresión, el R<sup>2</sup> se determina mediante la siguiente expresión:

$$R^2 = \frac{SCR}{SCT} \dots\dots\dots(10)$$



Dónde:

- $SCT$  es la suma de cuadrados totales
- $SCR$  es la suma de cuadrados de la regresión

EL valor de  $R^2$  se puede clasificar, de forma general, de la siguiente manera:

Tabla 9 - Clasificación de  $R^2$

Menor de 0,3	0,3 a 0,4	0,4 a 0,5	0,5 a 0,85	Mayor de 0,85
Muy malo	Malo	Regular	Bueno	Muy bueno

Fuente: ROJO, Jose 2007

Otro aspecto importante a mencionar es que este coeficiente es adimensional; esto quiere decir que no está afectado por los cambios de unidad de medida de las variables.

- c) Estadístico “F”:** Este estadístico nos permite determinar la existencia de una regresión lineal significativa entre la variable dependiente y las variables explicativas o independientes mediante el nivel del valor crítico, el cual si es cero indica que sí existiría una relación lineal significativa.
- d) Ecuación de Regresión:** El programa SPSS brinda una tabla de coeficientes no estandarizados de la regresión, dicha tabla contiene toda la información que es requerida para la construcción de la ecuación. Además de lo anterior, dicha tabla también brinda los coeficientes de regresión estandarizados o coeficientes Beta de cada variable independiente o explicativa, los cuales da información útil sobre el peso o la importancia relativa que tiene cada variable independiente en la ecuación de regresión. Por lo general, cuanto mayor sea el valor del coeficiente Beta (en valor absoluto) de una variable, mayor será la importancia que tenga ésta sobre la ecuación de regresión.
- e) Análisis de los residuos:** Los residuos son las diferencias entre los valores obtenidos mediante las mediciones directas y los valores obtenidos mediante el modelo de regresión. El análisis de los residuos es importante porque brinda información sobre el grado de precisión del modelo, es así que mientras el error típico sea menor, mejor será el pronóstico que da el modelo. Una característica importante que deben presentar los residuos es su grado de aproximación a una distribución normal, tomando como media 0 y una desviación típica igual al residuo tipificado. Para determinar la existencia de casos atípicos, se debe verificar que el máximo valor absoluto del residuo tipificado no sea mayor a tres veces la desviación típica, esto también se puede observar en un gráfico de probabilidad de

normalidad de los residuos tipificados, en donde las abscisas es la probabilidad acumulada que corresponde a cada residuo tipificado y las ordenadas representa la probabilidad acumulada teórica. Si los puntos de la gráfica se distribuyen en una línea diagonal de inclinación de 45°, entonces los residuos se distribuyen normalmente.

### 3.5 Validación del modelo

El modelo obtenido debe ser una buena aproximación al sistema real, teniendo que incorporar aspectos importantes del sistema, además, debe ser fácil de comprender y manejar. Un factor muy importante es que exista una alta correlación entre lo que el modelo predice y lo que ocurre en el sistema real. Para ello se cuenta con métodos de validación, el que más aplica para este caso es la diferencia de medias.

Los datos obtenidos de las muestras son, por naturaleza, impredecibles; no es de esperarse que tengan la misma media muestral o que sean completamente parecidas. Existen tres casos para la diferencia de medias:

- Cuando las varianzas son desconocidas pero iguales: En este caso se tiene:

Estadístico:

$$S_1^2 = S_2^2$$

$$T = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{s^2}{n_1} + \frac{s^2}{n_2}}} \dots\dots\dots(11)$$

- Cuando las varianzas son desconocidas y diferentes: En este caso se tiene:

Estadístico:

$$S_1^2 \neq S_2^2$$

$$T = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \dots\dots\dots(12)$$

- Cuando las varianzas son conocidas: En este caso se tiene:

Estadístico:

$$Z = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2 - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \dots\dots\dots(13)$$

Para determinar si las varianzas de los grupos poblacionales son iguales o no, se usa el contraste de Levene (F) sobre homogeneidad o igualdad de varianzas. Es así que si la probabilidad (Sig.) asociada al estadístico de Levene es mayor que 0,05 se puede asumir que las varianzas poblacionales son iguales, en caso contrario se rechaza la hipótesis de probabilidad y se asume que las varianzas son distintas.

Además del contraste de Levene, el SPSS también brinda el nivel crítico bilateral (Sig. (bilateral)) asociado al estadístico “t”, el cual informa sobre el grado de compatibilidad entre la diferencia obtenida entre las medias de las muestras poblacionales. Es así que si (Sig. (bilateral)) es mayor que 0,005 se acepta la hipótesis de igualdad de medias.

#### 4. Resultados

##### 4.1 Modelo de estimación del factor de emisión de material particulado $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$

Se realiza un análisis exploratorio a los datos obtenidos con el fin de detectar datos atípicos o fallas en las mediciones. Posterior a ello, se realiza el análisis de regresión múltiple mediante el uso del programa SPSS, el cual nos da como resultado el modelo propuesto.

##### 4.1.1 Comportamiento de los parámetros del modelo

En la tabla 10 se muestra la matriz general de datos obtenidos a partir de las mediciones en campo. Esta tabla reúne todos los datos que usaremos para postular los modelos matemáticos para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . En las dos primeras columnas se presentan como variables independiente a los parámetros ambientales de porcentaje de finos y contenido de humedad, los cuales fueron obtenidos de los estudios de mecánica de suelos de las obras correspondientes, tomando en cuenta la profundidad de la excavación en la cual se encontraban cuando se realizaron las mediciones. Luego, se presenta la precipitación, también como variable independiente, dicho parámetro se obtuvo de las mediciones de la estación meteorológica Campo de Marte y del equipo EVM-7, para la fecha y hora en que se realizaron las mediciones. Las siguientes columnas muestran la velocidad del viento y la humedad relativa, ambas variables independientes fueron tomadas por el equipo EVM-7 en campo. Finalmente se presentan las variables dependientes  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , las cuales fueron de la misma forma medidas en campo con el equipo EVM-7.

En el Anexo 8.3 se muestra la matriz general de datos así como también los resultados del análisis de regresión múltiple.

Tabla 10 – Matriz de parámetros ambientales y factores de emisión medidos en campo.

Porcentaje de finos	Contenido de humedad	Precipitación	Velocidad del viento	Humedad relativa	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>
(%)	(%)	(mm)	(m/s)	(%)	(mg/m3)	(mg/m3)
4,40	2,10	4,50	0,6	83,10	0,079	0,017
4,20	2,20	4,80	0,6	83,10	0,077	0,015
4,20	2,20	4,80	0,9	83,60	0,077	0,015
4,20	2,20	4,80	0,9	83,80	0,077	0,017
4,20	2,40	4,80	1,0	84,80	0,074	0,006
3,30	3,20	5,20	3,3	91,40	0,005	0,003
4,00	2,60	5,00	1,5	86,10	0,035	0,005
2,60	6,20	3,50	0,3	69,30	0,090	0,011
4,10	2,50	5,00	1,5	85,80	0,035	0,005
4,10	2,50	5,00	1,5	85,70	0,035	0,005
4,40	2,10	4,50	0,6	82,50	0,080	0,022
3,30	3,20	5,20	3,5	92,00	0,004	0,002
3,80	3,00	5,20	3,1	89,40	0,006	0,003
3,30	3,20	5,20	3,2	90,50	0,006	0,004
3,80	3,00	5,00	2,4	87,90	0,008	0,004
3,90	2,70	5,00	2,3	87,70	0,009	0,004
3,80	3,00	5,20	2,4	88,30	0,006	0,004
2,40	4,50	1,80	1,5	58,20	0,092	0,054
3,90	2,70	5,00	1,9	87,60	0,012	0,004
3,90	2,70	5,00	1,7	87,50	0,012	0,005
4,00	2,60	5,00	1,6	87,50	0,012	0,005
5,00	1,70	1,80	0,4	77,00	0,204	0,069
4,00	2,60	5,00	1,5	86,60	0,023	0,005
4,10	2,50	5,00	1,4	85,10	0,043	0,005
4,20	2,40	5,00	1,3	85,00	0,051	0,005
4,40	2,10	4,50	0,5	82,10	0,100	0,022
5,00	1,70	3,50	0,4	77,50	0,191	0,069
4,20	2,40	4,80	1,1	84,80	0,067	0,006
5,00	1,70	1,80	0,3	76,70	0,223	0,076
4,50	1,90	3,50	0,5	78,40	0,181	0,069
4,50	1,90	4,50	0,5	82,10	0,170	0,022
4,50	1,90	4,50	0,5	80,10	0,172	0,025

Tabla 11 – Estadísticos descriptivos de cada variable.

Estadísticos descriptivos					
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.
Porcentaje de finos	32	2,40	5,00	4,0375	,58461
Contenido de humedad	32	1,70	6,20	2,6125	,86946
Precipitación	32	1,80	5,20	4,4813	,99204
Velocidad del viento	32	,30	3,50	1,3953	,94565
Humedad relativa	32	58,20	92,00	83,4750	6,65054
Mat. Particulado 10 mic.	32	,00	,22	,0705	,06632
Mat. Particulado 2.5 mic.	32	,00	,08	,0182	,02269
N válido (según lista)	32				

En la tabla 11 se puede observar que la cantidad de datos válidos introducidos para cada variable es de 32, además se muestra los valores estadísticos como mínimo, máximo, media y desviación estándar. Es así que para el  $PM_{10}$  se tiene un valor mínimo de  $0,00 \text{ mg/m}^3$ , un máximo de  $0,22 \text{ mg/m}^3$  y una media de  $0,0705 \text{ mg/m}^3$ .

De las figuras 16 a la 22 se muestran los histogramas para cada variable con el objetivo de poder visualizar la distribución que presentan los datos.

En la figura 16 se muestra el histograma del porcentaje de finos, como se puede observar, presenta una distribución normal con una media de 4,04% y una desviación estándar de 0,585%. Además de ello, se observa una baja frecuencia de datos con valores de aproximadamente 2,5%.

En el histograma del contenido de humedad (Fig 17) se aprecia una distribución normal asimétrica pegada a la izquierda con una media de 2,61% y una desviación estándar de 0,869%. Por su parte, en la Fig. 18 se muestra el histograma de la precipitación en donde se observa una distribución normal asimétrica pegada a la derecha con una media de 4,48 mm y una desviación estándar de 0,992 mm.



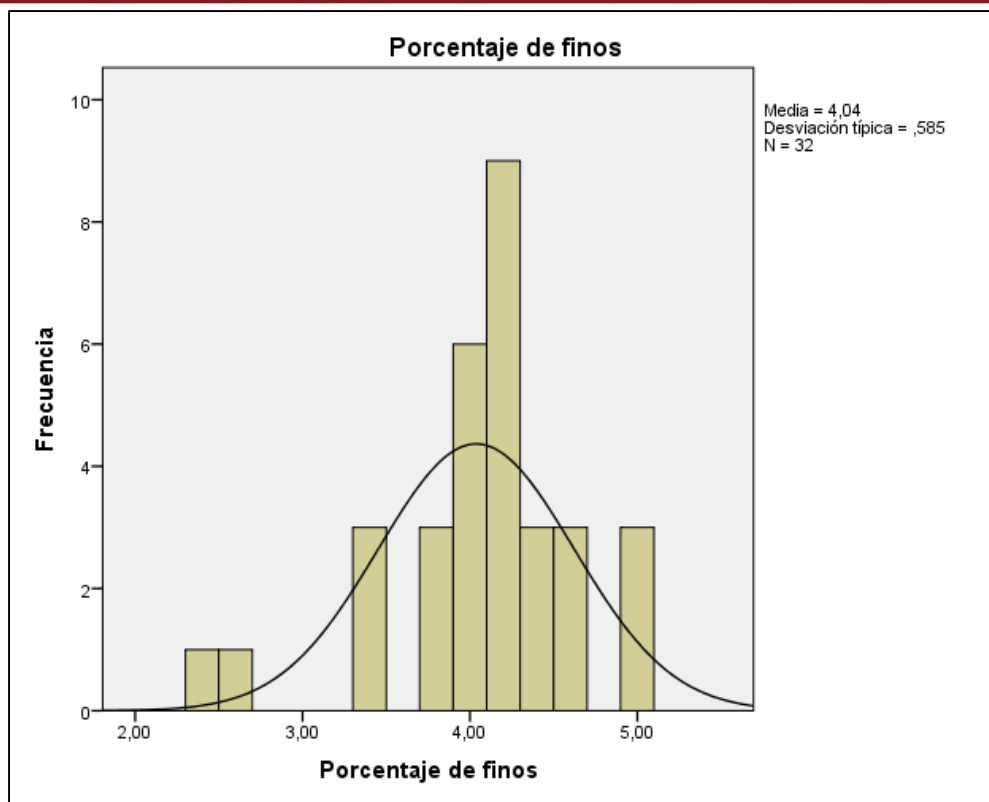


Figura 16 – Histograma de porcentaje de finos.

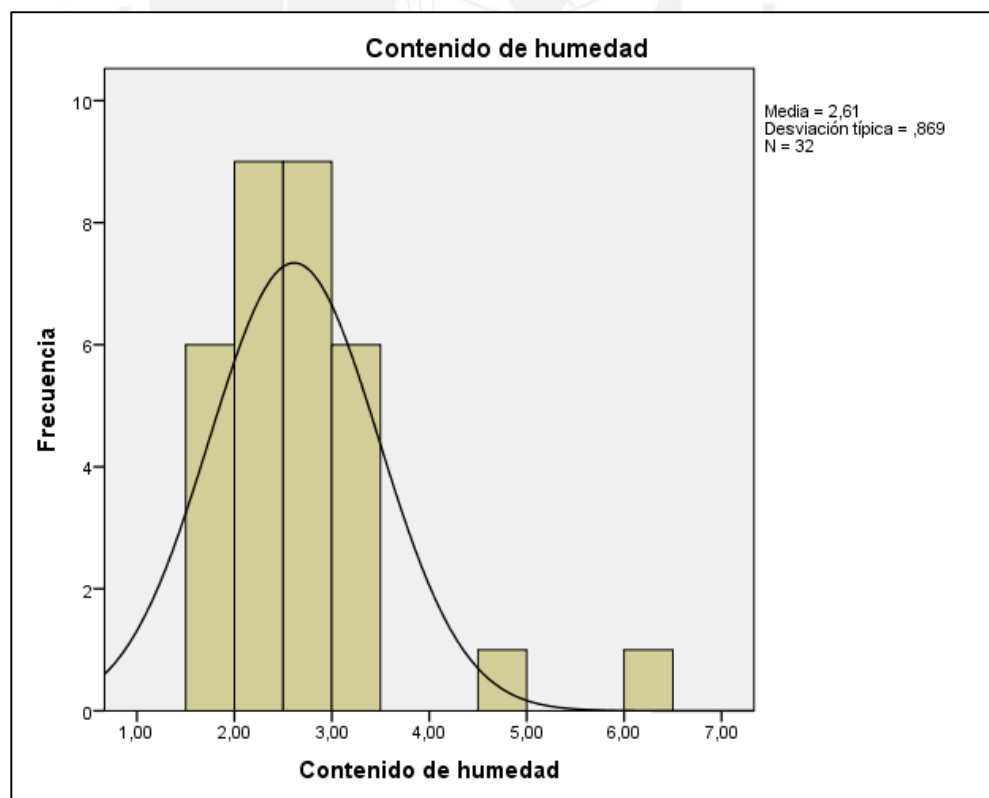


Figura 17 – Histograma de contenido de humedad.

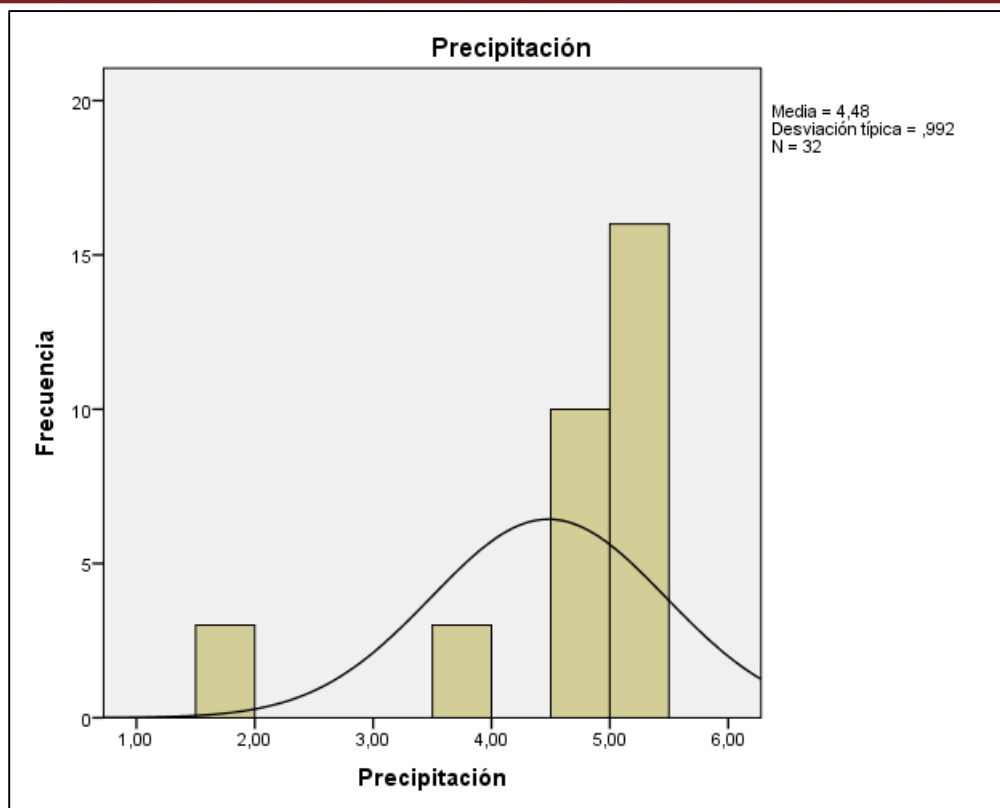


Figura 18 – Histograma de precipitación.

