

**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN**  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Modelado de Material Particulado menor a 10ug (PM10) generado por la  
Industria de Cal y Cemento, en Caracoto – Puno 2020**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

**Autor:**

Alex Sander Avila Ñaupá  
Vianey Rosa Alata Ccori

**Asesor:**

Dr. Alex Rubén Huamán de la Cruz

Lima, diciembre de 2022

## DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Yo, Dr. Alex Rubén Huamán de la Cruz, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“Modelado de Material Particulado menor a 10ug (PM10) generado por la Industria de Cal y Cemento, en Caracoto – Puno 2020”** de los autores (Alex Sander Avila Ñaupá y Vianey Rosa Alata Ccori) tiene un índice de similitud de 20% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 11 días del mes de enero del año 2023



---

Nombres y apellidos del asesor

### ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a los **21 días** día(s) del mes de **diciembre** del año 2022 siendo **las 08:30 horas**, se reunieron en modalidad virtual u online sincrónica, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: **Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga**, el secretario: **Mg. Joel Hugo Fernandez Rojas**, y los demás miembros: **Mg. Jackson Edgardo Perez Carpio** y el **Ing. Orlando Alan Poma Porras**, y el asesor **Dr. Alex Ruben Huaman de la Cruz**, con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: "Modelado de Material Particulado menor a 10ug

(PM10) generado por la Industria de Cal y Cemento, en Caracoto – Puno 2020" de

el(los)/la(las) bachiller/es: a) **VIANEY ROSA ALATA CCORI**

.....b) **ALEX SANDER AVILA ÑAUPA**

conducente a la obtención del título profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**

*(Nombre del Título profesional)* con mención

en.....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)/s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)/s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): ..... **VIANEY ROSA ALATA CCORI** .....

CALIFICACIÓN	ESC ALAS			Mérito
	Vigesimal	Líteral	Cualitativa	
<b>APROBADO</b>	<b>17</b>	<b>B+</b>	<b>Muy Bueno</b>	<b>Sobresaliente</b>

Candidato (b): ..... **ALEX SANDER AVILA ÑAUPA**

CALIFICACIÓN	ESC ALAS			Mérito
	Vigesimal	Líteral	Cualitativa	
<b>APROBADO</b>	<b>18</b>	<b>A-</b>	<b>Muy Bueno</b>	<b>Sobresaliente</b>

(\*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)/s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

\_\_\_\_\_  
Presidente  
Mg. Milda Amparo  
Cruz Huaranga



\_\_\_\_\_  
Secretario  
Mg. Joel Hugo  
Fernandez Rojas



\_\_\_\_\_  
Asesor  
Dr. Alex Ruben  
Huaman De la Cruz



\_\_\_\_\_  
Miembro  
Mg. Jackson Edgardo  
Pérez Carpio

\_\_\_\_\_  
Miembro  
Ing. Oriando Alan  
Poma Porras



\_\_\_\_\_  
Candidato/a (a)  
Vianey Rosa

\_\_\_\_\_  
Candidato/a (b)  
Alex Sander

# **Modelado de Material Particulado menor a 10ug (PM10) generado por la Industria de Cal y Cemento, en Caracoto – Puno 2020**

Alex Sander Avila Ñaupá<sup>1</sup>; Vianey Rosa Alata Ccori<sup>2</sup> ;

Alex Rubén Huamán de la Cruz<sup>3</sup>

Universidad Peruana Unión, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

## **Resumen**

El presente artículo de investigación tiene como objetivo determinar la dispersión de las concentraciones de Material Particulado menor a 10ug (PM10) generadas por la Industria de Cal y Cemento en el distrito poblado Caracoto – Puno para la temporada de verano e invierno del 2020. Se aplicó el modelo gaussiano en el software Matlab 7.0 para determinar la dispersión de PM10. Para lo cual, se realizó el tratamiento de datos meteorológicos y se generó rosas de vientos para meses representativos de verano e invierno del 2020, asimismo, se identificó los componentes de la planta industrial como la faja transportadora, zaranda vibratoria, horno rotatorio, molino de petcoke, chancadora de martillos y precalentador, que emiten en mayor concentración el PM10. Además, se utilizó la compilación AP-42 de factores de emisión de contaminantes del aire de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) para la estimación de emisión mediante la ecuación de factor de emisión.

Los resultados muestran que la concentración máxima de inmisión del PM10 es de 300 ug/m<sup>3</sup> y 220 ug/m<sup>3</sup> para la temporada de verano e invierno, respectivamente, en un radio de afectación de 4 km, excediendo significativamente los Estándares de Calidad Ambiental de Aire (D. S. N° 004-2017-MINAM), en valores máximos hasta 200% y 120%. Asimismo, se logró estimar que el PM10 puede llegar a afectar en un radio de hasta 4 kilómetros con una concentración de 110 ug/m<sup>3</sup> y 100 ug/m<sup>3</sup> para verano e invierno, desde la fuente de emisión. Por lo tanto, se concluye que la dispersión de PM10 puede alcanzar un radio de afectación promedio de 4 kilómetros para verano e invierno, por ende, se recomienda la construcción de viviendas mayor a una distancia de 4 000 m desde la fuente de emisión, y de esta manera prevenir la afectación de la salud humana y el medio ambiente.

**Palabras clave:** Modelo Gaussiano, PM10, dispersión, emisión, industria de cal y cemento, calidad de aire.

## **Abstract**

The objective of this research article is to determine the dispersion of concentrations of Particulate Material less than 10ug (PM10) generated by the Lime and Cement Industry in the populated district of Caracoto - Puno for the summer and winter season of 2020. It was applied the Gaussian model in Matlab 7.0 software to determine the dispersion of PM10. For which, the treatment of meteorological data was carried out and wind roses were generated for representative months of summer and winter of 2020, likewise, the components of the industrial plant were identified, such as the conveyor belt, vibrating screen, rotary oven, petcoke, hammer crusher and preheater, which emit PM10 in higher concentration. In addition, the AP-42 compilation of emission factors for air pollutants from the Environmental Protection Agency (EPA) was used to estimate the emission using the emission factor equation.

The results show that the maximum immission concentration of PM10 is 300 ug/m<sup>3</sup> and 250 ug/m<sup>3</sup> for the summer and winter seasons, respectively, within a radius of 4 km, significantly exceeding the Environmental Air Quality Standards. (D. S. N° 004-2017-MINAM), in maximum values up to 200% and 120%. Likewise, it was possible to estimate that PM10 can affect a radius of up to 4 kilometers with a concentration of 110 ug/m<sup>3</sup> and 100 ug/m<sup>3</sup> for summer and winter, from the emission source. Therefore, it is concluded that the dispersion of PM10 can reach an average affectation radius of 4 kilometers for summer and winter, therefore, the construction of houses greater than a distance of 4,000 m from the emission source is recommended, and in this way prevent the affectation of human health and the environment.