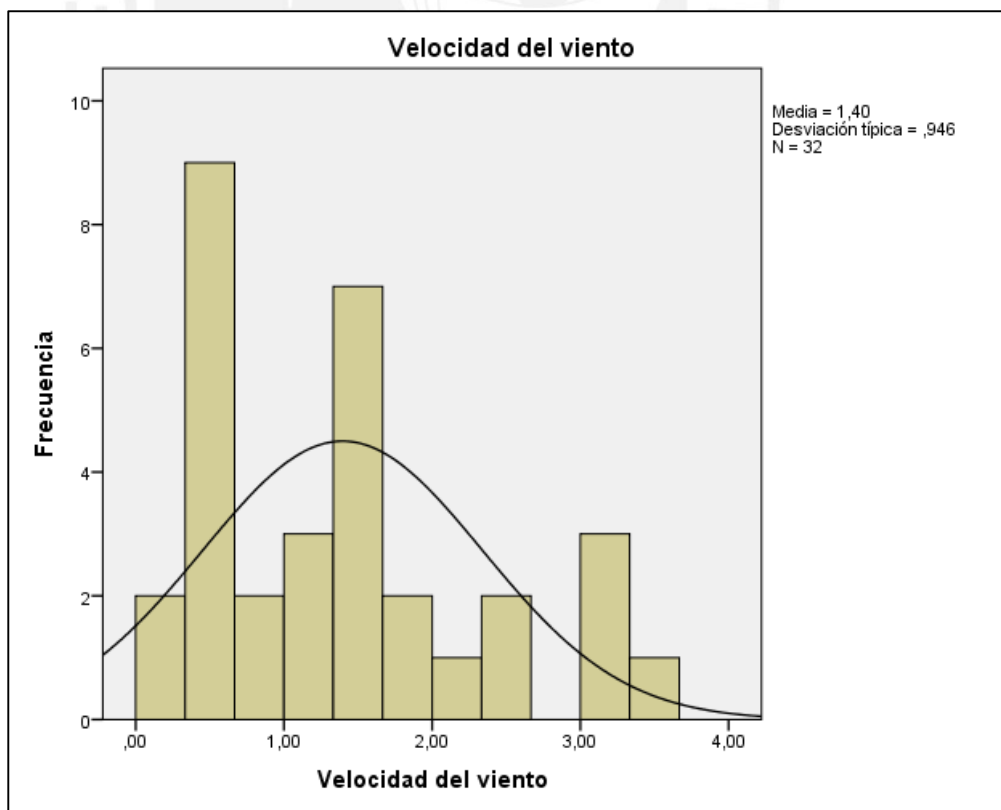


Figura 19 – Histograma de velocidad del viento.

En el histograma de la velocidad del viento (Fig. 19) se observa una distribución normal y además, dos picos de alta frecuencia, en donde la media es de 1,40m/s y la desviación estándar es de 0,946m/s.

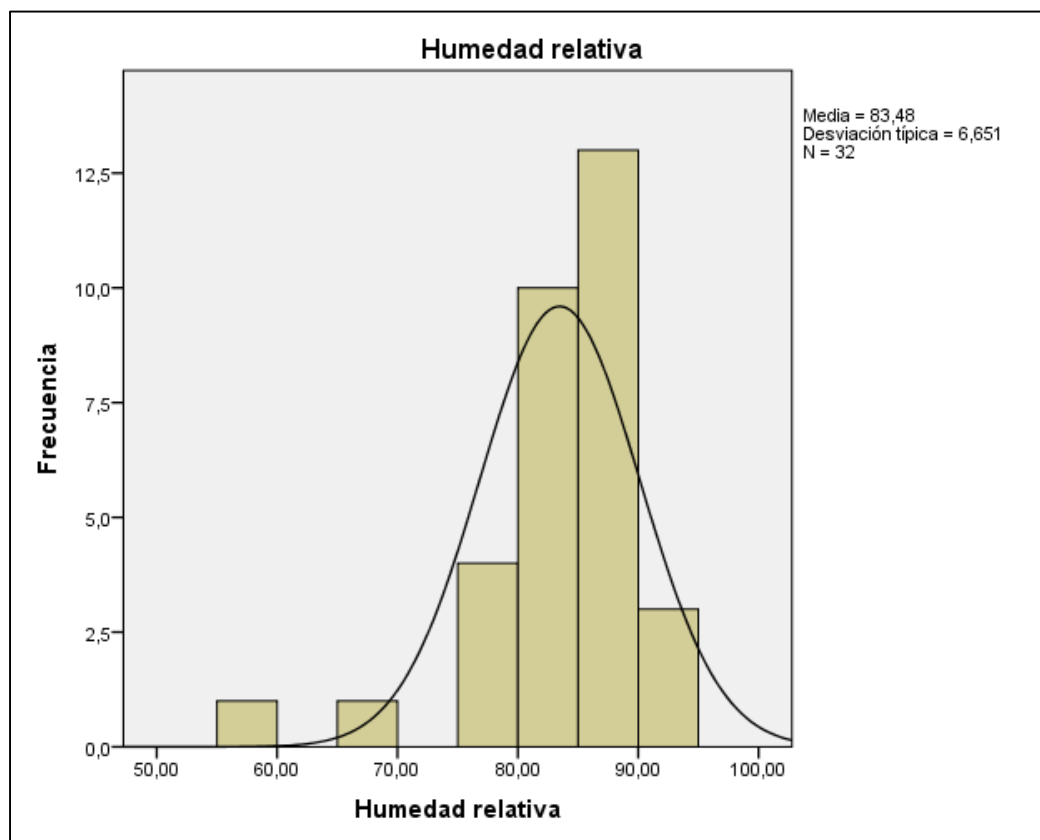


Figura 20 – Histograma de la humedad relativa.

La humedad relativa también presenta una distribución normal asimétrica pegada a la derecha con una media de 83,48% y una desviación estándar de 6,651%, tal como se observa en la figura 20.

En la figura 21 se muestra el histograma del  $PM_{10}$ , en donde se indica que la media es de 0,07  $mg/m^3$  y la desviación estándar de 0,066  $mg/m^3$ .

El histograma del  $PM_{2.5}$  se muestra en la figura 22, en donde la media es de 0,02  $mg/m^3$  y la desviación estándar es de 0,023  $mg/m^3$ .

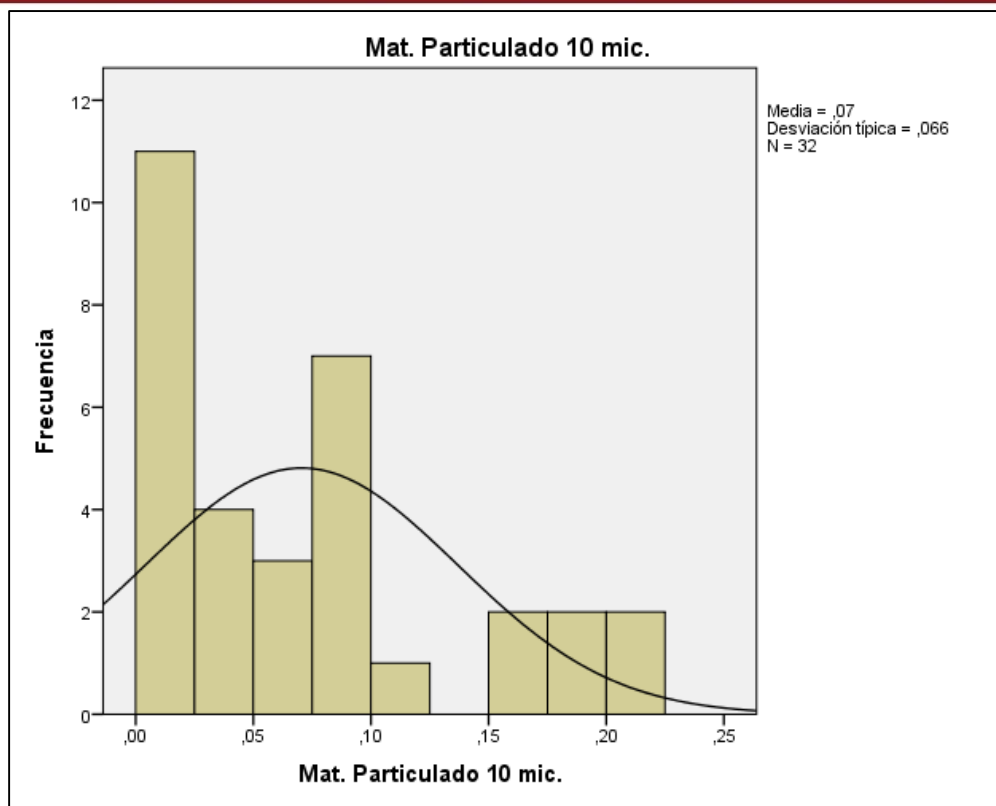


Figura 21 – Histograma de Mat. Particulado 10 mic.

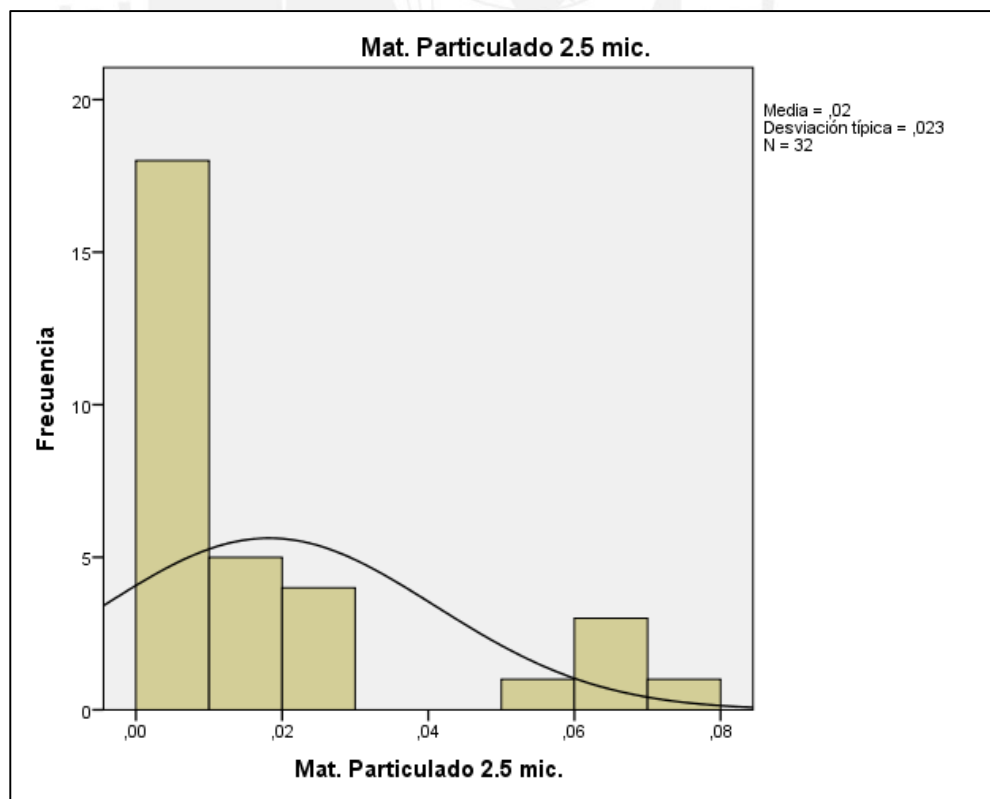


Figura 22 - Histograma de Mat. Particulado 2,5 mic.

#### 4.1.2 Análisis de regresión del modelo

##### – PM<sub>10</sub>

Tabla 12 – Variables introducidas (PM<sub>10</sub>)

Variables introducidas/eliminadas <sup>a</sup>			
Modelo	Variables introducidas	Variables eliminadas	Método
1	Humedad relativa, Porcentaje de finos, Precipitación, Velocidad del viento, Contenido de humedad <sup>b</sup>		Introducir

a. Variable dependiente: Mat. Particulado 10 mic.

b. Todas las variables solicitadas introducidas.

Como se puede observar de la tabla 12, las variables independientes introducidas son la humedad relativa, el porcentaje de finos, la precipitación, la velocidad del viento y el contenido de humedad. Además de ello, se introdujo al programa como variable dependiente al material particulado PM<sub>10</sub>. El objetivo es determinar una expresión en términos de una ecuación lineal que conecte la variable de respuesta o dependiente con las demás variables explicativas o independientes, es decir, ajustar un modelo lineal que permita predecir la emisión de material particulado en función de las variables introducidas.

Tabla 13 – Resumen del modelo (PM<sub>10</sub>)

Resumen del modelo <sup>b</sup>					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Durbin-Watson
1	,928 <sup>a</sup>	,861	,834	,02702	,944

a. Variables predictoras: (Constante), Humedad relativa, Porcentaje de finos, Precipitación, Velocidad del viento, Contenido de humedad

b. Variable dependiente: Mat. Particulado 10 mic.

Se obtuvo el modelo con un coeficiente de determinación R cuadrado ( $R^2$ ) de 0,861, tal como se muestra en la tabla 13, esto indica que el 86,1% de la variación total del PM<sub>10</sub> en la muestra



queda explicada por las variables independientes y según la tabla 9, el modelo está calificado como muy bueno y proporciona un buen ajuste.

Tabla 14 – Resumen del análisis de la varianza (PM<sub>10</sub>)

ANOVA <sup>a</sup>						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	,117	5	,023	32,158	,000 <sup>b</sup>
	Residual	,019	26	,001		
	Total	,136	31			

a. Variable dependiente: Mat. Particulado 10 mic.

b. Variables predictoras: (Constante), Humedad relativa, Porcentaje de finos, Precipitación, Velocidad del viento, Contenido de humedad

Como se puede observar de la tabla anterior, el valor del nivel crítico Sig. para el estadístico F es igual a cero, con lo cual se confirma que al menos una variable influye en los resultados del PM<sub>10</sub>.

Tabla 15 – Constante y coeficientes de las variables explicativas (PM<sub>10</sub>)

Coeficientes <sup>a</sup>													
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados		t	Sig.	Correlaciones			Estadísticos de colinealidad		
		B	Error típ.	Beta				Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV	
1	(Constante)	,200	,169			1,181	,248						
	Porcentaje de finos	,058	,039	,507		1,481	,151	,585	,279	,108	,046	21,932	
	Contenido de humedad	,001	,017	,014		,063	,950	-,393	,012	,005	,103	9,673	
	Precipitación	-,025	,014	-,377		-1,815	,081	-,761	-,335	-,133	,124	8,072	
	Velocidad del viento	-,009	,016	-,134		-,592	,559	-,782	-,115	-,043	,105	9,522	
	Humedad relativa	-,003	,003	-,286		-,949	,352	-,621	-,183	-,069	,059	17,032	

a. Variable dependiente: Mat. Particulado 10 mic.

En la tabla 15 se muestra los coeficientes no estandarizados, los cuales corresponden a la constante y a los coeficientes de las variables independientes de la ecuación de regresión. También, muestra los coeficientes estandarizados Beta, con los cuales se observa que la variable de porcentaje de finos es la más importante, luego le sigue la precipitación, la humedad relativa, velocidad del viento, y por último, el contenido de humedad.

Tabla 16 – Resumen de constante y coeficientes de las variables (PM<sub>10</sub>)

Constante	0,200
Porcentaje de finos (PF)	0,058
Contenido de humedad (CH)	0,001
Precipitación (PP)	-0,025
Velocidad del viento (VV)	-0,009
Humedad relativa (HR)	-0,003

De los valores de la constante y de los coeficientes de las variables explicativas mostradas en la tabla 16, se postula la ecuación de regresión que corresponde al modelo predictivo del factor de emisión de PM<sub>10</sub>, el cual se muestra en la ecuación 14.

$$FE = 0,200 + 0,058xPF + 0,001xCH - 0,025xPP - 0,009xVV - 0,003xHR.....(14)$$

Tabla 17 – Estadísticos sobre los residuos (PM<sub>10</sub>)

Estadísticos sobre los residuos <sup>a</sup>					
	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica	N
Valor pronosticado	-,0335	,2221	,0705	,06153	32
Valor pronosticado tip.	-1,690	2,464	,000	1,000	32
Error típico de valor pronosticado	,006	,026	,010	,006	32
Valor pronosticado corregido	-,4465	,5652	,0676	,14283	32
Residual	-,02983	,06181	,00000	,02474	32
Residuo típ.	-1,104	2,288	,000	,916	32
Residuo estud.	-4,074	4,096	,019	1,410	32
Residuo eliminado	-,47319	,53647	,00295	,13146	32
Residuo eliminado estud.	-6,641	6,744	,044	1,973	32
Dist. de Mahalanobis	,379	28,712	4,844	7,263	32
Distancia de Cook	,000	62,911	3,503	13,800	32
Valor de influencia centrado	,012	,926	,156	,234	32

a. Variable dependiente: Mat. Particulado 10 mic.