**Keywords:** Gaussian model, PM10, dispersion, emission, lime and cement industry, air quality.

## 1. Introducción

La contaminación del aire es uno de los problemas ambientales de mayor importancia del siglo actual a nivel mundial, especialmente debido a la industrialización y el desarrollo urbano, principalmente en los países en vías de desarrollo (Khaniabadi et al., 2018). De acuerdo a datos de la Encuesta Anual Manufacturera del año 2003. El sector industrial de cemento, cal y yeso contribuye un 4.3% de valor agregado industrial (Cárdenas et al., 2007). La fabricación de cal y cemento a nivel mundial es de 4.18 mil millones de toneladas/año (2014), teniendo a China como mayor productor con aproximadamente 60% de la producción mundial (Shen et al., 2016). Los grandes contaminantes producidos por la industria de cal y cemento es el material particulado, el cual se conceptualiza como el conjunto de materia dispersada en la atmósfera y condensada en forma sólida o líquida emitidas al aire, así como el polvo de vías, hollín de diésel y las partículas originadas de procesos productivos y están presentes en diferentes tamaños, generalmente son inferiores a 2.5 (PM2.5) micras y 10 (PM10) micras (Arciniégas, 2012). El material particulado se ha considerado un elemento adversario para la salud humana a nivel mundial, ocasionando el 5% de las víctimas por cáncer de pulmón y el 3% de los problemas cardiopulmonares (OMS, 2016), y capaz de ocasionar problemas graves en cuanto a calidad del aire (Ramirez et al., 2018).

Khaniabadi et al., (2018), desarrollaron un estudio de caso para el modelado de dispersión de material particulado de una planta de cal y cemento en Doroud (Irán). Para ello, se utilizó el modelo gaussiano para la dispersión de partículas desde el origen de emisión. Las concentraciones máximas de partículas se obtuvieron en un radio de 1600-1800m alrededor de la fuente de emisión. Los resultados medidos y simulados muestran que el PM10 superó significativamente el diario y anual con un (50ug/m<sup>3</sup>, aproximado al 62.8%) y (20ug/m<sup>3</sup>, aproximado al 82.3%) respectivamente, valores máximos establecido por la Organización Mundial de la Salud. Por ende, de acuerdo a esta investigación, se recomienda construir viviendas de los residentes a una distancia superior a 7500m desde la fuente de emisión.

En Perú, en la región Puno, en el distrito poblado de Caracoto existe la presencia de industria de cal y cemento, estudios recientes asocian la presencia de metales (Ca, Si, Al, Fe) en material particulado (PM10) depositado sobre los techos de las viviendas en las ciudades adyacentes a la industria de producción de cal y cemento, por la recirculación de los vientos (Chui et al., 2017; Abril et al., 2016).

En los últimos 100 años se ha incrementado la contaminación en cuanto a la calidad del aire, por lo cual, se han desarrollado herramientas de dispersión que tienen la capacidad de determinar y modelar las concentraciones de agentes contaminantes en el aire, con el objetivo de garantizar la buena calidad del aire y prevenir alteraciones en el ambiente. Existen diferentes modelos de dispersión: probabilísticos, modelos de caja, eulerianos, gaussianos, lagrangianos, entre otros., sin embargo, el más utilizado es el modelo gaussiano por su fácil aplicabilidad y representatividad, y por la obtención rápida de resultados aproximados (Hernández et al., 2015), donde se considera que la temperatura, humedad, el viento, y las precipitaciones juegan un papel fundamental en el incremento o disminución del contaminante PM10 (Barrenetxea, Pérez, Nieves, & Delgado, 2008)

Actualmente, se ha aumentado el uso de software libre, y las formas de sustituir las aplicaciones privativas (Windows y Microsoft Office) por las de acceso abierto. Hoy por hoy, la información meteorológica se puede conseguir de la web y el software libre aprovecha para procesar la información, que se introducen a través del interfaz de usuario se emplean con el fin de calcular las concentraciones con un modelo de dispersión. (Hernández et al., 2015). Cabe resaltar que en la elaboración de modelos se usan técnicas matemáticas y numéricas para simular la dispersión del contaminante PM10 (Alcaide López, 2000). Siendo claro ejemplo el Matlab 7.0 y lenguaje R, que generalmente se utilizan para cálculos de la dispersión de contaminantes atmosféricos (Ihaka & Gentleman, 2016)



La presente investigación tiene como objetivo determinar la dispersión de las concentraciones del Material Particulado (PM10) generadas por la Industria de Cal y Cemento, mediante la aplicación del modelo gaussiano en software libre, en el distrito poblado de Caracoto cercano a la capital Juliaca del departamento de Puno para temporada de verano e invierno del año 2020.

## 2. Metodología

### 2.1. Área de estudio

La industria de Cal y Cemento está ubicada en la ex hacienda Yungara, a km 11 de la carretera que une las ciudades de Juliaca y Puno, situada en las coordenadas geográficas UTM WGS84, 380428 m Este y 8277520 m Sur y una altitud de 3863 m.s.n.m., distrito de Caracoto, provincia de San Román, región Puno.



Imagen N° 1.

Ubicación geográfica del lugar de estudio (ArGIS 10.5)

Fuente: Elaborado por los investigadores

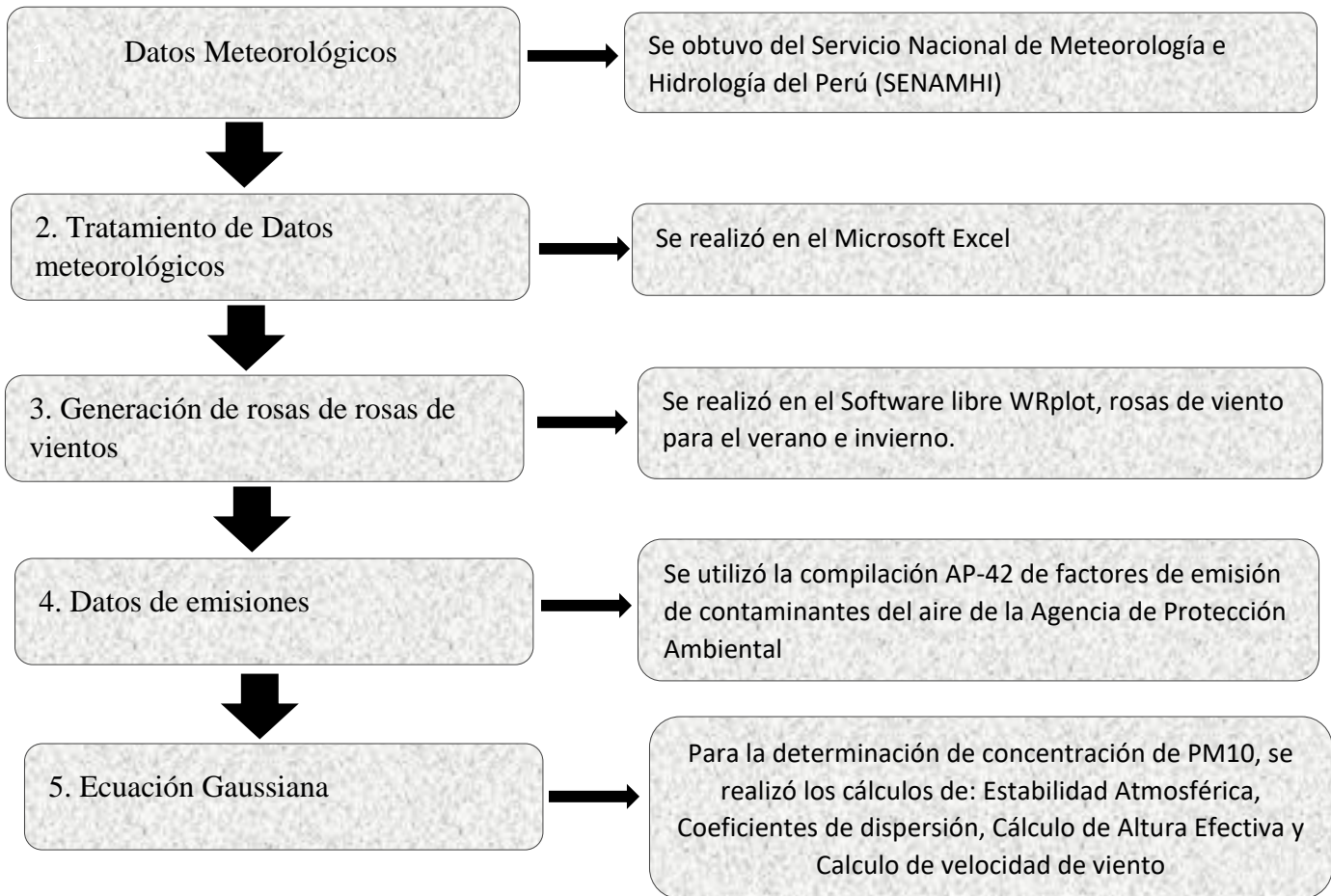
La región de Puno cuenta con una extensión de 3'520,000 hectáreas de praderas naturales, el 95% está formado por una vegetación de pastizales naturales dedicados al pastoreo de una numerosa población ganadera (Cáceres Uscca, 2018). El distrito de Caracoto está situada a una altitud de 3825 m.s.n.m. y es considerado como ciudad alto andina por la geografía del lugar que generalmente es plano, donde abunda la agricultura.

Las condiciones meteorológicas en Puno, como la temperatura promedio ha incrementado en 0,8°C durante el periodo 1960-2010 (Quispe Tonconi, 2015). Según SENAMHI (2012), en la Provincia San Román la temperatura promedio mínima es de 3.4 ° C con una anomalía de 0.2°C, mientras que la temperatura

promedio máximo es de 19.1 ° C con anomalía de 1.5 ° C, y la precipitación pluvial promedio es de 506.2 mm con anomalía de 2.4 ° C, siendo los meses representativos febrero y agosto, de las temporadas verano e invierno, respectivamente, donde la temperatura y precipitación soy muy variables.

En el *Diagrama 1*, se describe de manera resumida la secuencia metodológica de la presente investigación.

*Diagrama 1: Secuencia metodológica*



*Fuente:* Elaborado por los investigadores



## 2.2. Datos meteorológicos

La data meteorológica se obtuvo del “Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)” – Puno, de la Estación Illpa, la cual se ubica en las coordenadas geográficas UTM WGS84 zona 19S, 385691.97 m Este y 8265804.36 m Sur y una altitud de 3827 m.s.n.m., a 12 km lineales en dirección sur desde la fuente de emisión (industria de cal y cemento), y cabe mencionar que la altura del sensor meteorológico desde la superficie del suelo es de 3 m. Se realizó el tratamiento de datos y se generaron rosas de vientos para los meses de febrero y agosto del 2020. Asimismo, se determinó la predominancia de vientos de forma horaria durante 24 horas para ambos meses, de los parámetros velocidad y dirección del viento.

Se utilizó los datos meteorológicos de la estación Illpa para generar rosas de viento de febrero y agosto, meses representativos de verano e invierno mediante el software WRplot, porque las condiciones meteorológicas son similares a la fuente de emisión puntual (industria de cal y cemento), debido a que, la geografía de la zona es plano y por la cercanía de dicha estación meteorológica, que a continuación se describe (*ver gráfico N° 1 y 2*):

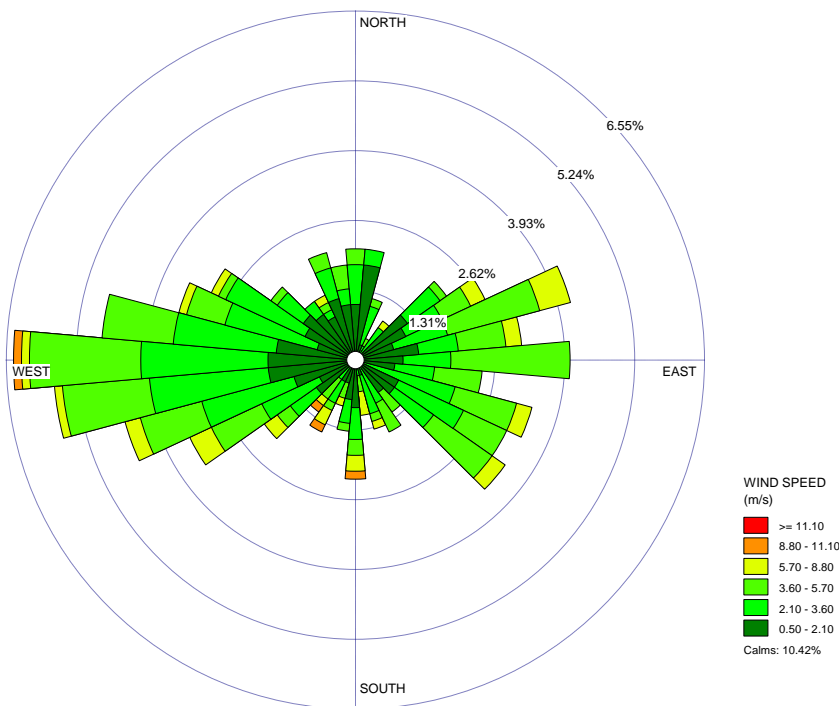


Gráfico N° 1. Rosa de viento del mes de febrero(verano)

En el Gráfico 1 se observa las velocidades y direcciones de vientos registradas para el mes de febrero, donde la predominancia de la dirección del origen del viento es desde el Oeste con una velocidad promedio de 2.66 m/s, también se observa una menor frecuencia de vientos en dirección Este con velocidades máximas en el rango de 5.7 – 8.80 m/s. Los cuadros de colores en la parte inferior derecha del gráfico hacen referencia a los rangos de velocidad de viento.