De la tabla 17 se observa que la desviación típica para el residuo tipificado es de 0,916 y que el máximo valor del residuo tipificado es de 2,288, el cual es menor a 3 veces la desviación típica (2,748).

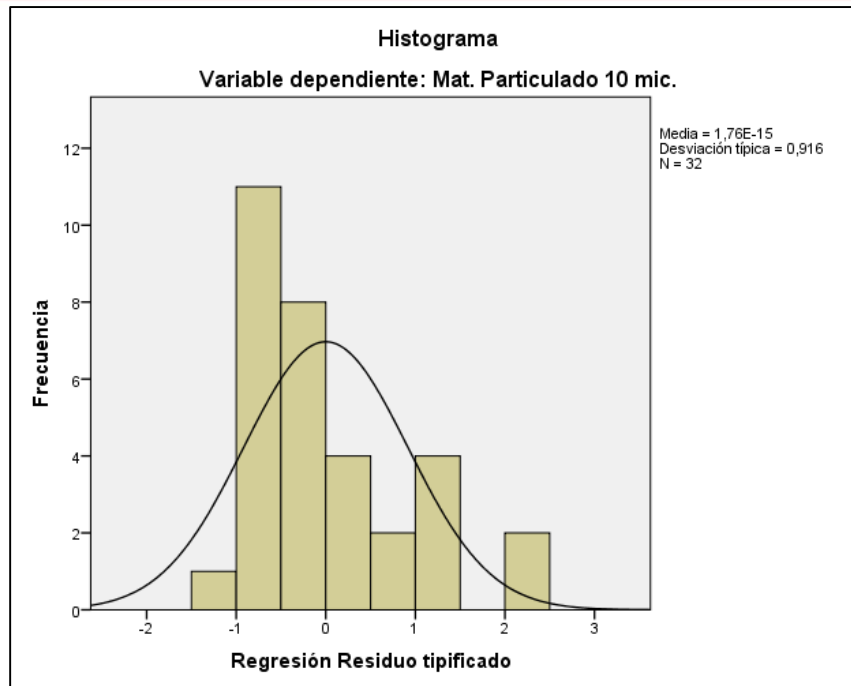


Figura 23 – Histograma de la regresión de residuo tipificado ( $PM_{10}$ )

En el histograma de la figura 23 se observa que existe una alta concentración de casos en la parte central de la distribución (valores cercanos a cero). También, se aprecia una distribución algo asimétrica en la parte positiva del histograma.

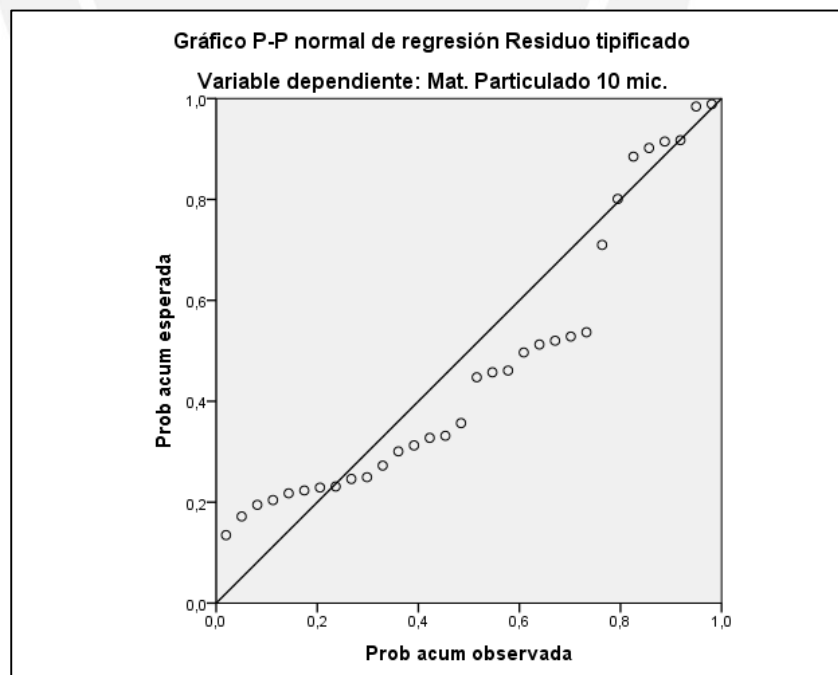


Figura 24 - Gráfico P-P normal de regresión Residuo tipificado ( $PM_{10}$ )

En el gráfico de probabilidad normal que se muestra en la figura 24, se puede observar que los puntos no se encuentran perfectamente alineados sobre la línea diagonal del gráfico, pero si muestran una tendencia lineal.

– **PM<sub>2.5</sub>**

Tabla 18 – Variables introducidas (PM<sub>2.5</sub>)

Variables introducidas/eliminadas <sup>a</sup>			
Modelo	Variables introducidas	Variables eliminadas	Método
1	Humedad relativa, Porcentaje de finos, Precipitación, Velocidad del viento, Contenido de humedad <sup>b</sup>		Introducir

a. Variable dependiente: Mat. Particulado 2.5 mic.

b. Todas las variables solicitadas introducidas.

Como se observa, las variables independientes introducidas son: humedad relativa, porcentaje de finos, precipitación, velocidad del viento y el contenido de humedad. Además, la variable dependiente introducida es el material particulado PM<sub>2.5</sub>. Se determinará una expresión en términos de una ecuación lineal que permita predecir la emisión de material particulado PM<sub>2.5</sub> en función de las variables introducidas.

Tabla 19 – Resumen del modelo (PM<sub>2.5</sub>)

Resumen del modelo <sup>b</sup>					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Durbin-Watson
1	,953 <sup>a</sup>	,909	,891	,00748	2,373

a. Variables predictoras: (Constante), Humedad relativa, Porcentaje de finos, Precipitación, Velocidad del viento, Contenido de humedad

b. Variable dependiente: Mat. Particulado 2.5 mic.

Con el uso del programa se realizó el análisis con el cual se obtiene los coeficientes de la ecuación de regresión lineal, como resultado el coeficiente de determinación R cuadrado (R<sup>2</sup>) es 0,909 tal como se muestra en la tabla 19, esto indica que el 90,9% de la variación total del

PM<sub>2.5</sub> en la muestra queda explicada por las variables independientes y según la tabla 9, el modelo está calificado como muy bueno y proporciona un buen ajuste.

Tabla 20 – Resumen del análisis de la varianza (PM<sub>2.5</sub>)

ANOVA <sup>a</sup>						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	,014	5	,003	51,781	,000 <sup>b</sup>
	Residual	,001	26	,000		
	Total	,016	31			

a. Variable dependiente: Mat. Particulado 2.5 mic.

b. Variables predictoras: (Constante), Humedad relativa, Porcentaje de finos, Precipitación, Velocidad del viento, Contenido de humedad

Como se puede observar de la tabla anterior, el valor del nivel crítico Sig. para el estadístico F es igual a cero, con lo cual se confirma que al menos una variable influye en los resultados de PM<sub>2.5</sub>.

Tabla 21 – Constante y coeficientes de las variables explicativas (PM<sub>2.5</sub>)

Coeficientes <sup>a</sup>													
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados		t	Sig.	Correlaciones			Estadísticos de colinealidad		
		B	Error típ.	Beta				Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV	
1	(Constante)	,140	,047			2,992	,006						
	Porcentaje de finos	,017	,011	,432	1,556	,132	,431	,292	,092	,046	21,932		
	Contenido de humedad	-,004	,005	-,156	-,849	,403	-,298	-,164	-,050	,103	9,673		
	Precipitación	-,015	,004	-,635	-3,774	,001	-,889	-,595	-,224	,124	8,072		
	Velocidad del viento	-,008	,004	-,322	-1,764	,090	-,565	-,327	-,104	,105	9,522		
	Humedad relativa	-,001	,001	-,438	-1,790	,085	-,670	-,331	-,106	,059	17,032		

a. Variable dependiente: Mat. Particulado 2.5 mic.

En la tabla 21 se muestra los coeficientes no estandarizados, los cuales corresponden a la constante y a los coeficientes de las variables independientes de la ecuación de regresión. Dichos valores se resumen en la tabla 22.

La tabla 21 también muestra los coeficientes estandarizados Beta, en donde vemos que la variable precipitación es la más importante, luego le sigue la humedad relativa, porcentaje de finos, velocidad del viento, y por último, el contenido de humedad.

Tabla 22 – Resumen de constante y coeficientes de las variables (PM<sub>2.5</sub>)

Constante	0,140
Porcentaje de finos (PF)	0,017
Contenido de humedad (CH)	-0,004
Precipitación (PP)	-0,015
Velocidad del viento (VV)	-0,008
Humedad relativa (HR)	-0,001



Con los valores mostrados en la tabla 22 se crea la ecuación que corresponde al caso del factor de emisión de  $PM_{2.5}$ , el cual se muestra en la ecuación 15.

$$FE = 0,140 + 0,017xPF - 0,004xCH - 0,015xPP - 0,008xVV - 0,001xHR.....(15)$$

Tabla 23 – Estadísticos sobre los residuos ( $PM_{2.5}$ )

Estadísticos sobre los residuos <sup>a</sup>					
	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica	N
Valor pronosticado	-,0041	,0790	,0182	,02163	32
Valor pronosticado tip.	-1,031	2,810	,000	1,000	32
Error típico de valor pronosticado	,002	,007	,003	,002	32
Valor pronosticado corregido	-,0961	,1685	,0183	,03976	32
Residual	-,00998	,02522	,00000	,00685	32
Residuo típ.	-1,334	3,370	,000	,916	32
Residuo estud.	-3,560	3,549	-,003	1,313	32
Residuo eliminado	-,11454	,10713	-,00005	,02952	32
Residuo eliminado estud.	-4,877	4,846	,028	1,627	32
Dist. de Mahalanobis	,379	28,712	4,844	7,263	32
Distancia de Cook	,000	36,939	2,234	8,567	32
Valor de influencia centrado	,012	,926	,156	,234	32

a. Variable dependiente: Mat. Particulado 2.5 mic.

De la tabla 23 se observa que la desviación típica para el residuo tipificado es de 0,916 y que el máximo valor del residuo tipificado es de 3,370, el cual es mayor a 3 veces la desviación típica (2,748).

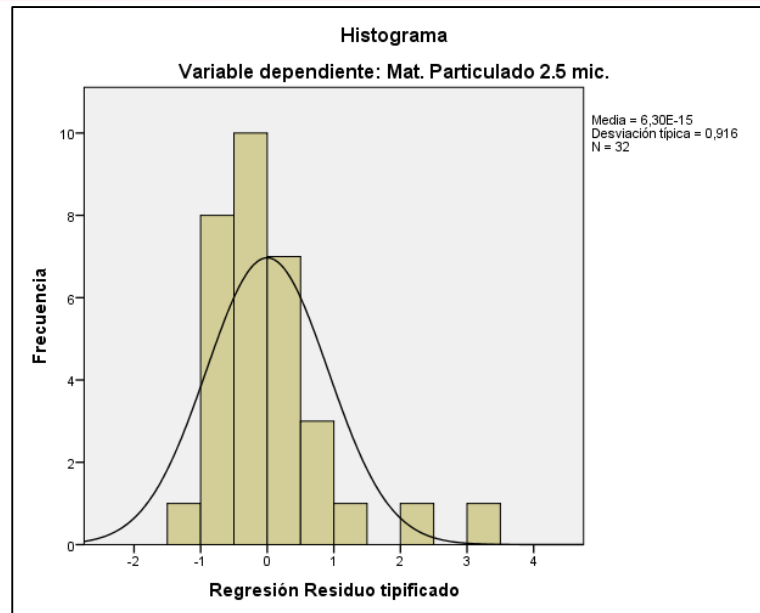


Figura 25 – Histograma de la regresión de residuo tipificado (PM<sub>2,5</sub>)

En el histograma de la figura 25 se aprecia que hay una alta concentración de casos en la parte central de la distribución (valores cercanos a cero). Además de ello, se observa los casos atípicos en la cola derecha de la distribución haciendo que esta distribución sea algo asimétrica en la parte positiva del histograma.

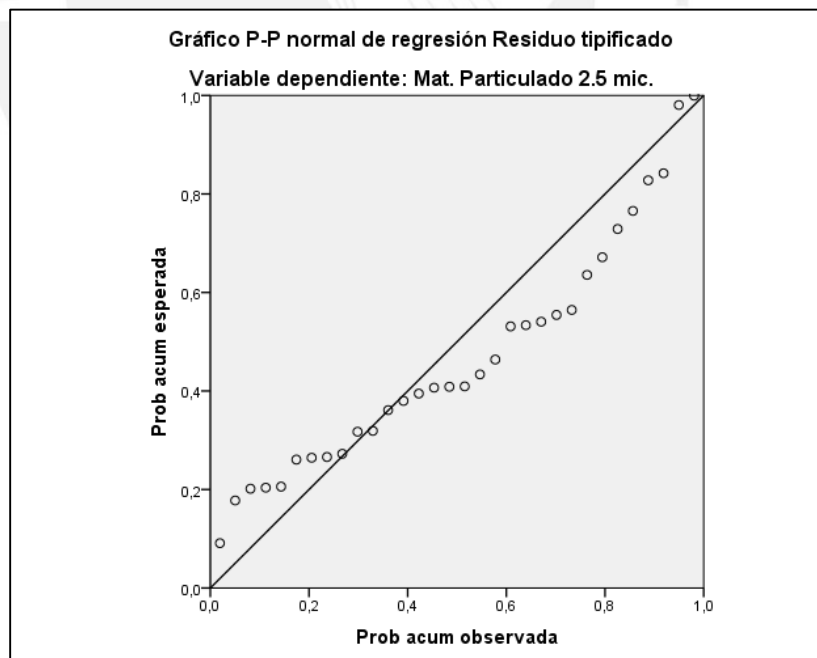


Figura 26 - Gráfico P-P normal de regresión Residuo tipificado (PM<sub>2,5</sub>)

En el gráfico de probabilidad normal que se muestra en la figura 26, se observa que los puntos presentan una tendencia a línea diagonal gráfico pero que no se encuentran perfectamente alineados sobre dicha línea.

## 4.2 Validación del modelo

### 4.2.1 Diferencia de medias

La diferencia de medias se realiza sobre dos grupos poblacionales independientes, el primer grupo consiste en los valores de material particulado observados y medidos en obra; mientras que el segundo grupo consiste en los valores de material particulado pronosticados por el modelo o la ecuación de regresión.

Para cada grupo poblacional se considera una cantidad de 10 muestras y se hizo el análisis de prueba T considerando muestras independientes. En las siguientes tablas se muestra el análisis para cada caso de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ .

#### – $PM_{10}$

Tabla 24 – Estadísticos de los grupos ( $PM_{10}$ )

Estadísticos de grupo					
	X	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
PM10	Medido	10	88,5000	71,01839	22,45799
	Pronosticado	10	88,9000	70,03721	22,14771

Como se observa de la tabla anterior, la cantidad de datos para cada grupo es de 10, además, la media del grupo “Medido” es de 88,50 mientras que para el grupo “Pronosticado” es de 88,90. Las desviaciones típicas y los errores típicos de la media también presentan valores similares entre ambos grupos.

Tabla 25 – Prueba de diferencia de medias de muestras independientes ( $PM_{10}$ )

Prueba de muestras independientes										
		Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia	95% intervalo de confianza para la diferencia	
									Inferior	Superior
PM10	Se han asumido varianzas iguales	,005	,944	-,013	18	,990	-,40000	31,54175	-66,66677	65,86677
	No se han asumido varianzas iguales			-,013	17,997	,990	-,40000	31,54175	-66,66768	65,86768

En la tabla 25 se muestra la prueba de diferencia de medias, se observa que la probabilidad (Sig.) asociada al estadístico de Levene (F) es mayor que cero (0,944), por tanto, se supone que las varianzas poblacionales son iguales.

En esta tabla también se puede observar el estadístico “t”, sus grados de libertad, el nivel crítico bilateral, la diferencia de medias de las dos poblaciones (medido y pronosticado), el error típico de la diferencia y los límites superior e inferior del intervalo de confianza al 95 por ciento.

En este caso, como muestra la tabla, el estadístico “t” toma el valor de -0,013 y el nivel crítico bilateral (Sig. (bilateral)) es 0,990. Por lo tanto, se acepta la hipótesis de igualdad de medias, tomando en cuenta el contraste de Levene que exige un valor del estadístico “t” mayor a 0,005.

– **PM<sub>2.5</sub>**

Tabla 26 – Estadísticos de los grupos (PM<sub>2.5</sub>)

Estadísticos de grupo					
	X	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
PM <sub>2.5</sub>	Medido	10	44,5000	24,80703	7,84467
	Pronosticado	10	45,7000	24,10648	7,62314

Como se observa en la tabla anterior, la cantidad de datos para cada grupo es de 10, además, la media del grupo “Medido” es de 44,50 mientras que para el grupo “Pronosticado” es de 45,70. Las desviaciones típicas y los errores típicos de la media también presentan valores similares entre ambos grupos.