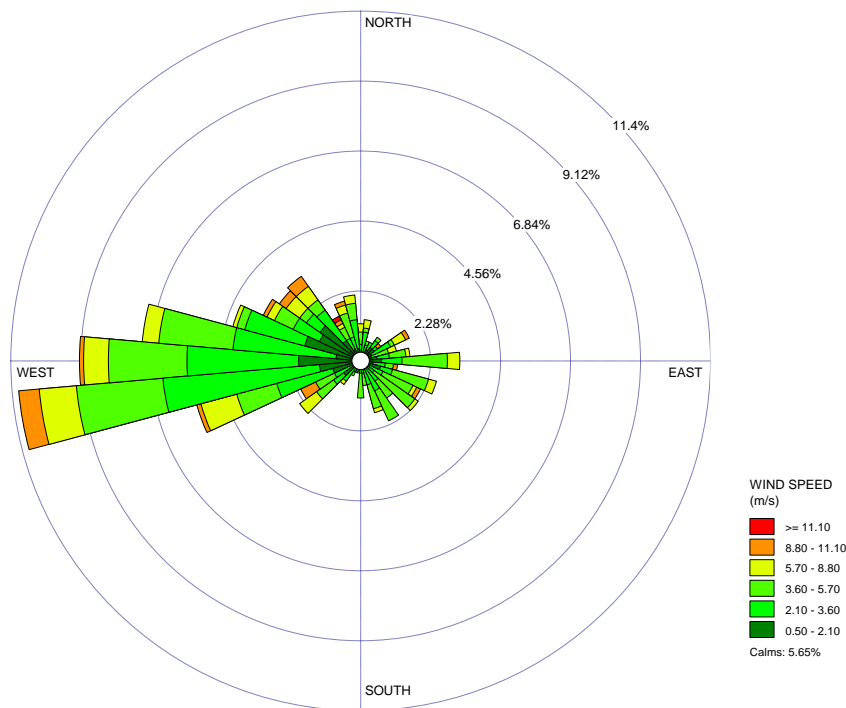


Gráfico N° 2. Rosa de viento del mes de agosto (invierno)

En el Gráfico 2, se observa las velocidades y direcciones de vientos registradas para el mes de agosto, donde se muestra la predominancia del origen del viento del Oeste con velocidades desde 0.5 hasta 11 m/s y registros de vientos en menor frecuencia del Este con velocidades máximas de 3.6 m/s, siendo la velocidad promedio del viento de 3.42 m/s. Los cuadros de colores en la parte inferior derecha del gráfico hacen referencia a los rangos de velocidad de viento. Cabe resaltar que la velocidad media de la temporada invierno es mayor que la temporada de verano.

### 2.3. Datos de emisiones

Para determinar la estimación de emisión del PM10, se utilizó la compilación AP-42 de factores de emisión de contaminantes del aire de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 1997). Para ello, se identificó los componentes de la planta industrial como la faja transportadora, zaranda vibratoria, horno rotatorio, molino de petcoke, chancadora de martillos y precalentador, que emiten en mayor concentración el PM10, desde la recepción de la piedra caliza, preparación de la piedra, calcinación, hidratación, molienda y hasta el despacho final, de la misma forma se identificó las alturas físicas (desde la superficie del suelo) de cada componente, para determinar la altura efectiva de la emisión, dato que sirve para estimar la dispersión del PM10.

Para el cálculo de tasa de emisión de PM10, se utilizó el método factor de emisión, para lo cual se requirió determinar dos valores fundamentales, las tasas de emisión de PM10 de los componentes principales según AP-42 y la cantidad de producción de la industria, se define en la siguiente ecuación:

$$E=FE*FA \dots(1)$$

Donde:

E: emisión de PM10(g/s)

FE: factor de emisión emitido por la industria de cal y cemento según AP-42 (gr/kg)

FA: Producción de cal y cemento (Kg/año)

Se determinó la tasa o caudal de emisión para cada componente como son faja transportadora, Zaranda vibratoria, Horno Rotatorio, Molino de petcoke, Chancadora de martillos y Precalentador, con una producción de 1000 TM/día, con la ecuación antes ya descrita, como se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1

*Valores de tasa de emisión por cada componente de la industria cal y cemento*

Nº	Componentes	Cantidad de Componentes (CC) *	FA* (Kg/Mg)	FA* (gr/kg)	E*(gr/año)	E* (gr/seg)	E*(gr/seg)*CC	ΣE* (gr/seg)
1	Faja Transportadora	3	0,000044	44000	1,606E+13	5,093E+05	1,528E+06	1,563E+11
2	Zaranda vibratoria	1	0,000065	65000	2,373E+13	7,523E+05	7,523E+05	
3	Horno Rotatorio	3	4,3	4300000000	1,570E+18	4,977E+10	1,493E+11	
4	Molino de Petcoke	1	0,0062	6200000	2,263E+15	7,176E+07	7,176E+07	
5	Chancadora de martillos	1	0,0083	8300000	3,030E+15	9,606E+07	9,606E+07	
6	Precalentador	1	0,59	590000000	2,154E+17	6,829E+09	6,829E+09	

Fuente: Elaborado por los investigadores.

\* CC: Cantidad de componentes; FA: Factor de Emisión; E: Tasa de Emisión; ΣE: Sumatoria de las tasas de emisión.

Las tasas de emisión se calcularon para cada componente mediante la ecuación de factor de emisión en unidades g/s (ver Tabla 2).

Tabla 2

*Tabla de tasa de emisión en g/s*

Componentes	Tasa de emisión (g/s)	Altura(m)*
Faja transportadora 1	5,093E+05	7
Faja transportadora 2	5,093E+05	7
Faja transportadora 3	5,093E+05	7
Zaranda vibratoria	7,523E+05	6
Horno Rotatorio 1	4,977E+10	71
Horno Rotatorio 2	4,977E+10	71
Horno Rotatorio 3	4,977E+10	71
Molino de petcoke	7,176E+07	8
Chancadora de martillos	9,606E+07	15
Precalentador	6,829E+09	65

Fuente: Elaborado por los investigadores.