Tabla 27 – Prueba de diferencia de medias de muestras independientes (PM<sub>2.5</sub>)

Prueba de muestras independientes										
		Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
									Inferior	Superior
PM <sub>2.5</sub>	Se han asumido varianzas iguales	,059	,811	-,110	18	,914	-1,20000	10,93852	-24,18097	21,78097
	No se han asumido varianzas iguales			-,110	17,985	,914	-1,20000	10,93852	-24,18232	21,78232

En la prueba de diferencia de medias para PM<sub>2.5</sub> se observa que la probabilidad (Sig.) asociada al estadístico de Levene (F) es mayor que cero (0,811), por tanto, se supone que las varianzas poblacionales son iguales.

En este caso, el estadístico “t” toma el valor de -0,110 y el nivel crítico bilateral (Sig. (bilateral)) es 0,914. Por lo tanto, se acepta la hipótesis de igualdad de medias, tomando en cuenta el contraste de Levene que exige un valor del estadístico “t” mayor a 0,005.

#### 4.2.2 Comparación entre el modelo propuesto y la medición directa

El modelo se pone a prueba mediante la comparación entre el factor de emisión que se obtiene mediante la aplicación de la ecuación propuesta y el factor de emisión obtenido de los resultados de las mediciones directas.

##### Edificio Génova

Según el reporte de estudio de suelos, las características geotécnicas presentadas en el área corresponde a un suelo conformado por gravas arenosas tipo GP (clasificación SUCS) para una profundidad de entre 2,10 y 12,0 m. La granulometría realizada sobre las distintas muestras de suelo se distribuye en grava y material grueso entre 73 a 85%, arena entre 15 a 28% y material fino entre 2 a 5%. Por último, el contenido de humedad está entre 3 a 6%. Además, según información meteorológica del día, la precipitación estimada es de 2 mm.

Como se observa en las siguientes imágenes, la excavación se encuentra a una profundidad de aproximadamente 8 metros.



Figura 27 – Excavación y depósito del material al camión volquete.

*Fuente: Propia*



– PM<sub>10</sub>

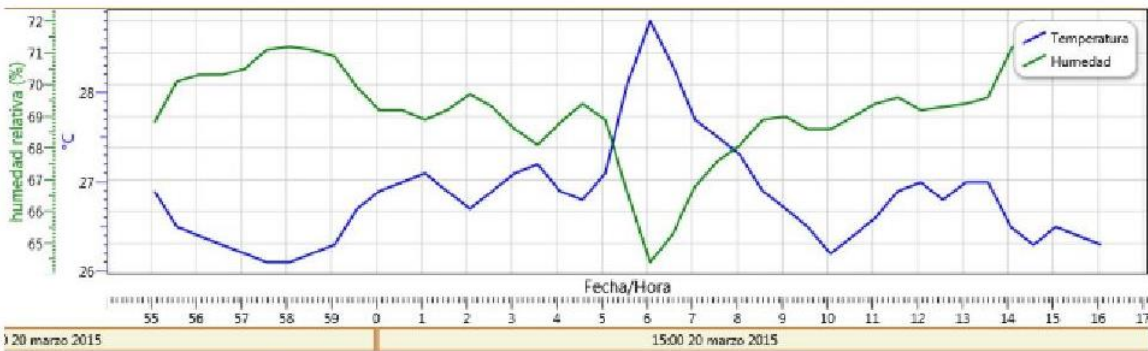
<b>Panel general de datos</b>			
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Promedio de temperatura	26,8 °C	Mín. de temperatura	26 °C
Máx. de temperatura	28,9 °C	Tiempo mín. de temperatura	20/03/2015 02:57:43 p.m.
Tiempo máx. de temperatura	20/03/2015 03:06:08 p.m.	Humedad máxima	72,0 %
Humedad promedio	69,3 %	Humedad mínima	64,0 %
Fecha de humedad máxima	20/03/2015 03:14:32 p.m.	Fecha de humedad mínima	20/03/2015 03:06:13 p.m.
Promedio de polvo	0,004 mg/m <sup>3</sup>	Mín. de polvo	0 mg/m <sup>3</sup>
Máx. de polvo	0,09 mg/m <sup>3</sup>	STEL de polvo	0,006 mg/m <sup>3</sup>
TWA de polvo	0 mg/m <sup>3</sup>	Tiempo mínimo de polvo	20/03/2015 03:11:56 p.m.
Tiempo máximo de polvo	20/03/2015 02:54:35 p.m.	Tiempo de STEL máx. de polvo	20/03/2015 03:09:34 p.m.
C02Ave	53 PPM	C02Min	35 PPM
C02Max	91 PPM	C02STEL	54 PPM
C02TWA	2 PPM	C02MinTime	20/03/2015 02:57:18 p.m.
C02MaxTime	20/03/2015	C02STELTime	20/03/2015

Figura 28 – Plan general de datos Edificio Genova para PM<sub>10</sub>

Como se observare de la figura 28, el reporte indica, entre otros datos, el valor de la temperatura (máx = 28,9°C, min = 26°C y prom = 26,8°C), el valor de la humedad (máx = 72,0%, min = 64,0% y prom = 69,3%) además, muestra la cantidad máxima (0,09 mg/m<sup>3</sup>), mínima (0 mg/m<sup>3</sup>) y promedio (0,004 mg/m<sup>3</sup>) de polvo o material particulado. Además de ello, se registró, durante los trabajos de medición, una velocidad del viento de 0,3 m/s (ver Anexo 8.2).

**Gráfica de datos de registro**

EVM0407\_EML060009\_20032015\_181221: Gráfica de datos de registro



**Gráfica de datos de registro**

EVM0407\_EML060009\_20032015\_181221: Gráfica de datos de registro

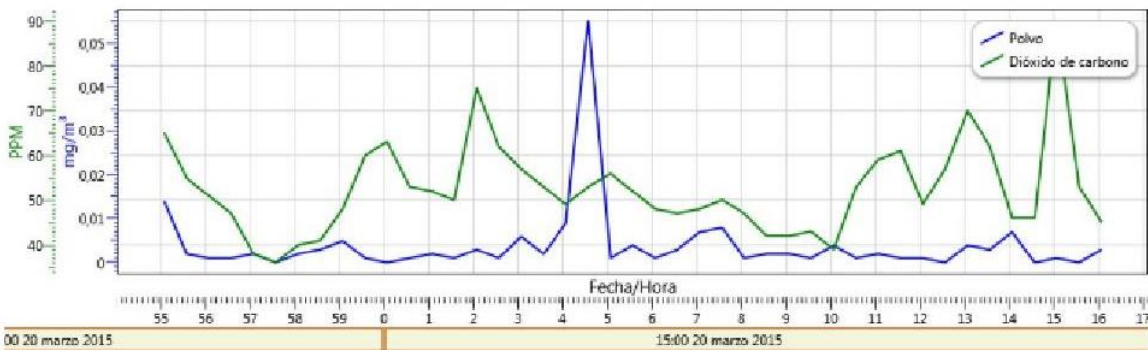


Figura 29 – Gráfica de datos de registro Edificio Genova para PM<sub>10</sub>

En los gráficos de la figura 29 se aprecia la variación de la emisión de polvo o material particulado en función del tiempo, como se ve, la cantidad de emisión no es alta y presenta un pico máximo. Es probable que el pico registrado corresponda a los instantes en el que los trabajos de excavación se realizaron a una distancia próxima al equipo. Debido a lo anterior, se trabaja con el valor máximo de emisión de polvo o material particulado registrado por el sensor EVM-7, el cual es 0,09 mg/m<sup>3</sup> (ver Anexo 8.2).

- PM<sub>2.5</sub>

<b>Panel general de datos</b>			
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Promedio de temperatura	25,7 °C	Mín. de temperatura	25,2 °C
Máx. de temperatura	26,4 °C	Tiempo mín. de temperatura	20/03/2015 03:53:21 p.m.
Tiempo máx. de temperatura	20/03/2015 03:42:10 p.m.	Humedad máxima	75,4 %
Humedad promedio	73,4 %	Humedad mínima	71,4 %
Fecha de humedad máxima	20/03/2015 03:51:54 p.m.	Fecha de humedad mínima	20/03/2015 04:02:43 p.m.
Promedio de polvo	0 mg/m <sup>3</sup>	Mín. de polvo	0 mg/m <sup>3</sup>
Máx. de polvo	0,011 mg/m <sup>3</sup>	STEL de polvo	0 mg/m <sup>3</sup>
TWA de polvo	0 mg/m <sup>3</sup>	Tiempo mínimo de polvo	20/03/2015 03:43:25 p.m.
Tiempo máximo de polvo	20/03/2015 03:42:10 p.m.	Tiempo de STEL máx. de polvo	20/03/2015 03:57:10 p.m.
C02Ave	40 PPM	C02Min	31 PPM
C02Max	61 PPM	C02STEL	40 PPM
C02TWA	1 PPM	C02MinTime	20/03/2015 03:53:17 p.m.
C02MaxTime	20/03/2015	C02STELTime	20/03/2015

Figura 30 – Plan general de datos Edificio Genova para PM<sub>2.5</sub>

Como se observa de la figura 30, el reporte indica, entre otros datos, el valor de la temperatura (máx = 26,4°C, min = 25,2°C y prom = 25,7°C), el valor de la humedad (máx = 75,4%, min = 71,4% y prom = 73,4%) además, muestra la cantidad máxima (0,011 mg/m<sup>3</sup>), mínima (0 mg/m<sup>3</sup>) y promedio (0 mg/m<sup>3</sup>) de polvo o material particulado. Además de ello, se registró, durante los trabajos de medición, una velocidad del viento de 1,65 m/s (ver Anexo 8.2).

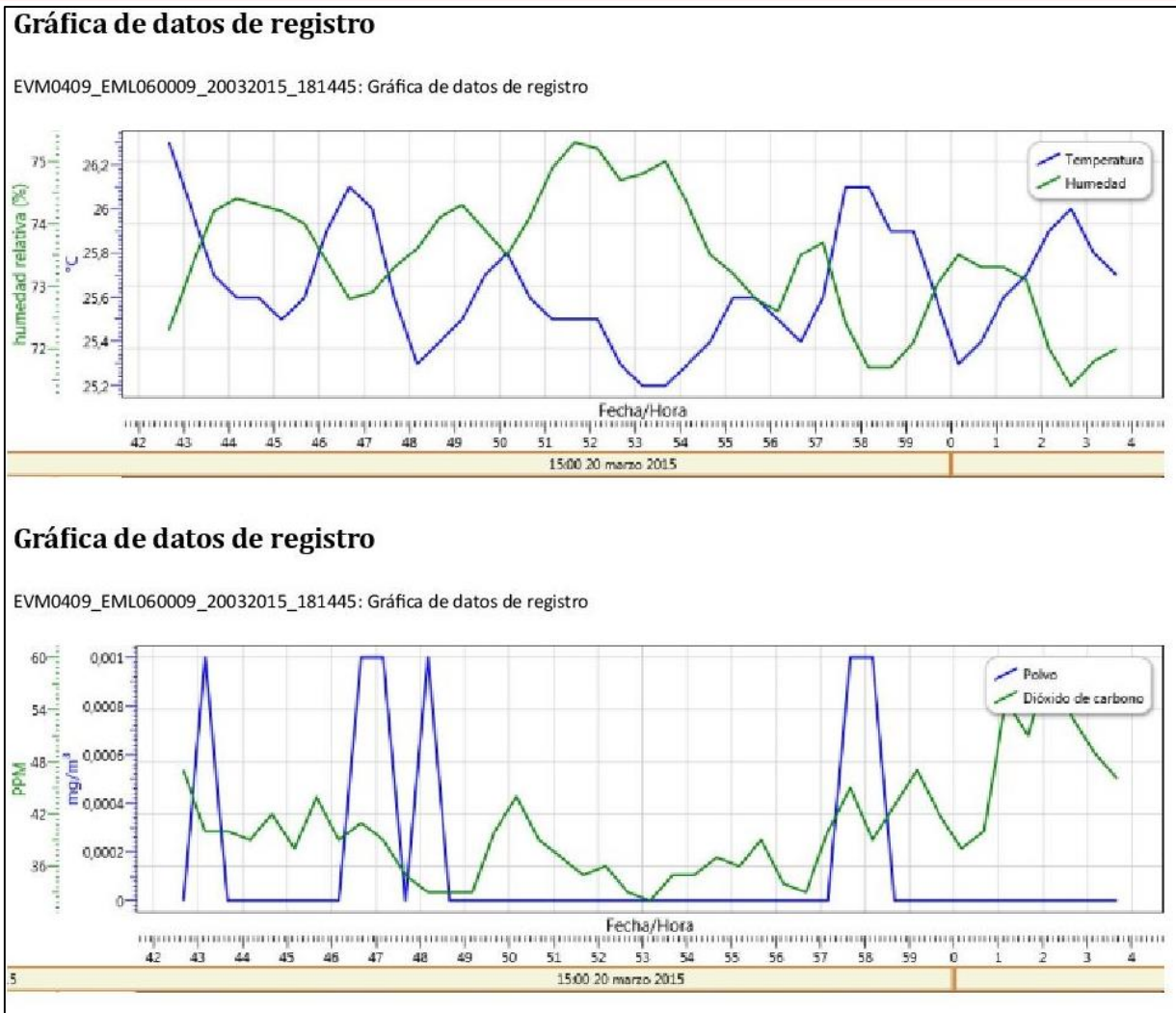


Figura 31 – Gráfica de datos de registro Edificio Genova para PM<sub>2.5</sub>

Al igual que en el caso del PM<sub>10</sub>, se observa la variación de la emisión de polvo o material particulado en función del tiempo. La cantidad de emisión no es alta y presenta varios picos máximos. Como se explicó anteriormente, los trabajos de excavación durante la medición se realizaron distanciados del equipo de medición; sin embargo, hubo períodos en los que se realizaron a una distancia cercana del equipo. Debido a ello, se puede estimar que los picos registrados corresponden a los instantes en el que los trabajos de excavación se realizaron a una distancia próxima al equipo. Por lo tanto, se considera el valor máximo de emisión de polvo o material particulado registrado por el sensor EVM-7, el cual es 0,011 mg/m<sup>3</sup> (ver Anexo 8.2).



### Edificio Flat Arequipa

Para este proyecto, según es estudio de suelos, el suelo está conformado por limos arenosos de una plasticidad baja, poco compacto y en estado húmedo. Para el estrato superior, de una profundidad de hasta 1,50 m, se encontró suelo con clasificación SUCS GM-GC con una proporción de grava de 41,1%, arena de 29,1% y finos de 29,8%. En el estrato inferior, de una profundidad de hasta 20 m, se encontró suelos conformados por gravas subredondeadas, bolonería mediana y cantos rodados con una matriz de arena limosa de grano fino, con clasificación SUCS de GP, con una proporción de grava de 83,9%, arena 13,8% y material fino de 2,3%; además, se encontró que la humedad es del 1,3%.

En el caso de este proyecto, la excavación se encontró aproximadamente a una profundidad de 20 metros, tal como se puede observar en las siguientes figuras.



Figura 32 – Depósito del material al recipiente metálico y al camión volquete

*Fuente: Propia*



– PM<sub>10</sub>

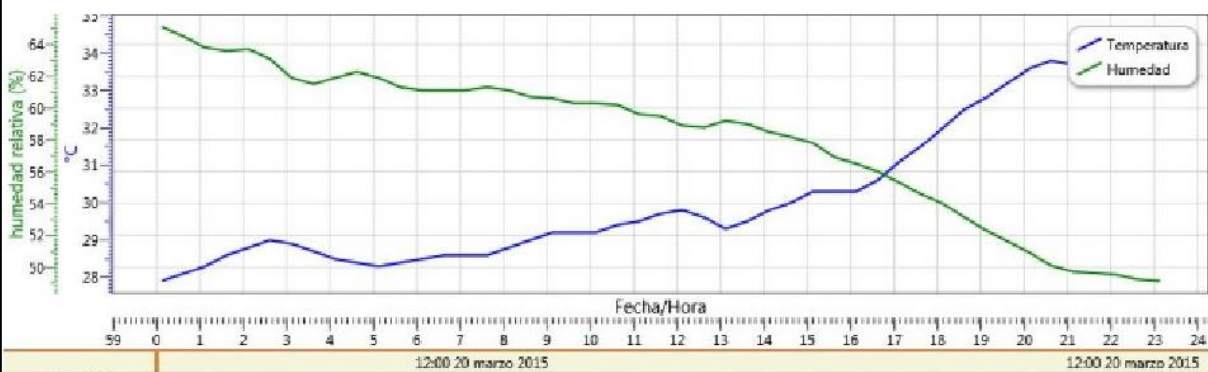
<b>Panel general de datos</b>			
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Promedio de temperatura	30,2 °C	Mín. de temperatura	27,9 °C
Máx. de temperatura	34,7 °C	Tiempo mín. de temperatura	20/03/2015 11:59:38 a.m.
Tiempo máx. de temperatura	20/03/2015 12:23:18 p.m.	Humedad máxima	65,4 %
Humedad promedio	58,2 %	Humedad mínima	49,1 %
Fecha de humedad máxima	20/03/2015 11:59:40 a.m.	Fecha de humedad mínima	20/03/2015 12:22:27 p.m.
Promedio de polvo	0,092 mg/m <sup>3</sup>	Mín. de polvo	0 mg/m <sup>3</sup>
Máx. de polvo	0,91 mg/m <sup>3</sup>	STEL de polvo	0,122 mg/m <sup>3</sup>
TWA de polvo	0,004 mg/m <sup>3</sup>	Tiempo mínimo de polvo	20/03/2015 12:19:48 p.m.
Tiempo máximo de polvo	20/03/2015 12:14:28 p.m.	Tiempo de STEL máx. de polvo	20/03/2015 12:19:38 p.m.
C02Ave	132 PPM	C02Min	55 PPM
C02Max	261 PPM	C02STEL	129 PPM
C02TWA	6 PPM	C02MinTime	20/03/2015 12:16:56 p.m.
C02MaxTime	20/03/2015	C02STELTime	20/03/2015

Figura 33 – Plan general de datos Edificio Flat Arequipa para PM<sub>10</sub>

Como se observa de la figura 33, el reporte indica, entre otros datos, el valor de la temperatura (máx = 37,7°C, min = 27,9°C y prom = 30,2°C), el valor de la humedad (máx = 65,4%, min = 49,1% y prom = 58,2%) además, muestra la cantidad máxima (0,91 mg/m<sup>3</sup>), mínima (0 mg/m<sup>3</sup>) y promedio (0,092 mg/m<sup>3</sup>) de polvo o material particulado. Además de ello, se registró, durante los trabajos de medición, una velocidad del viento de 2,30 m/s (ver Anexo 8.2).

### Gráfica de datos de registro

EVM0404\_EML060009\_20032015\_175810: Gráfica de datos de registro



### Gráfica de datos de registro

EVM0404\_EML060009\_20032015\_175810: Gráfica de datos de registro

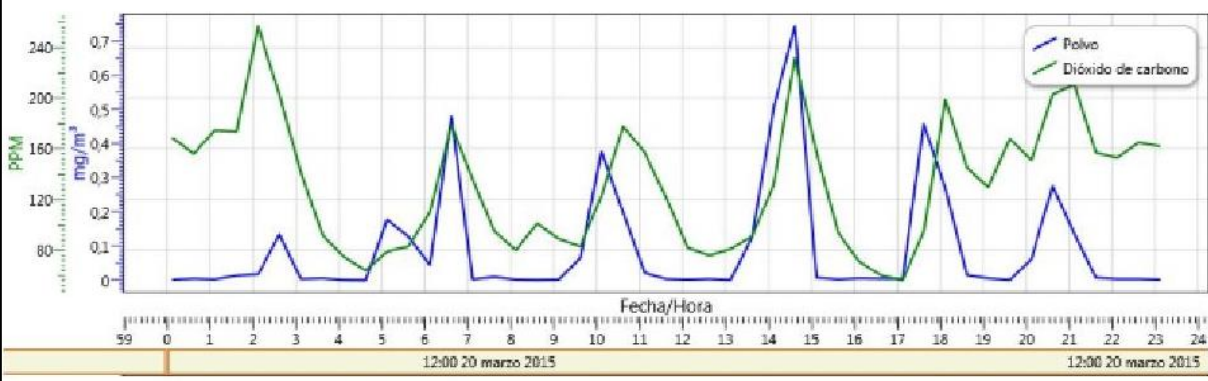


Figura 34 – Gráfica de datos de registro Edificio Flat Arequipa para PM<sub>10</sub>

Se observa la variación de la emisión de polvo o material particulado en función del tiempo, como se aprecia en la figura 32, la cantidad de emisión presenta picos variados y constantes llegando a un promedio de  $0,092 \text{ mg/m}^3$ . Los trabajos de excavación durante la medición se realizaron a una distancia cercana y prudente del equipo de medición. Es por ello que en este caso, se considera el valor máximo registrado por el sensor, el cual es  $0,91 \text{ mg/m}^3$  (ver Anexo 8.2).

– PM<sub>2,5</sub>

<b>Panel general de datos</b>			
<u>Descripción</u>	<u>Valor</u>	<u>Descripción</u>	<u>Valor</u>
Promedio de temperatura	30 °C	Mín. de temperatura	29,3 °C
Máx. de temperatura	30,8 °C	Tiempo mín. de temperatura	20/03/2015 02:03:22 p.m.
Tiempo máx. de temperatura	20/03/2015 02:11:01 p.m.	Humedad máxima	58,5 %
Humedad promedio	57,1 %	Humedad mínima	55,9 %
Fecha de humedad máxima	20/03/2015 02:18:54 p.m.	Fecha de humedad mínima	20/03/2015 02:01:15 p.m.
Promedio de polvo	0,054 mg/m <sup>3</sup>	Mín. de polvo	0 mg/m <sup>3</sup>
Máx. de polvo	0,375 mg/m <sup>3</sup>	STEL de polvo	0,084 mg/m <sup>3</sup>
TWA de polvo	0,002 mg/m <sup>3</sup>	Tiempo mínimo de polvo	20/03/2015 02:00:10 p.m.
Tiempo máximo de polvo	20/03/2015 02:11:00 p.m.	Tiempo de STEL máx. de polvo	20/03/2015 02:15:48 p.m.
C02Ave	72 PPM	C02Min	22 PPM
C02Max	166 PPM	C02STEL	85 PPM
C02TWA	3 PPM	C02MinTime	20/03/2015 01:59:30 p.m.
C02MaxTime	20/03/2015	C02STELTime	20/03/2015

Figura 35– Plan general de datos Edificio Flat Arequipa para PM<sub>2,5</sub>

Como se observa de la figura 35, el reporte indica, entre otros datos, el valor de la temperatura (máx = 30,8°C, min = 29,3°C y prom = 30°C), el valor de la humedad (máx = 58,5%, min = 55,9% y prom = 57,1%) además, muestra la cantidad máxima (0,375 mg/m<sup>3</sup>), mínima (0 mg/m<sup>3</sup>) y promedio (0,054 mg/m<sup>3</sup>) de polvo o material particulado. Además de ello, se registró, durante los trabajos de medición, una velocidad del viento de 1,3 m/s (ver Anexo 8.2).

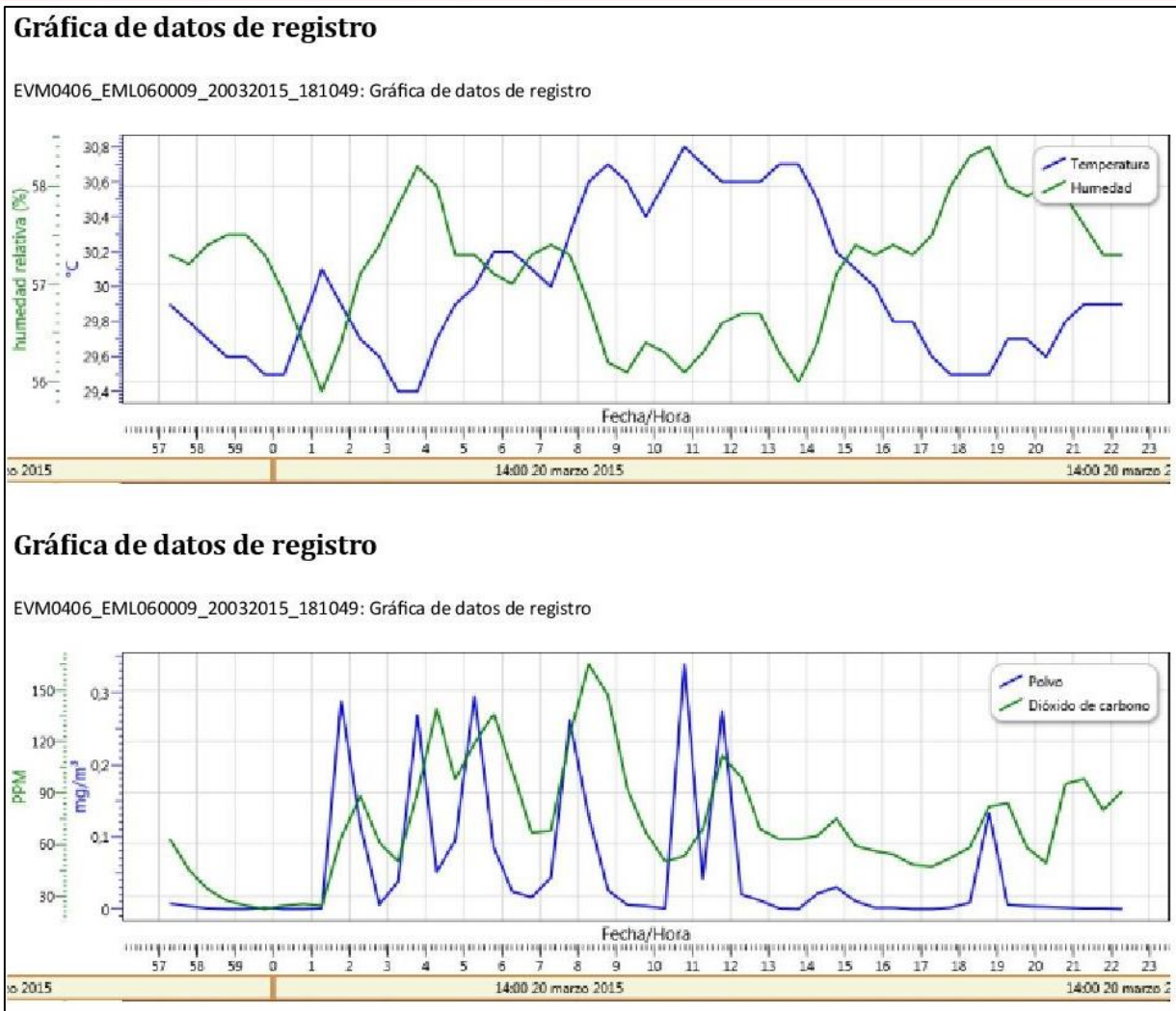


Figura 36 – Gráfica de datos de registro Edificio Flat Arequipa para PM<sub>2.5</sub>

Al igual que en el caso del PM<sub>10</sub>, la cantidad de emisión presenta picos variados y constantes llegando a un valor promedio de 0,054 mg/m<sup>3</sup>. Como se explicó anteriormente, los trabajos de excavación durante la medición se realizaron a una distancia cercana y prudente del equipo de medición. Es por ello que en este caso, se considera el valor maximo registrado por el sensor EVM-7, el cual es 0,375 mg/m<sup>3</sup> (ver Anexo 8.2).

A partir de la información suministrada por los estudios de mecánica de suelos de las dos obras, de los reportes meteorológicos para la precipitación en el día de medición y de los datos y resultados obtenidos de las mediciones realizadas en los dos proyectos, se procedió a organizar los datos de manera tabulada, los cuales se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 28 – Parámetros y FE de PM<sub>10</sub>

Proyecto	Porcentaje de finos	Contenido de humedad	Precipitación	Velocidad del viento	Humedad relativa	PM <sub>10</sub>
	(%)	(%)	(mm)	(m/s)	%	mg/m <sup>3</sup>
Genova	2,6	6,2	2,0	0,30	69,3	0,090
Flat Arequipa	2,4	4,5	2,0	2,30	58,2	0,092

Tabla 29 – Parámetros y FE de PM<sub>2.5</sub>

Proyecto	Porcentaje de finos	Contenido de humedad	Precipitación	Velocidad del viento	Humedad relativa	PM <sub>2,5</sub>
	(%)	(%)	(mm)	(m/s)	%	mg/m <sup>3</sup>
Genova	2,6	6,2	2,0	1,65	73,4	0,011
Flat Arequipa	2,4	4,5	2,0	2,30	57,1	0,054

El valor de las variables obtenidas en cada proyecto se introducen a las ecuaciones del modelo y se obtienen los siguientes resultados.

– PM<sub>10</sub>

Tabla 30 – Comparación entre medición directa y pronóstico del modelo (PM<sub>10</sub>)

PM <sub>10</sub>	Edificio Genova	Edificio Flat Arequipa
	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>
Medición directa	0,090	0,092
Ecuación del modelo	0,096	0,098

Como se observa de la tabla anterior, en ambos casos, el modelo estima un valor o factor de emisión mayor que los obtenidos en las mediciones directas. Esta diferencia radica aproximadamente en un 6%.

– PM<sub>2,5</sub>

Tabla 31 – Comparación entre medición directa y pronóstico del modelo (PM<sub>2.5</sub>)

PM <sub>2,5</sub>	Edificio Genova	Edificio Flat Arequipa
	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>
Medición directa	0,011	0,054
Ecuación del modelo	0,043	0,060

Como se observa de la tabla anterior, en ambos casos, el modelo estima un valor o factor de emisión mayor que los obtenidos en las mediciones directas. Para el caso del Edificio Genova, la diferencia es alta y muy significativa, en el caso del Edificio Flat Arequipa, la diferencia no es alta y es de aproximadamente 10%.



### 4.2.3 Función de Transformación

Con los datos de factor de emisión obtenidos en campo y con los deducidos por el modelo propuesto, se procede a realizar una función de transformación para material particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. En el eje de las ordenadas se tiene el índice de calidad ambiental, un valor que oscilará entre 0 y 1, en donde el valor 1 representa un óptimo estado de calidad ambiental y el valor 0, indica un alto grado del contaminante.

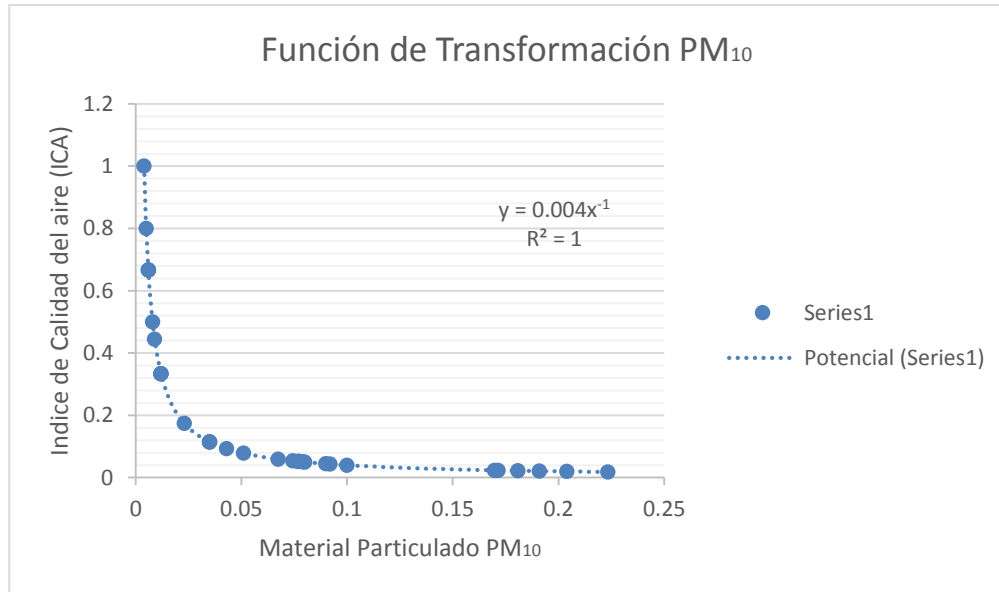


Figura 37 – Función de Transformación para PM<sub>10</sub>

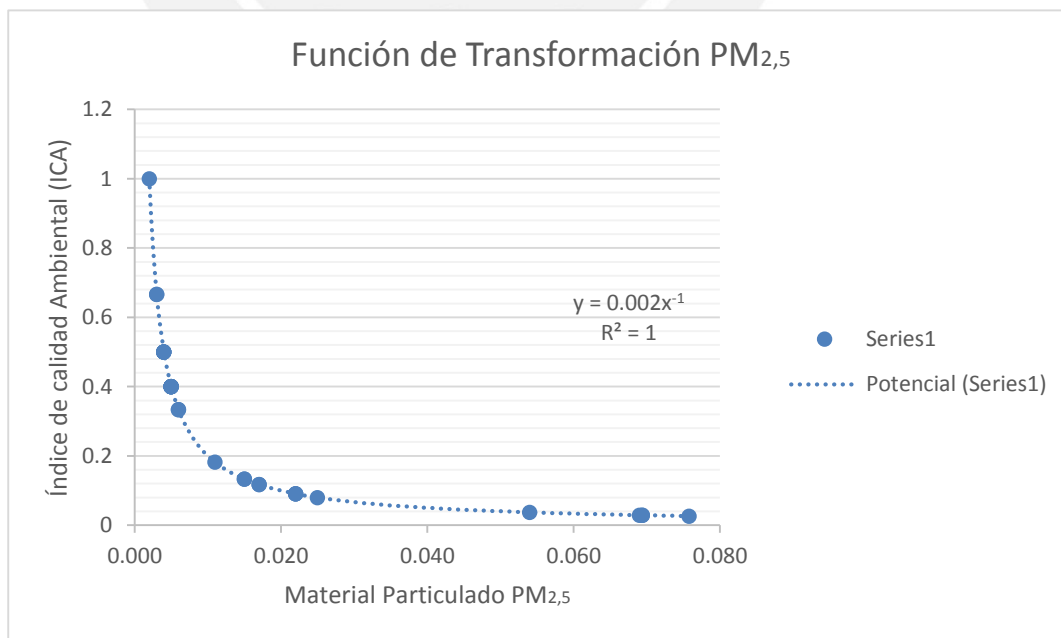


Figura 38 - Función de Transformación para PM<sub>2.5</sub>

## 5. Discusión de resultados

### 5.1 Variables que inciden en la emisión de $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$

Uno de los objetivos específicos es determinar las relaciones de causalidad entre los parámetros ambientales: porcentaje de finos, velocidad del viento, humedad del suelo, precipitación y humedad relativa; con la emisión de material particulado suspendido en el aire  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , para lo cual se realiza un análisis de regresión usando una función polinómica de segundo orden. Estas relaciones se muestran en los siguientes gráficos:

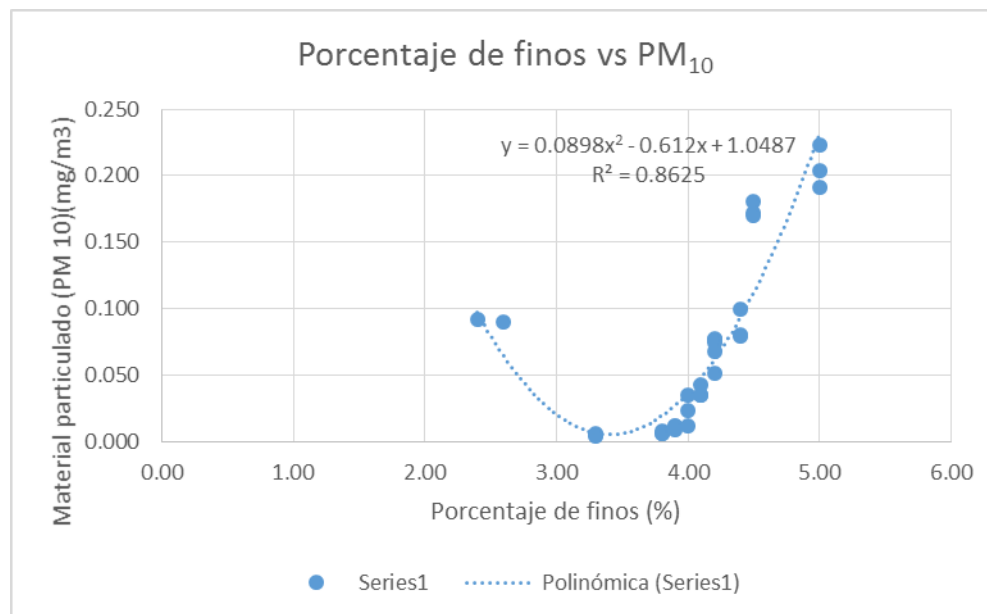


Figura 39 – Relación entre Porcentaje de finos y  $PM_{10}$

En la figura 39 se realiza un análisis de regresión entre el porcentaje de finos y el material particulado ( $PM_{10}$ ), la cual muestra una tendencia directamente proporcional en gran escala, es decir, a mayor cantidad de porcentaje de finos que presenta el suelo, mayor será la cantidad de material particulado suspendido en el aire ( $PM_{10}$ ) que se pueda emitir al realizar alguna actividad que involucre movimiento de tierra. De otro lado, analizando el coeficiente de regresión  $R^2 = 0,8625$ , se obtiene un valor cercano a 1, lo cual permite confiar en el modelo.

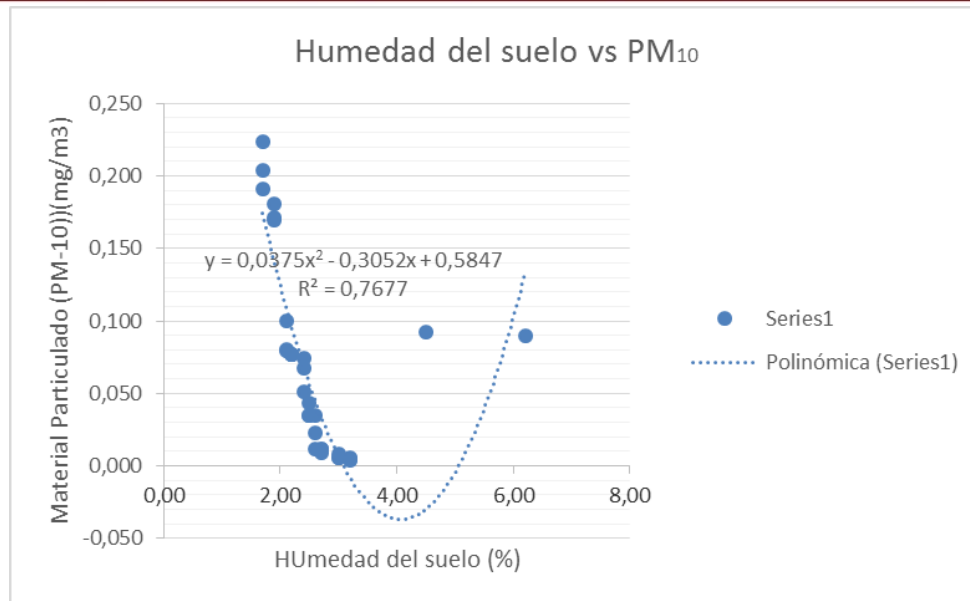


Figura 40 - Relación entre Humedad del suelo y PM<sub>10</sub>

En la figura 40 se observa un análisis de regresión entre la humedad del suelo y el material particulado (PM<sub>10</sub>), la cual muestra un tendencia inversamente proporcional en gran escala, es decir a mayor humedad del suelo, menor será la cantidad de material particulado suspendido en el aire que se pueda emitir al realizar alguna actividad que involucre movimiento de tierra. Analizando el coeficiente de regresión  $R^2 = 0,7677$ , se obtiene un valor cercano a 1, lo cual permite confiar en el modelo.

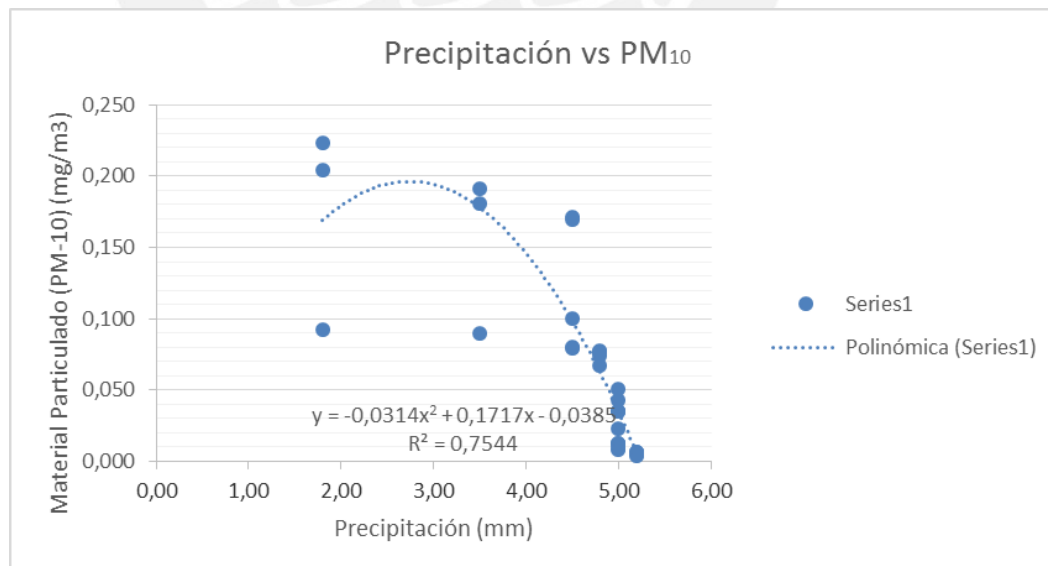


Figura 41 – Relación entre Precipitación y PM<sub>10</sub>

En la figura 41 se muestra el análisis de regresión entre precipitación diaria y el material particulado ( $PM_{10}$ ), la cual muestra un tendencia inversamente proporcional, es decir a mayor precipitación diaria, menor será la cantidad de material particulado suspendido en el aire que se pueda emitir al realizar alguna actividad de movimiento de tierras. Analizando el coeficiente de regresión  $R^2= 0,7544$ , se obtiene un valor cercano a 1, lo cual permite confiar en el modelo.

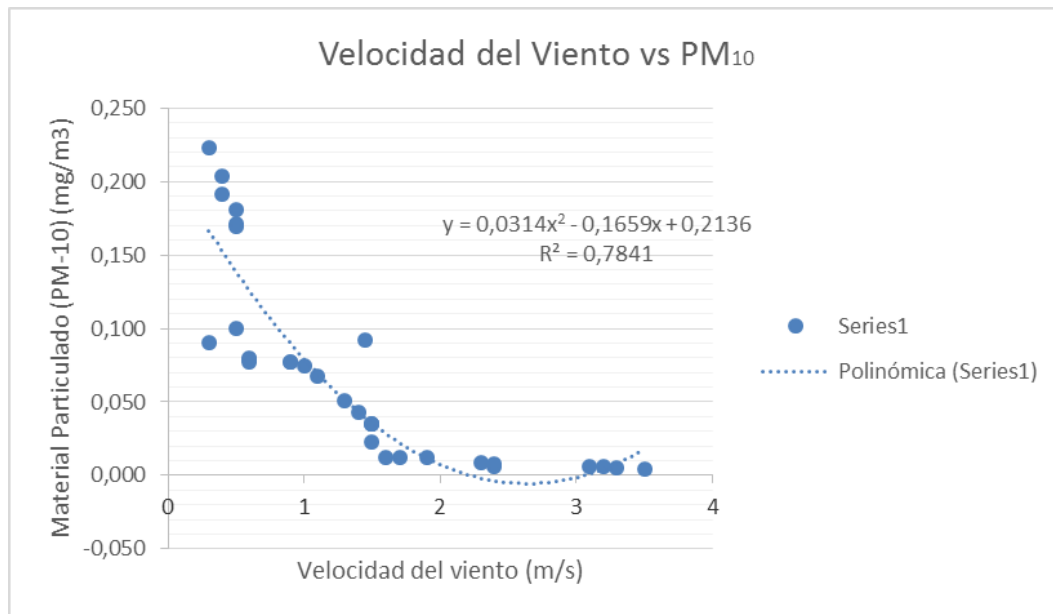


Figura 42 - Relación entre Velocidad del viento y  $PM_{10}$

En la figura 42 se muestra el análisis de regresión entre la velocidad del viento y el material particulado ( $PM_{10}$ ), la cual indica un tendencia inversamente proporcional, es decir, a menor velocidad del viento, mayor será la cantidad de material particulado suspendido en el aire ( $PM_{10}$ ) que se emite al realizar alguna actividad que involucre movimiento de tierras. Además, analizando el coeficiente de regresión  $R^2= 0,7841$ , se obtiene un valor cercano a 1, lo cual permite confiar en el modelo.

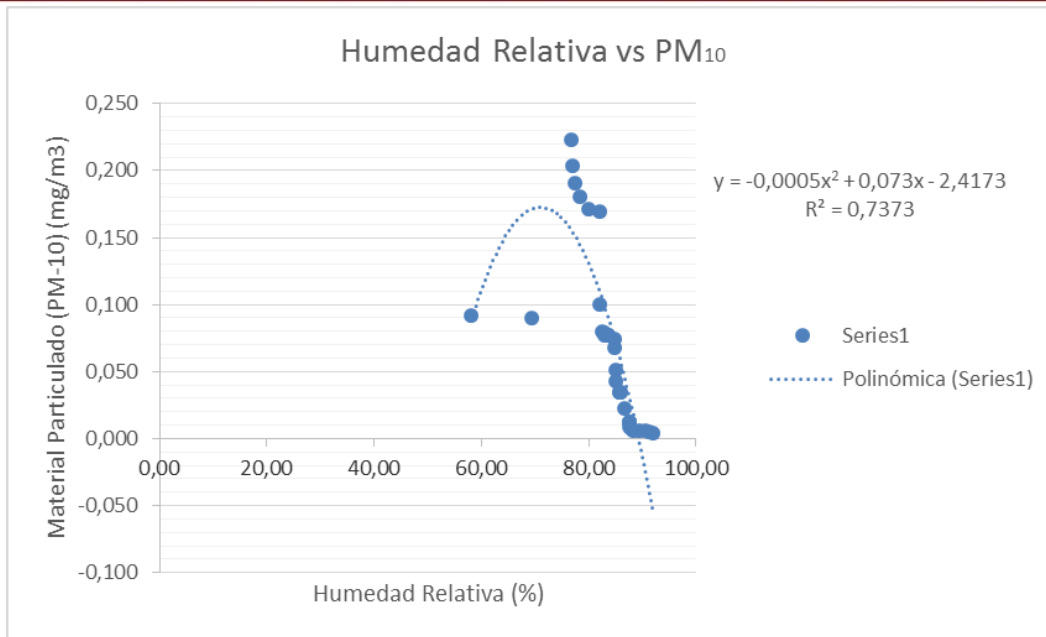


Figura 43 - Relación entre Humedad relativa y PM<sub>10</sub>

En la figura 43 se muestra el análisis de regresión entre la humedad relativa y el material particulado (PM<sub>10</sub>), la cual muestra una tendencia inversamente proporcional, es decir a menor humedad relativa, mayor será la cantidad de material particulado suspendido en el aire (PM<sub>10</sub>) que se emite al realizar alguna actividad que involucre movimiento de tierras. Analizando el coeficiente de regresión  $R^2 = 0,7841$ , se obtiene un valor cercano a 1, lo cual permite confiar en el modelo.

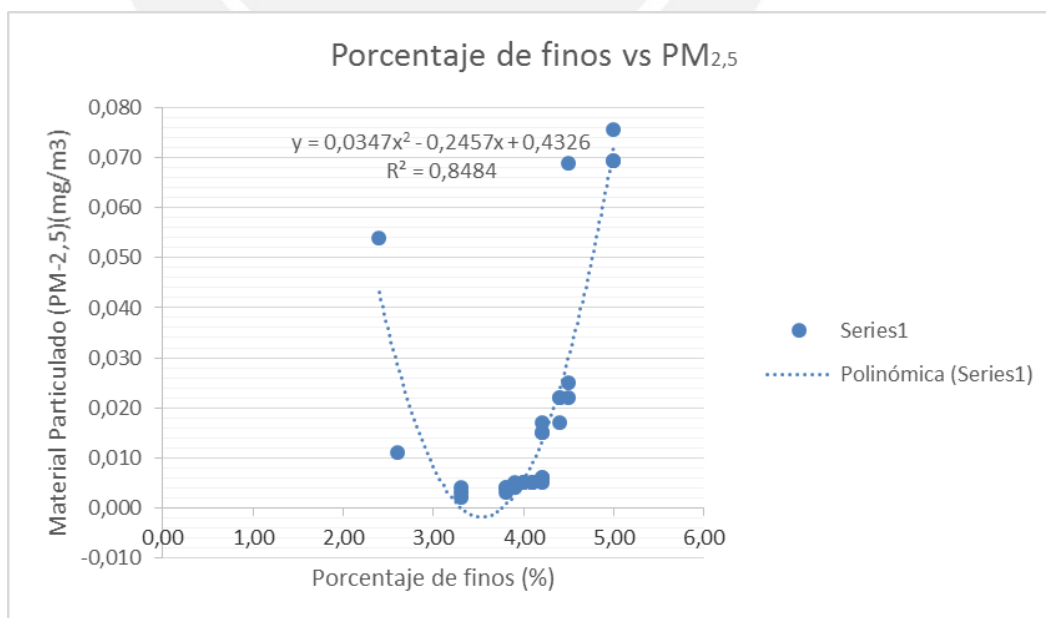


Figura 44 - Relación entre Porcentaje de finos y PM<sub>2,5</sub>



En la figura 44 se muestra el análisis de regresión entre el porcentaje de finos y el material particulado ( $PM_{2,5}$ ), la cual muestra una tendencia directamente proporcional, es decir a mayor porcentaje de finos que presenta el suelo, mayor será la cantidad de material particulado suspendido en el aire ( $PM_{2,5}$ ) que emite al realizar alguna actividad que involucre movimiento de tierras. Analizando el coeficiente de regresión  $R^2 = 0,8484$ , se obtiene un valor cercano a 1, lo cual permite confiar en el modelo.