\*Altura desde el nivel del suelo

## 2.4. Ecuación Gaussiana

La siguiente ecuación Gaussiana se utilizó para determinar la concentración del Material Particulado PM10 de los componentes principales que emiten mayor concentración de PM10 desde una fuente fija (Cal y Cemento) (Manzur, Benzal, & González, 2012):

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\mu\sigma_y\sigma_z} \exp \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \left\{ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z-h}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z+h}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \dots(2)$$

Donde:

$x, y, z$ : Coordenadas espaciales en metros (m)

$C(x, y, z)$ : Concentración de contaminante en un punto (x,y,z) ( $g/m^3$ )

$Q$ : Caudal de emisión (g/s)

$\sigma_y, \sigma_z$ : Desviación estándar en las direcciones “y” y “z”, respectivo (m)

$\mu$ : Velocidad media de viento (m/s) en el sentido del eje x

$h$ : Altura efectiva de emisión (m)

El PM10 emitidos por la fuente (Cal y Cemento) se mezclan con el aire y a medida que la pluma viaja se dispersa.

Se utilizó el software matemático MATLAB 7.0 para la simulación y dispersión de los valores de concentración ( $\mu g \cdot m^{-3}$ ) del PM10, aplicando el modelo de Gauss para diferentes clases de estabildades de Pasquill. La pluma está representada por los coeficientes de dispersión, “y” (horizontal) y “z” (vertical), lejos de la línea central. Los parámetros de dispersión se calculan en base a la distancia y la estabilidad atmosférica para las áreas rurales. El contaminante del material particulado (PM10) son los valores de concentración simulados con MATLAB (Manzur et al., 2012).

Asimismo, se utilizó el lenguaje R, consta de un sistema con fines de análisis estadísticos y gráficos; estos últimos se pueden visualizar de manera inmediata en su propia ventana y ser guardados en diferentes formatos, tiene un doble ambiente de programa y lenguaje de programación (Ihaka & Gentleman, 2016).

## 2.5. Estabilidad Atmosférica

La clasificación de estabildades atmosféricas se representó por un código alfabético que va a partir de la A (más inestable) hasta la F (más estable) y para determinar la clase de estabilidad atmosférica se utilizó el método de Griffiths-Pasquill (Olavide, 2018), que están en función de la velocidad del viento, (ver Tabla 3).

Tabla 3  
*Estabilidad atmosférica según el método de Griffiths-Pasquill*

Condiciones meteorológicas que exponen las clases de estabilidad de Pasquill

U10/m/s	Día, radiación solar			Noche	
	Fuerte	Moderada	Débil	Nubes >1/2	Nubes <3/8
< 2	A	A-B	B		
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	D	D	E
5-6	C		D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Fuente: (Pereira, 2018)

## 2.6. Coeficientes de dispersión

En seguida, se muestran las ecuaciones utilizadas en la modelación matemática de la dispersión del contaminante del PM10 en la atmósfera. Cabe indicar que las fuentes se hallan en zona rural con dirección de dispersión hacia las áreas peri urbanas del distrito Caracoto y centros poblados aledañas al distrito. Para calcular los parámetros  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  (coeficientes de dispersión en metros) para el medio rural se emplearon ecuaciones que se aproximan a las curvas de Pasquill-Gifford (Pereira, 2018)

La ecuación para determinar el cálculo  $\sigma_y$  son de la siguiente forma:

$$\sigma_y = 465.11628(x)\tan(TH) \dots(3)$$

Donde:

$$TH = 0.017453293[c - \ln(x)] \dots(4)$$

En la Tabla 4, vienen dados los coeficientes c y d:

Tabla 4  
*Coeficientes c y d de medio rural*

CEA*	c	d
A	24.167	2.5334
B	18.333	1.8096
C	12.5	1.0857
D	8.333	0.72382
E	6.25	0.54287
F	4.1667	0.36191

Fuente:(Pereira,

2018)

\*CEA: Clasificación de estabilidad atmosférica

La ecuación (4) de la distancia en la dirección del viento está en kilómetros (km). La ecuación utilizada para calcular  $\sigma_z$  es de la forma:

$$\sigma_z = ax^b \dots(5)$$

En donde la distancia de la dirección del viento “x” es en kilómetros y “σz” es en metros. Los coeficientes a y b se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5  
Coeficientes a y b

CEA: A;B;C;D	a	b
X(km)		
<0.3	34.459	0.86974
0.31-1	32.093	0.81066
1.01-3	32.093	0.64403
3.01-10	33.504	0.60486
10.01-30	36.65	0.56589
>30	44.053	0.51179

Fuente:(Pereira, 2018)

## 2.7. Calculo de Altura Efectiva

Para determinar la altura efectiva del PM10, se utilizó el promedio de las alturas de emisión de los componentes y el levantamiento de la emisión hasta la pluma gaussiana. La ecuación se describe a continuación:

$$H = h + \Delta h \dots(6)$$

Donde:

$$H = \text{altura efectiva}$$

$$h = \text{promedio de alturas de emision de los componentes}$$

$$\Delta h = \text{levantamiento de la chimenea o estela}$$

Además, el  $\Delta h$  tiene su propia ecuación, el cual se describe líneas abajo:

$$\Delta h = \frac{B}{u} \dots(7)$$

Donde:

$$B = \text{constante característica para cada estabilidad}$$

$$u = \text{velocidad del viento}$$

Donde B es una constante característica para cada clase de estabilidad y para una pila particular. Para encontrar las palabras velocidad del viento  $u_{worst}$  bajo las cuales, la concentración a nivel del suelo tiene un valor máximo, encontramos  $\frac{dx}{du} = 0$ . Diferenciando ecuación, y teniendo en cuenta que obtenemos:

$$H = h_s + \frac{B}{u} \dots(8)$$

$$u = \frac{Bd}{hb} \dots(9)$$

a partir de la cual, la peor altura de emisión H que provoca una concentración máxima a nivel del suelo viene dada por:



$$H = \left(\frac{b+d}{d}\right) h_s \dots(10)$$

Tabla 6

Valores de las constantes a, b, c y d en diferentes clases de estabilidad térmica

CEA:	Clasificación de Estabilidad Atmosférica	a	b	c	d
A	Muy inestable	0.00022	2.1	0.59	0.85
B	Inestable	0.056	1.1	0.41	0.86
C	Poco inestable	0.12	0.01	0.24	0.88
D	Neutro	0.73	0.55	0.14	0.89
E	Poco estable	0.82	0.48	0.11	0.89
F	Estable	0.63	0.45	0.075	0.89

Fuente: (Pereira, 2018)

## 2.8. Cálculo de velocidad del viento

La velocidad del viento por lo general se mide a 10 metros de altura. Dicha velocidad, a niveles menor de 10 metros, se ve disminuida de manera notable debido a los efectos del rozamiento en la superficie terrestre. Para niveles por debajo de 10 metros, la velocidad debe corregirse y determinarse según la fórmula exponencial del perfil vertical del viento, tal como indica la ecuación 11.

$$u_s = u_{ref} \left(\frac{h_s}{z_{ref}}\right)^p \dots(11)$$

Donde:

**p**: pueden ser asumidas por el usuario como función de la clase de estabilidad y la clase de la velocidad del viento.

$u_s$ : Velocidad del viento en el punto de la chimenea

$u_{ref}$ : Velocidad del viento ajustada en valor observado

$z_{ref}$ : Altura de referencia

$h_s$ : Altura de chimenea o Punto de descarga

Tabla 7

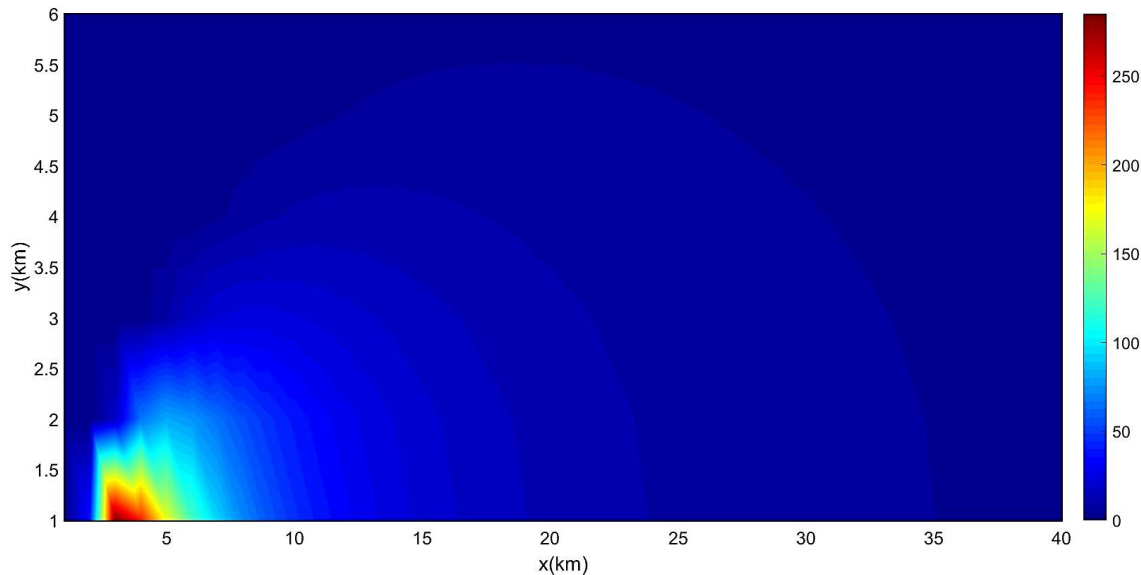
variación vertical del viento

CEA:	Clasificación de Estabilidad Atmosférica	Urbana	Rural
A	Muy inestable	0.15	0.07
B	Inestable	0.15	0.07
C	Poco inestable	0.20	0.10
D	Neutro	0.25	0.15
E	Poco estable	0.30	0.35
F	Estable	0.30	0.35

Fuente: (Pereira, 2018)

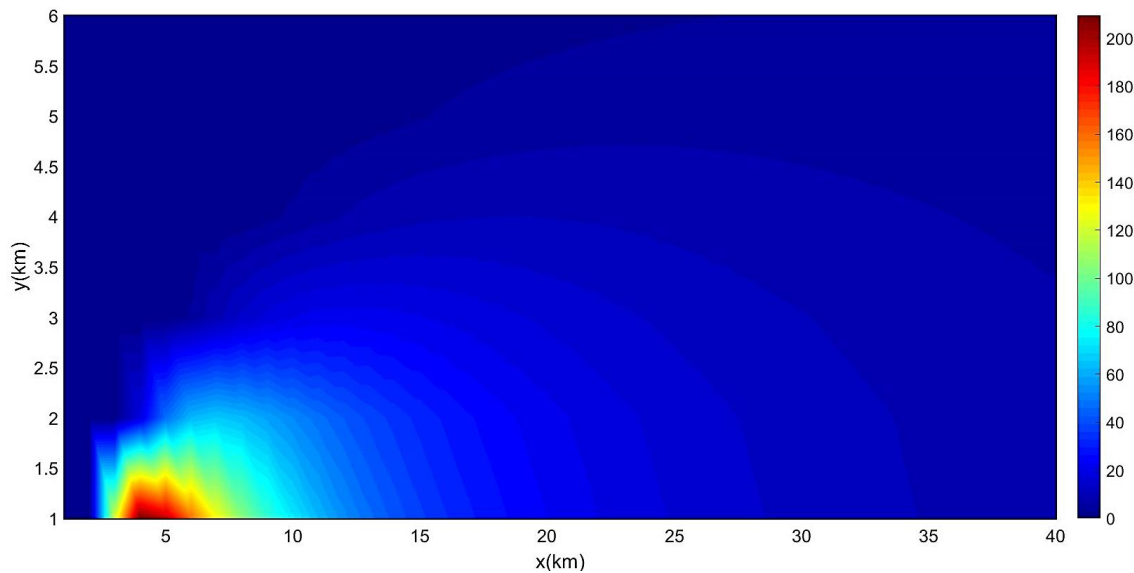
### 3. Resultados y Discusión

En el grafico se observa la dispersión del PM10 desde la fuente (Industria de Cal y Cemento) para la temporada de verano (febrero), donde los colores del lado derecho representan la concentración del PM10 en ug/m3, siendo la concentración máxima de 300 ug/m3 para la temporada de verano, también se observa que el PM10 puede alcanzar un radio horizontal hasta 4 kilómetros desde la fuente de emisión, por lo que, estaría afectando a ciudades o pueblos aledañas, en ese radio de distancia, asimismo, en dirección vertical puede alcanzar hasta 2 kilómetros, no llegando a travesar la troposfera de la atmosfera.



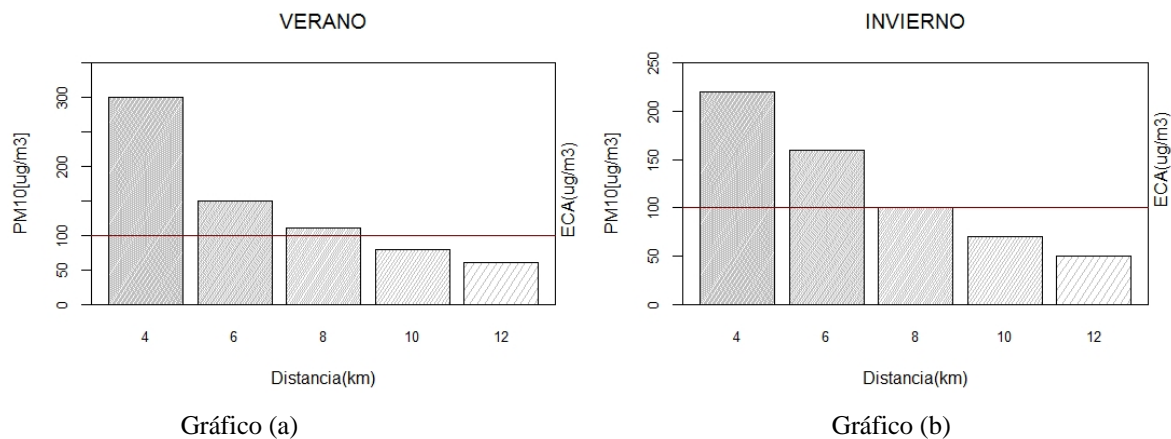
**Ilustración 1.** Resultados de la estimación de dispersión y concentración del PM10 desde la fuente de emisión (Industria de cal y cemento) en la temporada de verano.