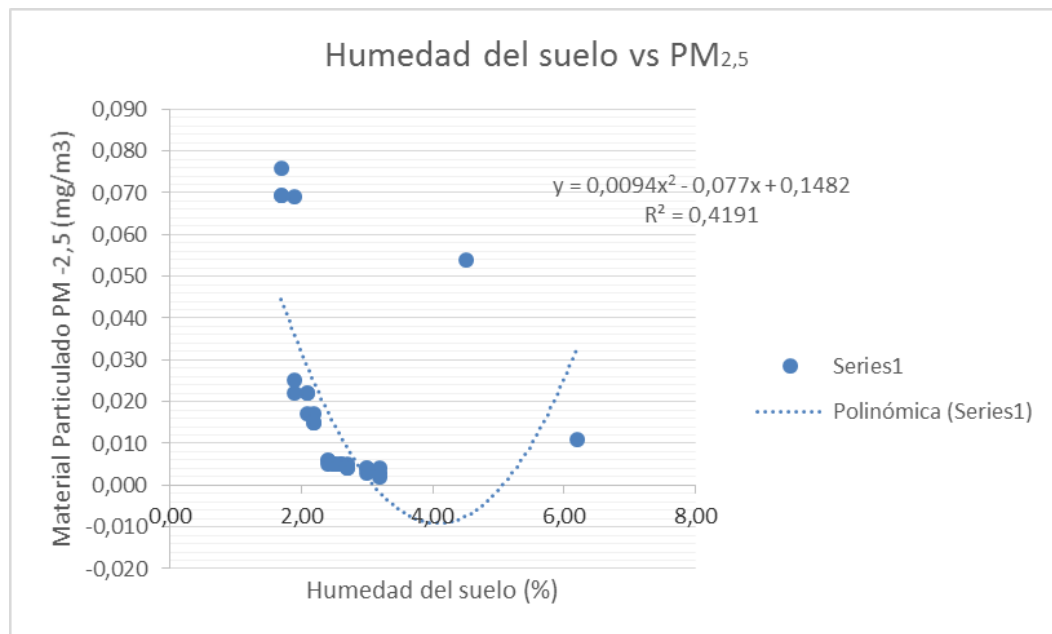


Figura 45 - Relación entre Humedad del suelo y  $PM_{2,5}$

En la figura 45 se muestra el análisis de regresión entre la humedad del suelo y el material particulado ( $PM_{2,5}$ ), la cual muestra una tendencia inversamente proporcional, es decir, a mayor humedad del suelo mayor será la cantidad de material particulado suspendido en el aire ( $PM_{2,5}$ ) que se emite al realizar alguna actividad que involucre movimiento de tierras. Además, el coeficiente de regresión  $R^2 = 0,4191$ , se obtiene un valor lejano a 1, lo cual indica dudas sobre el modelo.

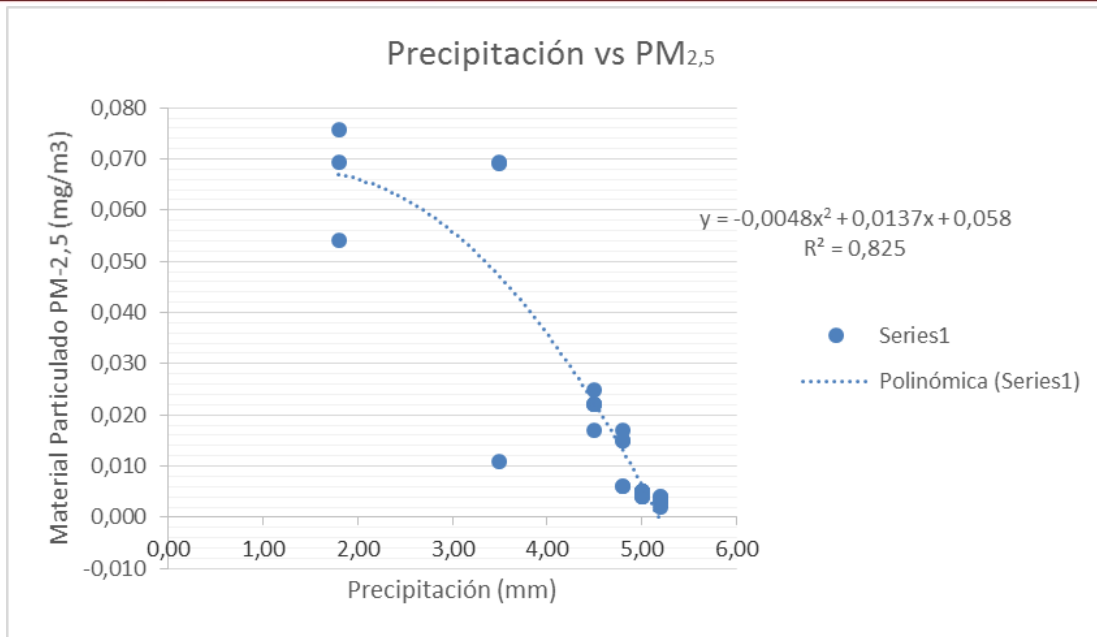


Figura 46 - Relación entre Precipitación y PM<sub>2,5</sub>

En la figura 46 se muestra el análisis de regresión entre la precipitación y el material particulado (PM<sub>2,5</sub>), la cual muestra una relación inversamente proporcional, es decir, a mayor precipitación, menor será la cantidad de material particulado suspendido en el aire (PM<sub>2,5</sub>) que se emite al realizar actividades de movimiento de tierras. El coeficiente de regresión  $R^2 = 0,825$  es un valor cercano a 1, lo cual indica un modelo confiable.

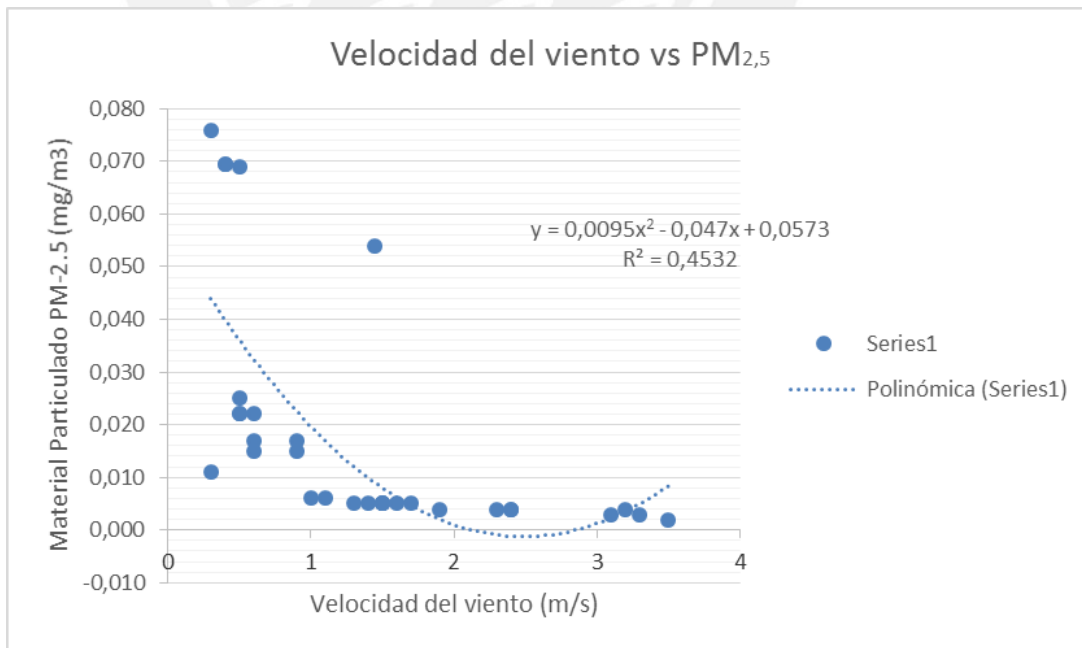


Figura 47 - Relación entre Velocidad del viento y PM<sub>2,5</sub>

En la figura 47 se muestra el análisis de regresión entre la velocidad del viento y el material particulado ( $PM_{2,5}$ ), la cual muestra una relación inversamente proporcional, es decir, a mayor velocidad del viento, menor será la cantidad de material particulado suspendido en el aire ( $PM_{2,5}$ ) que se emite al realizar alguna actividad que involucre movimiento de tierras. El coeficiente de regresión  $R^2 = 0,4532$  es un valor lejano a 1, lo cual indica una confiabilidad baja.

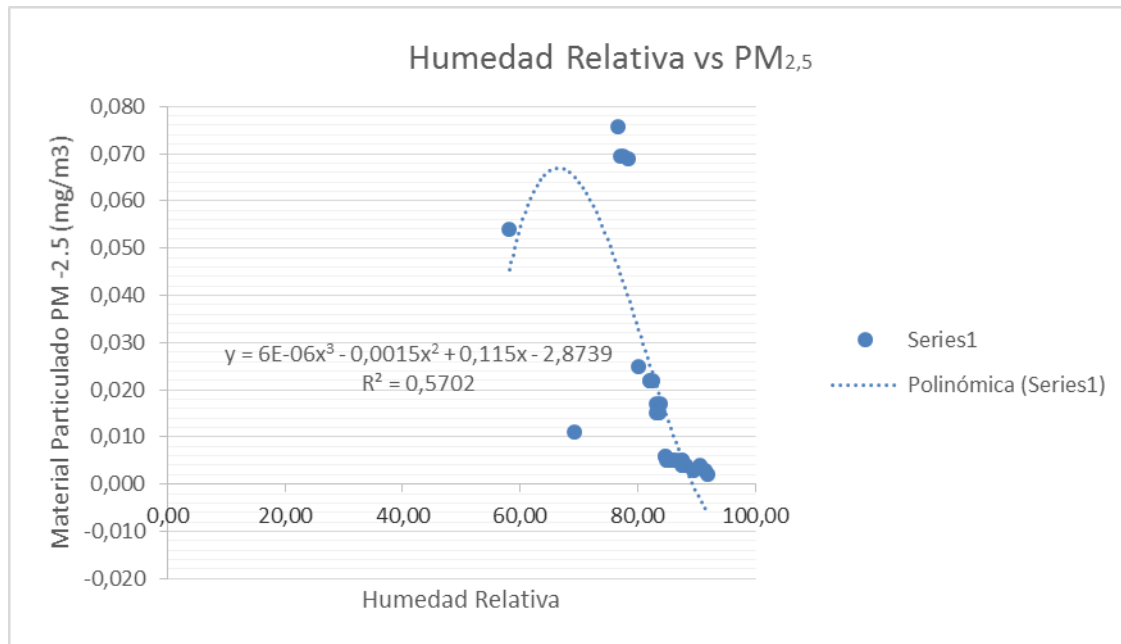


Figura 48 - Relación entre Humedad relativa y  $PM_{2,5}$

En la figura 48 se muestra el análisis de regresión entre la humedad relativa y el material particulado ( $PM_{2,5}$ ), la cual no muestra una relación inversamente proporcional, es decir, a mayor humedad relativa, menor será la cantidad de material particulado suspendido en el aire ( $PM_{2,5}$ ) que se emite al realizar alguna actividad que involucre movimiento de tierras. El coeficiente de regresión  $R^2 = 0,5702$  es un valor lejano a 1, lo cual indica una baja confiabilidad.

En general, podemos comparar los valores de  $R^2$  (coeficiente de determinación) obtenidos para la misma variable dependiente. En la tabla 32, se muestra un resumen de los coeficiente de determinación de cada variable independiente con su respectiva variable dependiente.

Tabla 32 – Resumen de valores de coeficiente de determinación

Coeficiente de determinación ( $R^2$ )	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>	Nivel de significancia		Interpretación de significancia
			PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>	
Porcentaje de Finos	0,8625	0,8484	MB	B	Sig. muy buena para PM <sub>10</sub> y buena para PM <sub>2,5</sub>
Humedad del Suelo	0,7677	0,4191	B	R	Sig. buena para PM <sub>10</sub> y regular para PM <sub>2,5</sub>
Precipitación Diaria	0,7544	0,8250	B	B	Sig. buena para PM <sub>10</sub> y PM <sub>2,5</sub>
Velocidad del viento	0,7841	0,4532	B	R	Sig. buena para PM <sub>10</sub> y regular para PM <sub>2,5</sub>
Humedad Relativa	0,7373	0,5702	B	B	Sig. buena para PM <sub>10</sub> y PM <sub>2,5</sub>

Como se observa en la tabla 32 y con base en la tabla 09, para los parámetros de precipitación diaria y humedad relativa, el nivel de significancia es buena para PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>; en el caso de las variables humedad del suelo y velocidad del viento, el nivel de significancia es buena para PM<sub>10</sub> y regular para PM<sub>2,5</sub>; y por último el porcentaje de finos presenta un nivel significancia muy buena para PM<sub>10</sub> y buena para PM<sub>2,5</sub>.

Para el caso del parámetro ambiental PM<sub>10</sub> se obtiene que la variable más influyente es el porcentaje de finos porque presenta mayor coeficiente de determinación, con el mismo criterio se puede decir que la variable menos influyente es la humedad relativa. Para el caso del material particulado PM<sub>2,5</sub>, al igual que en el PM<sub>10</sub>, el porcentaje de finos es la variable independiente más influyente, pero la menos influyente resulta ser la humedad del suelo.

Estos resultados son producto de un análisis de regresión lineal simple entre cada variable independiente con su respectiva variable dependiente. De otro lado, el programa SPSS-20 realiza un análisis de regresión lineal de múltiples variables, en el cual se analizan en conjunto las variables independientes con las variables dependientes, los resultados de este análisis se explican en el capítulo 5.2.

## 5.2 Diferencia y nivel de error del modelo propuesto y validación del modelo

Al analizar los resultados obtenidos en el análisis de regresión para el modelo que estima factores de emisión  $PM_{10}$ , se afirma que es un modelo confiable, debido a que se tiene un valor de coeficiente de determinación ( $R^2$ ) igual a 0,861, muy cercano a 1, lo cual califica al modelo como muy bueno.

Para el caso del  $PM_{2.5}$  se caracteriza también como muy bueno y proporciona un buen ajuste porque el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es 0,909.

Para ambos casos ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ), tomando en cuenta el estadístico F (Tablas 14 y 20), indica que el valor de nivel crítico Sig. es igual a cero, esto quiere decir que existe una relación lineal significativa entre las variables dependientes y las variables explicativas o independientes.

Mediante el análisis de los estadísticos sobre los residuos (Tablas 17 y 23), para el caso del  $PM_{10}$ , se comprueba que no existen valores atípicos porque el valor máximo de los residuos tipificados (2,288) es menor a tres veces la desviación típica (2,748). Sin embargo, en el caso del  $PM_{2.5}$  sí se encuentra valores atípicos porque los valores máximos de los residuos tipificados (3,370) es mayor a tres veces la desviación típica (2,748).

Los histogramas de los residuos tipificados (Figuras 23 y 25) presentan, para ambos casos ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ), una distribución normal debido a que se observa una alta concentración de casos en la parte central donde el valor de los residuos es cero.

Analizando las figuras 24 y 26 se puede comprobar que la distribución de los residuos tipificados para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  no son perfectamente normales ya que los valores no están perfectamente alineados a la línea diagonal pero tienden a ella. Esto además indica gráficamente que la diferencia entre los factores de emisión ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) pronosticados por el modelo y los observados o medidos en campo no son significativas.

Al realizar la validación del modelo mediante la prueba de diferencia de medias, se encuentra que el nivel crítico bilateral (Sig. (bilateral)) es mayor a 0,005 para ambos casos ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ). Esto quiere decir que se acepta la hipótesis de igualdad de medias entre ambas poblaciones (“medido” y “pronosticado”).

En las figuras 49 y 50 y tablas 33 y 34 se realiza la comparación entre los factores de emisión que se obtienen mediante el modelo propuesto y la medición directa para los proyectos visitados (Flat Arequipa, Genova y Costanera). Con base a estas comparaciones, se obtiene el análisis residual y el nivel de error de los modelos propuestos respecto de las mediciones directas.



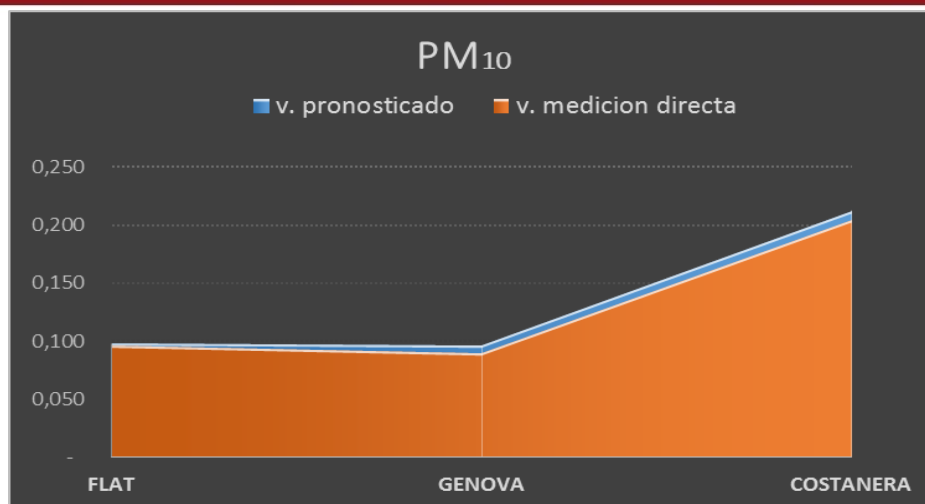


Figura 49 – Comparación de estimación de  $PM_{10}$  entre el modelo propuesto y la medición directa

Tabla 33 – Análisis residual y nivel de error del modelo respecto de las mediciones directas ( $PM_{10}$ )

Proyecto	Valor pronosticado	Valor medición directa	Residuo	Cociente residuo respecto de la medición directa
Flat	0,098	0,096	-0,002	2%
Genova	0,096	0,090	-0,006	7%
Costanera	0,212	0,204	-0,008	4%
	Prom		-0,005	4%

En la comparación entre el modelo propuesto y la medición directa, se tiene que para el caso del factor de emisión de  $PM_{10}$ , existe una diferencia promedio de 4% en el que la estimación del modelo es siempre mayor que lo medido en campo.

Esta diferencia del 4% indica que el nivel de error del modelo no es significativo y podría decirse que el modelo estima, con un nivel aceptable de precisión, el factor de emisión o la cantidad de material particulado  $PM_{10}$  en función de las características del suelo y del ambiente del lugar de trabajo.

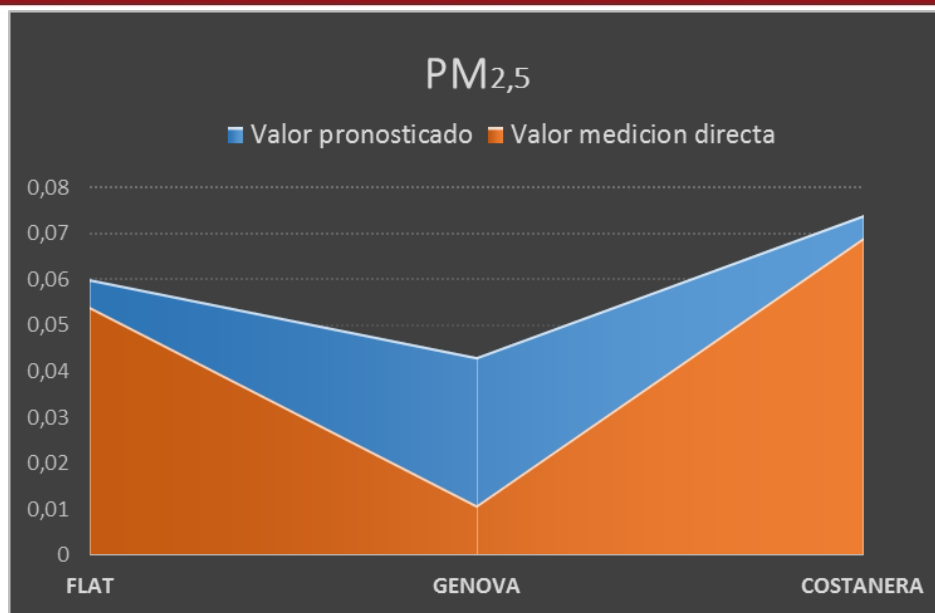


Figura 50 – Comparación de estimación de  $PM_{2,5}$  entre el modelo propuesto y la medición directa

Tabla 34 – Análisis residual y nivel de error del modelo respecto de las mediciones directas ( $PM_{2,5}$ )

Proyecto	Valor pronosticado	Valor medición directa	Residuo	Cociente de residuo respecto de la medición directa
Flat	0,060	0,054	-0,006	-11%
Genova	0,043	0,011	-0,032	-291%
Costanera	0,074	0,069	-0,005	-7%
		Prom	-0,006	-9%

Para el caso del material particulado  $PM_{2,5}$ , después de realizar las respectivas comparaciones, se tiene que para el proyecto Flat Arequipa, la diferencia entre el factor de emisión que se obtiene del modelo y de lo que se obtiene de las mediciones en campo es de 11% en el que la estimación del modelo es mayor que lo medido en campo. En este caso, el nivel de error del modelo es relativamente significativo y se podría decir que el nivel de precisión es regular.

Para el proyecto Genova se tiene una diferencia muy alta en donde lo que estima el modelo es aproximadamente 4 veces lo que se obtiene de las mediciones en campo llegando a tener un nivel de error de 291% en ese proyecto y 103% en el promedio global. En este caso, se puede concluir que la cantidad de mediciones que se realizaron en campo fueron insuficientes. Debido a que el nivel de error para este proyecto es muy alto se considera un caso atípico. Al

omitir este caso obtenemos un nivel de error del 9%, lo cual indica que el modelo de estimación de factor de emisión para  $PM_{2.5}$  es regularmente preciso.

De otro lado, analizando las tablas 15 y 21, en donde se utiliza el parámetro  $\beta$  (beta) para indicar cuál parámetro ambiental es el más influyente en el modelo, se reafirma que la variable más influyente en el modelo de ambos casos ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) es la fracción o porcentaje de finos. Así también, se determina que el contenido de humedad es la variable que menos influye, es por eso que se podría generar un nuevo modelo sustrayendo este parámetro con el fin de obtener un nuevo modelo con un mejor ajuste.

El análisis de regresión considerando lo anterior, el nuevo modelo tiene la siguiente forma:

–  $PM_{10}$

$$FE = 0,208 + 0,055xPF - 0,026xPP - 0,010xVV - 0,003xHR.....(16)$$

Este nuevo modelo obtiene un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) igual a 0,861

–  $PM_{2.5}$

$$FE = 0,110 + 0,025xPF - 0,013xPP + 0,010xVV - 0,002xHR.....(17)$$

Este nuevo modelo obtiene un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) igual a 0,906

Para estos nuevos modelos, la comparación entre lo estimado y lo obtenido por las mediciones resulta mejor porque la diferencia entre lo uno y el otro se reduce. Para ambos casos ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) la diferencia radica en un 2% en donde el modelo estima un valor menor que lo obtenido por las mediciones en campo.

Con los datos obtenidos en el campo y los factores de emisión generados por el modelo propuesto, se pueden crear funciones de transformación que permitan analizar rápidamente si un valor medido en campo de material particulado  $PM_{10}$  o  $PM_{2.5}$  representa una óptima calidad ambiental o una baja calidad ambiental.

En la figura 37 se aprecia una función referida a la calidad ambiental del aire en función a la concentración media de material particulado  $PM_{10}$  en miligramos por metro cúbico. Esta función es exponencial e inversamente proporcional con pendiente negativa, es decir, mientras mayor sea la cantidad de material particulado  $PM_{10}$ , menor será la calidad ambiental que presente el aire, y por el contrario, mientras menor sea la cantidad de material particulado  $PM_{10}$  suspendido en el aire, mayor será la calidad ambiental.

En la figura 38 se aprecia una función parecida a la anterior referida a la calidad ambiental del aire en función a la concentración media de material particulado  $PM_{2.5}$  en miligramos por metro

cúbico. Esta función es exponencial e inversamente proporcional con pendiente negativa, es decir, mientras mayor sea la cantidad de material particulado  $PM_{2.5}$ , menor será la calidad ambiental que presente el aire, y por el contrario, mientras menor sea la cantidad de material particulado  $PM_{2.5}$  suspendido en el aire, mayor será la calidad ambiental.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

Se comprueba que existe un moderado índice de material particulado  $PM_{2.5}$  y un valor considerable de  $PM_{10}$ , los cuales los se pudieron medir y cuantificar en obras reales cuando presentan la actividad de movimiento de tierras.

Mediante variables estadísticas como el análisis de regresión, se determinó las causalidades que se dan entre la actividad de movimiento de tierras y los parámetros ambientales: Porcentaje de finos del suelo, humedad del suelo, humedad relativa, precipitación y velocidad del viento; siendo el primero el parámetro que incide en mayor cantidad y en directa proporción y el contenido de humedad el que menos influye.

Para determinar el factor de emisión de material particulado  $PM_{10}$  suspendido en el aire, se puede usar la siguiente ecuación:

$$FE = 0,200 + 0,058xPF + 0,001xCH - 0,025xPP - 0,009xVV - 0,003xHR$$

Donde FE, es factor de emisión y sus unidades son  $mg/m^3$ . Además, para determinar el factor de emisión de material particulado  $PM_{2.5}$  suspendido en el aire, se puede usar la siguiente ecuación:

$$FE = 0,140 + 0,017xPF - 0,004xCH - 0,015xPP - 0,008xVV - 0,001xHR$$

En base a la estimación de los modelos, la cantidad de material particulado  $PM_{10}$  emitido es de  $98 \mu g/m^3$ , mientras que para  $PM_{2.5}$  es de  $60 \mu g/m^3$  en las dos proyectos visitados (Genova y Flat Arequipa), los cuales no superan lo establecido en los estándares nacionales de calidad ambiental del aire ya que estipula un límite máximo de  $150 \mu g/m^3$  para  $PM_{10}$  y  $65 \mu g/m^3$  para  $PM_{2.5}$  (Tablas 1 y 2). Además, tienen una clasificación de nivel moderado según los índices de calidad del aire planteados por el Senamhi (Tablas 3 y 4), en donde se indica que para este nivel, las personas podrían presentar síntomas de tos y cansancio.

Como se explicó anteriormente, el porcentaje de finos es una variable que influye de manera directa, en una gran magnitud y es proporcional a la cantidad de emisión de material particulado. Es así que, mediante el uso de los modelos propuestos, se puede estimar una cantidad máxima de porcentaje de finos, manteniendo constante los demás parámetros, de tal manera que llegue los límites establecidos por los estándares nacionales y el Senamhi.

Para el caso del  $PM_{10}$ , este valor máximo de porcentaje de finos sería de 3,5% y 3,3% para las obras Genova y Flat Arequipa respectivamente. Y para el caso de  $PM_{2,5}$ , el valor de porcentaje de finos máximo sería de 3,9% y 2,7% para las obras Genova y Flat Arequipa respectivamente.

Se puede determinar un nuevo modelo con mejor ajuste, sustrayendo las variables independiente que son redundantes o que se muestran menos relevantes para obtener el factor de emisión, ya sea de material particulado  $PM_{10}$  o  $PM_{2,5}$ . En ambos casos la variable más influyente era la fracción de finos y la menos importante el contenido de humedad. Las nuevas ecuaciones resultantes son:

Material particulado  $PM_{10}$ :

$$FE = 0,208 + 0,055xPF - 0,026xPP - 0,010xVV - 0,003xHR$$

Material partícula  $PM_{2,5}$ :

$$FE = 0,110 + 0,025xPF - 0,013xPP + 0,010xVV - 0,002xHR$$

En ambos casos se obtienen coeficiente de determinación más cercano a 1, lo que indica un mejor ajuste en la ecuación y una mayor precisión al momento de estimar los factores de emisión en los casos reales. Estos resultados permiten demostrar y reafirmar que la variable contenido de humedad no es influyente en el modelo y por lo tanto se debería sustraer y no tomar en cuenta en la determinación del factor de emisión de material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2,5}$ ) en el movimiento de tierras en obras de edificaciones.

Cuando se requiera plantear gráficamente un modelo de determinación de impactos ambientales, en donde sus variables dependientes tienen magnitudes de medidas en unidades heterogéneas, se recurre a las funciones de transformación. Para ello, surge la necesidad de homogeneizar los resultados con sus diferentes unidades de medida, de tal forma de expresar resultados globales con unidades abstractas como son las unidades de impacto ambiental. Para los dos casos,  $PM_{10}$  y  $PM_{2,5}$ , se obtienen curvas exponenciales con pendiente negativas e inversamente proporcionales. Con estas curvas se puede determinar, luego de realizar alguna medición en campo, la calidad ambiental generada por la actividad de movimiento de tierras.

De acuerdo con los análisis de los estadísticos F y el análisis de los residuos tipificados, se concluye que la relación entre la variable dependiente e independientes o explicativas es de carácter lineal y significativa. Además, el grado de precisión del modelo de regresión es alto



debido a que el valor de los residuos tienden a ser cero, aunque también se presentan casos atípicos.

Tomando en cuenta el método de validación por diferencia de medias, se concluye que el modelo de regresión para los casos de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  queda validado en ambos casos, la hipótesis de igualdad de medias entre ambas poblaciones (“medido” y “pronosticado”) no se rechaza, lo cual conlleva a la conclusión de que los valores medios de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  obtenidos por el modelo y los obtenidos mediante mediciones son los mismos.

Tomando en cuenta el método de validación por análisis de residuos se concluye que el modelo de estimación para el  $PM_{10}$  resulta validado debido a que el nivel de error es menor al 5%; por el contrario, para el caso del  $PM_{2.5}$  el nivel de error es mayor al 5% por lo cual este modelo no queda validado por este método.

Cuando se realiza las mediciones en campo, se puede medir los valores de material particulado suspendido en el aire de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , analizando dichos resultados con las tablas 3 y 4 del senhami, se puede inferir que se tiene un estado de calidad de aire moderado, diagnóstico aceptable para nuestro medio ambiente, lo cual asevera que se presenta un buen control de la calidad de aire en la actividades de movimiento de tierras en obras de edificaciones.

## 7. Referencias bibliográficas

- Áridos Antolin (2014). *Trabajos/ Excavaciones – Palencia y Valladolid*. 10/01/2016. Sitio web: <http://www.aridosantolin.es/trabajos/excavaciones/excavaciones.htm>
- Bisset, R. (2001). *Developments in EIA methods. En P. I. Wathern, Environmental Impact Assesment Theory and Practice*. Londres: Selwood Printing Ltd. pp. 47-58
- Braja, M. (2011). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México DF: McGraw Hill. pp. 79-83
- Cantarino, C.. (1999). *El Estudio de Impacto Ambiental*. España: Universidad de Alicante. pp. 16-20
- Canter, L. (1998). *Manual de Evaluación de Impacto Ambiental*. Madrid: McGRAW-HILL.
- Cantó, S. & Riera, P. (2002). *La vertiente socioeconómica en los estudios de impacto ambiental*. España: Universidad Autónoma de Barcelona. Revista Ciudad y Territorio.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias de Ambiente (CEPIS). (2005). *Manual de Autoinstrucción: Orientación para el Control de la Contaminación del Aire*. 15/08/2015, de Organización Panamericana de la salud Sitio web: [http://www.bvsde.paho.org/cursoa\\_orientacion/](http://www.bvsde.paho.org/cursoa_orientacion/)
- Conesa, V. (2009). *Guía Metodológica para la evaluación del impacto ambiental*. Madrid: Mundi-Prensa. pp. 100-101
- De la Fuente, B.. (2009). *Relación entre Variables: Causalidad, Correlación y Regresión*. Cataluña: Universidad de Cataluña. pp. 42-53
- Del Saz, S.. (2008). *Medio Ambiente y Desarrollo: Una revisión conceptual*. España: Ciriec. pp. 33-35
- Environmental Protection Agency. (2011). Capítulo 13: Miscellaneous Sources. En *AP 42* (1-6). Estados Unidos: EPA.
- Euroinnova Bussines School (2009). *Excavaciones Subterráneas Mecanizada a Sección Completa con Tuneladoras*. Sitio web: <http://www.euroinnova.do/lexm0310-Excavacion-Subterraneas-Mecanizada-A-Seccion-Completa-Con-Tuneladoras-Online>.
- Guanche, A. (2013). *Las Propiedades del aire*. 18/08/2015, de Cuba Educa Sitio web: <http://cnaturales.cubaeduca.cu>
- González, A. & Cherné, J. (1997). *El Impacto Ambiental en las Obras de Movimiento de Tierras. Protección de la Geomorfología del Terreno*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. p. 7
- Herrera, J. (2006). *Métodos de minería a cielo abierto*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. p. 2
- Huerta, E (2012). *El boom de la industria de la construcción en el Perú*. 08/01/2016 de Econoblognet. Sitio Web: <http://econoblognet.blogspot.pe/2012/01/el-boom-de-la-industria-de-la.html>.

- Inche, J. (2004). *Gestión de la calidad del aire: causas, efectos y soluciones*. Lima: Instituto de Investigación de Ingeniería Industrial-UNMSM. pp. 59-62
- Makhdoum, M. (2002). *Degradation Model: A Quantitative EIA Instrument, Acting as a Decision Support System (DSS) for Environmental Management*. Tehran: The University of Tehran.
- Martínez, M. (2010). *El Análisis de la Regresión a través de SPSS*. Granada: Universidad de Granada. pp. 8-34
- Mendieta, A (2015). *Sector de la Construcción crecería 4,4% en 2016, afirma Intéligo SAB*. 10/01/2016 de Peru21. Sitio web: <http://peru21.pe/economia/sector-construccion-creceria-44-2016-afirma-inteligo-sab-2232266>.
- Monje, C. (2011). *Metodología de la Investigación Cuantitativa y Cualitativa – Guía didáctica*. Colombia: Universidad SurColombiana. pp. 29-31
- Organización Mundial de la Salud (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Suiza: Actualización mundial. p.9
- Orta, P. (2013). *Tecnología de Construcción de las Explanaciones*. La Habana: Felix Varela. pp. 1-11
- Pardo, A. & Ruiz, M. (2005). *Análisis de datos con SPSS 13 Base*. España: McGraw-Hill. pp. 18-39
- Presidencia del Consejo de Ministros (2001). *Decreto Supremo Nº 074-2001-PCM Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire*. Lima. pp. 13-14
- Radian Corporation (1996). *Manual del Programa de Inventarios de Emisiones de México. Volumen III: Técnicas Básicas de Estimación de Emisiones*. California. pp. 71-76
- Rojo, J. (2007). *Regresión Lineal Múltiple*. Madrid: Instituto de Economía y Geografía. pp. 5-16
- Salcedo, A. (2009). *Aplicación de Índices de Estabilidad Atmosférica al Pronóstico Meteorológico de la Región Centro Norte Costera de Venezuela*. Caracas: Universidad Central de Venezuela. pp. 22-23
- Salvador, M. & Gargallo, P. (2003). *Análisis Exploratorio de Datos*. 13/10/2015, de Universidad de Zaragoza Sitio web: <http://www.5campus.com/lección/aed>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – Senamhi (2013). *Evaluación de la Calidad del Aire en Lima Metropolitana*. Lima. pp. 2-5
- Silva, V. (2010). *Contaminación del aire por material particulado (PM10 y PM2.5)*. México: Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 1-5
- Srijit, B. (2008). IWRM: An Application of Fuzzy Logic in Environmental Impact Assesment. *International Journal of Applied Environmental Sciences*, 3(3), 265-270.
- Swisscontact (2006). *Red de Monitoreo de la Calidad del Aire*. Bolivia. p. 22