En el grafico se observa la dispersión del PM10 desde la fuente (Industria de Cal y Cemento) para la temporada de invierno (agosto), donde los colores del lado derecho representan la concentración del PM10 en ug/m3, siendo la concentración máxima de 220 ug/m3 para la temporada de invierno, también se observa que el PM10 puede alcanzar en radio horizontal hasta 4 kilómetros desde la fuente de emisión, por lo que, estaría afectando a ciudades o pueblos aledañas, en ese radio de distancia, y en dirección vertical puede alcanzar hasta 1.8 kilómetros, no llegando a travesar la troposfera de atmosfera.



**Ilustración 2.** Resultados de la estimación de dispersión y concentración del PM10 desde la fuente de emisión (Industria de cal y cemento) en la temporada de invierno.

En el gráfico a y b se observa el rango de concentraciones del PM10 de 0 a 350 y 250 ug/m<sup>3</sup> el eje vertical Y, mientras que por el eje horizontal X está el radio de afectación del PM10 que va de 4 a 12 km en ambos casos. Siendo el kilómetro 4 el punto de alta concentración de inmisión de PM10 con un valor de estimación de 300 y 220 ug/m<sup>3</sup> para la temporada de verano e invierno, respectivamente. Asimismo, los resultados muestran que la estimación de PM 10 puede llegar a afectar en un radio de hasta 4 kilómetros con una concentración de 110 ug/m<sup>3</sup> y 100 ug/m<sup>3</sup> para verano e invierno, respectivamente, desde la fuente de emisión, de esta manera llegando a afectar la salud humana y el ambiente.



Elaborado por los investigadores  
 -Estándar de Calidad de Aire (ECA) para PM10

#### 4. Discusión

De acuerdo a los resultados de la presente investigación se encontraron deducciones similares y diferentes a las investigaciones realizadas por otros autores, los cuales se discutirán en líneas abajo, siendo el objetivo principal, el determinar la concentración del Material Particulado menor a 10 micras de diámetro mediante el modelo de GAUSS en industria de Cal y Cemento, en el distrito Poblado de Caracoto, región Puno.

La velocidad de viento es fundamental para la dispersión eficiente del PM10 en el ambiente, según (Atamaleki et al., 2019) se obtuvo que a mayor velocidad de viento mejor dispersión del PM10, utilizando diferentes velocidades de viento promedio para verano (3.56 m/s), primavera (3.50 m/s), otoño (2.64 m/s) e invierno ( 1.92 m/s), dando como resultado de dispersión eficiente de PM10 en la temporada de verano; asimismo, en la investigación realizada por (Fo Silva et al., 2022), demuestran que hay mayor dispersión de PM10 con velocidad de viento promedio de 4.5 m/s, que a una velocidad de viento menor de 3 m/s, además, en la investigación realizada por (Mahmoud, Al-alm, Alf, & Abdel-Salam, 2015), señala que hay mayor dispersión de PM10 en el mes de abril con una velocidad de viento de 4.1 m/s, a comparación del mes de julio y noviembre que solamente alcanza a una velocidad de viento de 2.8 m/s, donde la dispersión del PM10 es menos eficiente; mientras que en la presente investigación se trabajó con dos velocidades promedios, para verano con 2.66 m/s e invierno con 3.42 m/s, obteniéndose mejor dispersión de PM10 para la temporada de invierno.

Según la investigación realizada por Khaniabadi et al., (2018), se obtuvieron máximas concentraciones de material particulado con valores de 126,4 ug/m<sup>3</sup>, 118,2 ug/m<sup>3</sup> y 129.6 ug/m<sup>3</sup>, para chimenea 1, chimenea 2 y chimenea 3, respectivamente en un radio de 1600 a 1800 metros alrededor de la fuente en la dirección del viento, donde los resultados excedieron significativamente los Valores Límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud, sin embargo, en la presente investigación realizada se determinó valores máximos de concentración que exceden los Estándares de Calidad Ambiental de PM10 según la Norma D.S. N° 003-2017-MINAM, en el kilómetro 4 con concentraciones máximas de 300 y 220 ug/m<sup>3</sup> para verano e invierno, respectivamente. Por ende, estas concentraciones que superan los valores límites de la norma peruana, pueden ser perjudiciales para el ambiente y las personas que habitan junto a la planta de Cal y Cemento. Cabe mencionar que, puede disminuir las concentraciones del PM10 cuando se aplica métodos de control como son los filtros en las fuentes de emisión de las industrias, sin embargo, para este caso no se utilizó ninguna metodología de control.

La mayoría de las velocidades del viento se toman sobre los 10 m de altura, como en la investigación realizada por (Mahmoud et al., 2015), sin embargo, se puede ajustar las velocidades a alturas mayores que 10 m para facilitar el trabajo en cuanto al modelo de la ecuación de GAUSS y obtener mejores resultados, así como se realizó en la presente investigación, donde se acondicionaron las velocidades a una altura

10 m, ya que esas velocidades se tomaron de una estación meteorológica de altura de 3 m. Cabe indicar, que la velocidad normalmente aumenta con la altura.

## 5. Conclusiones

Las concentraciones máximas de PM10 de inmisión, se ubican en el kilómetro 4 con 300 y 220 ug/m<sup>3</sup> para verano e invierno, respectivamente.

El material particulado determinado excede significativamente los Estándares de Calidad Ambiental de Aire (D. S. N° 004-2017-MINAM), en valores máximos hasta 200% y 120% para verano e invierno, respectivamente.

El uso de la metodología de AP-42 de la EPA, es válido para la determinación del material particulado en la fuente de emisión puntual, debido a que los datos utilizados son confiables y de fácil acceso para estos casos de investigación en el rubro de cal, cemento e industrias que generan contaminantes atmosféricos.

## 6. Recomendaciones

El radio recomendado para la construcción viviendas desde la fuente de emisión tiene que ser superior a una distancia de 4 000 m, y de esta manera prevenir la afectación de la salud humana y el medio ambiente.

Para determinar la estabilidad de Pasquill, se recomienda utilizar todos los parámetros meteorológicos de la estación meteorológica como son, la precipitación, temperatura, radiación solar, humedad, velocidad y dirección del viento, ya que, para la presente investigación se utilizó solamente estos dos últimos.

Desde los resultados de investigación obtenida en la presente investigación se recomienda, la instalación de filtros de manga en las chimeneas de emisión de los componentes de la industria a manera de controlar, mitigar y reducir la concentración del PM10, ya que sobrepasa de manera significativa el estándar de calidad ambiental para aire del Perú.

## 7. Referencias

Abril, G. A., Diez, S. C., Pignata, M. L., & Britch, J. (2016). Concentraciones de partículas que se originan en fuentes industriales y urbanas : Validación de los resultados del modelado de la dispersión atmosférica. *Atmospheric Pollution Research*, 7, 180–189.  
<http://doi.org/10.1016/j.apr.2015.08.009>

Alcaide López, T. (2000). *EFFECTOS AMBIENTALES DEL TRAFICO URBANO: LA EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN MADRID*. Universidad Politécnica de Madr. Retrieved from <https://oa.upm.es/715/1/07200007.pdf>

Arciniégas, C. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable pm 10. *Luna Azul ISSN 1909-2474*, (34), 195–213. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n34/n34a12.pdf>

- Atamaleki, A., Motesaddi Zarandi, S., Fajri, Y., Abouee Mehrizi, E., Hesam, G., Faramarzi, M., & Darbandi, M. (2019). Estimación de la emisión de contaminantes atmosféricos (PM10, CO, SO2y noX) durante el desarrollo de la industria utilizando el modelo AUSTAL 2000: Un nuevo método para el desarrollo sostenible. *ELSEVIER*, 6, 1581–1590. <http://doi.org/10.1016/j.mex.2019.06.010>
- Barrenetxea, C. O., Pérez, A., Nieves, M., & Delgado, G. (2008). Una propuesta de actuación para la enseñanza de una química sostenible. *Aula Y Laboratorio de Química*, 38–41. Retrieved from <file:///D:/USER/Downloads/Dialnet-UnaPropuestaDeActuacionParaLaEnsenanzaDeUnaQuimica-2558211.pdf>
- Cáceres Uscca, R. E. (2018). “*REHABILITACIÓN DE PRADERAS NATIVAS COMPACTADAS A TRAVÉS DE SISTEMAS DE LABRANZA EN UN ECOSISTEMA DEL ALTIPLANO PUNO.*” Universidad Nacional del Altiplano. Retrieved from [http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/9924/Cáceres\\_Uscca\\_Roger\\_Enrique.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/9924/Cáceres_Uscca_Roger_Enrique.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Cárdenas, M., Mejía, C., & García, F. (2007). La industria del cemento en Colombia. *WORKING PAPERS SERIES - DOCUMENTOS DE TRABAJO*, (33). Retrieved from [https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/807/WP\\_2007\\_No\\_33.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/807/WP_2007_No_33.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Chui Betancur, H. N., Acosta Najarro, D. R., & Roque Huanca, B. (2017). IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL DE PARTÍCULAS FINAS (PM2.5) MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE ESCANEAMIENTO CERCA DE LA PLANTA DE CEMENTO DE CESUR DEL DISTRITO DE CARACOTO, PUNO, PERÚ. *Revista Boliviana de Química*, 34(3), 72–78. Retrieved from [http://www.scielo.org.bo/pdf/rbq/v34n3/v34n3\\_a02.pdf](http://www.scielo.org.bo/pdf/rbq/v34n3/v34n3_a02.pdf)
- EPA. (1997). AP-42: Compilation of Air Emissions Factors. Retrieved from <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>
- Fo Silva, L., Schneider, I. L., Artaxo, P., Núñez-blanco, Y., Pinto, D., Flores, É., ... Dotto, G. (2022). Geoquímica del material particulado de una región altamente industrializada del Caribe : base para futuros estudios toxicológicos. *ELSEVIER*, 13. <http://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.11.012>
- Hernández, A., Jauregui, U., Souto, J. A., Casares, J. J., Saavedra, S., Guzmán, F., & Torres, A. (2015). Estado actual de los modelos de dispersión atmosférica y sus aplicaciones. *UCE Ciencia. Revista de Postgrado*, 3(2). Retrieved from <http://uceciencia.edu.do/index.php/OJS/article/view/49>
- Ihaka, R., & Gentleman, R. (2016). R : A Language for Data Analysis and Graphics. *Taylor & Francis*, 5(3), 299–314. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/1390807>
- Khaniabadi, O., Sicard, P., Taiwo, A., De Marco, A., Esmaeili, S., & Rashidi, R. (2018). Modelado de la dispersión de material particulado de una planta de cemento: estudio de caso con viento en contra del viento. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4–11. <http://doi.org/10.1016/j.jece.2018.04.022>
- Mahmoud, M. Ben, Al-alm, I., Alfay, K. El, & Abdel-Salam, H. A. (2015). Emisiones de gases y partículas de Planta de cemento (Fábrica de cemento Caso El Mergheb). *Revista de Ingeniería Del Mansoura*, 40, 1–14. Retrieved from 10.21608/BFEMU.2020.101064



- Manzur, M. E., Benzal, G., & González, S. N. (2012). Modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos. *7mo Congreso de Medio Ambiente*. Retrieved from <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/26838>
- Olavide, P. (2018). Dispersión de contaminantes atmosféricos: Modelo gaussiano de la columna de humo. *Universidad Pablo de Olavide de Sevilla*, 2(1), 1–10. Retrieved from <https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/CA/Pract/Practica1.pdf>
- OMS. (2016). Los efectos de la contaminación del aire sobre la salud humana. Retrieved from <https://www.who.int/es/news/item/27-09-2016-who-releases-country-estimates-on-air-pollution-exposure-and-health-impact>
- Pereira, D. (2018). Simulación de la dispersión de contaminantes en la atmósfera de una planta de generación de electricidad a biomasa. *Desarrollo Y Medio Ambiente*, 8, 376–396. Retrieved from [www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S1683-07892018000100007&lng=pt&nrm=iss&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1683-07892018000100007&lng=pt&nrm=iss&tlng=es)
- Quispe Tonconi, J. (2015). Producción agrícola alimentaria y cambio climático: un análisis económico en el departamento de Puno , Perú. *IDESIA*, 33, 119–136. Retrieved from <https://www.scielo.cl/pdf/idesia/v33n2/art14.pdf>
- Ramirez, L., Michelle, M., Pino, S., & Álvarez, C. (2018). Modelamiento geoestadístico de mediciones de concentración de material particulado ( PM10 ) para la validación de un método simplificado. *Anales Cientificos*, 79(1), 81–91. Retrieved from <http://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/acu/index>
- SENAMHI. (2012). Boletín Regional del SENAMHI-Puno. Puno. Retrieved from <http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/494.pdf>
- Shen, W., Liu, Y., Yan, B., Wang, J., He, P., Zhou, C., ... Ding, Q. (2016). Cement industry of China : Driving force , environment impact and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (November), 0–1. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.033>