

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



*Una Institución Adventista*

**Análisis de la dispersión del dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en las refinerías  
“Talara” y “La Pampilla” usando el modelo Hysplit**

Trabajo de Investigación para obtener el Grado Académico de Bachiller en Ingeniería  
Ambiental

**Autores:**

Miluska Florencia García Carlos  
Diego Rodolfo Ramirez Ticlla

**Asesor:**

Ing. Cristóbal Pinche Laurre

Lima, 23 de diciembre del 2020

## DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Pinche Lauree Cristóbal, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“ANÁLISIS DE LA DISPERSIÓN DEL DIOXIDO DE AZUFRE (SO<sub>2</sub>) EN LAS REFINERIAS “TALARA” Y “LA PAMPILLA” USANDO EL MODELO HYSPLIT”** constituye la memoria que presenta **Miluska Florencia García Carlos y Diego Rodolfo Ramirez Ticlla** para obtener el Grado Académico de Bachiller en Ingeniería Ambiental, cuyo trabajo de investigación ha sido realizado en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 27 días del mes de diciembre del año 2020.



---

Ing. Cristóbal Pinche Lauree

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a..... 23..... día(s) del mes de..... diciembre.....del año 2020.... siendo las.... 10:00.....horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Lima, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

..... Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga....., el (la) secretario(a): ... Ing. Orlando Alan Poma Porras.....

..... y los demás miembros: .....

..... y el (la) asesor(a) .... Ing. Cristóbal Pinche Laure.....

..... con el propósito de administrar el acto académico de sustentación del trabajo de investigación titulada: ..... Análisis de la dispersión del dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en las refinerías "Talara" y "La Pampilla" usando el modelo Hysplit.....

..... de los (las) candidato (as): a) Miluska Florencia García Carlos.....

..... b) Diego Rodolfo Ramirez Ticlla.....

..... c) .....

.....conducente a la obtención del grado académico de Bachiller en:

.....Ingeniería Ambiental.....  
(Denominación del Grado Académico de Bachiller)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (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 al (a la) / a (los) (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 (a Miluska Florencia García Carlos).....

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	19	A	Excelente	Excelencia

Candidato/a (b): Diego Rodolfo Ramirez Ticlla.....

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	19	A	Excelente	Excelencia

Candidato/a (c): .....

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(\*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (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/a


  
\_\_\_\_\_  
Secretario/a

\_\_\_\_\_  
Asesor/a

\_\_\_\_\_  
Miembro

\_\_\_\_\_  
Miembro

  
\_\_\_\_\_  
Candidato/a (a)

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

\_\_\_\_\_  
Candidato/a (c)

# **Análisis de la dispersión del dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en las refinerías “Talara” y “La Pampilla” usando el modelo Hysplit: Una revisión**

## **ANALYSIS OF THE DISPERSION OF SULFUR DIOXIDE (SO<sub>2</sub>) IN THE “TALARA” AND “LA PAMPILLA” REFINERIES USING THE HYSPLIT MODEL: A REVIEW**

García Carlos Miluska Florencia<sup>a1</sup>, Ramírez Ticlla Diego Rodolfo<sup>a</sup>

*E.P Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad  
Peruana Unión, Carretera Central Km.19.5 Ñaña-Chosica*

### **Resumen**

Aunque las refinerías y la industria de refinación de petróleo satisfacen las demandas de energía de la sociedad y producen una variedad de productos químicos útiles, también pueden afectar la calidad del aire. La Organización Mundial de la Salud (OMS) determinó al aire contaminado como uno de los principales riesgos ambientales de los últimos 50 años. Uno de los principales causantes de la alteración del aire es la industria de refinación del petróleo.

Esta industria libera contaminantes como: el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), el metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), los cuales se emiten en varias partes de sus operaciones. Por lo cual la calidad de aire debe monitorearse de manera meticulosa, sobre todo en los países que están en vías de desarrollo donde el aumento de la demanda de energía es considerable. La industrialización y la superpoblación han provocado más emisiones y una menor calidad del aire. Por ello el modelo que se ha empleado es el HYSPLIT, el cual permite predecir cambios en la calidad del aire, mediante el resultado de dispersión del contaminante, con ello se logra entender el vínculo que hay entre las fuentes de contaminantes específicas y la exposición de zonas urbanas cerca de la industria.

Este documento presenta una revisión de los hallazgos y aspectos destacados de varios estudios sobre los impactos en la calidad del aire de las refinerías de petróleo, empleando el modelo HYSPLIT para ser aplicado en las refinerías “La Pampilla” y “Talara”, con el cual se determinó la dispersión del SO<sub>2</sub> hacia las comunidades aledañas.

Palabras clave: Modelo HYSPLIT, calidad de aire, dióxido de azufre, emisiones.

### **Abstract**

Although refineries and the oil refining industry meet society's energy demands and produce a variety of useful chemicals, they can also affect air quality. The World Health Organization (WHO) identified polluted air as one of the main environmental risks of the last 50 years. One of the main causes of air disturbance is the oil refining industry.

This industry releases pollutants such as: carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), nitrous oxide (N<sub>2</sub>O), methane (CH<sub>4</sub>) and sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>), which are emitted in various parts of its operations. Therefore, air quality must be meticulously monitored, especially in developing countries where the increase in energy demand is considerable. Industrialization and overcrowding have led to more emissions and lower air quality. For this reason, the model that has been used is the HYSPLIT, which allows predicting changes in air quality, through the result of dispersion of the pollutant, with this it is possible to understand the link between the sources of specific pollutants and the exposure of urban areas close to industry.

This document presents a review of the findings and highlights of various studies on the impacts on the air quality of oil refineries, using the HYSPLIT model to be applied in the “La Pampilla” and “Talara” refineries, with which the dispersion of SO<sub>2</sub> towards the surrounding communities was determined.

Key words: HYSPLIT model, air quality, sulfur dioxide, emissions.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los impactos de la contaminación y la calidad del aire se han estudiado durante muchos años, y existen preocupaciones importantes en todo el mundo en diversos grados (Álvarez et al., 2007). Esto ha llevado a la creación de índices de calidad del aire, que se utilizan para analizar la gravedad de la contaminación del aire y el nivel de riesgo para la salud, derivado de la contaminación del aire por partículas y gases (Martí Valls, 2017).

La producción de petróleo y gas en el mundo, históricamente es considerada una de las principales fuentes de emisiones antropogénicas conocido por contribuir en la alteración sobre la calidad del aire, aportando al ambiente óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), material particulado (PM), entre otros contaminantes (Elena et al., 2011).

Para determinar la alteración en la calidad del aire, mundialmente se emplean estándares de calidad. Por ejemplo, el Índice de Normas de Contaminantes (PSI) establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA de los Estados Unidos), el Índice Común de Calidad del Aire en los países europeos y el Índice de Salud de la Calidad del Aire en Canadá, por nombrar algunos (“Latest Findings on National Air Quality,” 2002).

Una de las principales fuentes de ingresos del Perú es la industria de extracción de recursos no renovables (minería y petróleo), por lo cual está expuesto a la contaminación ambiental producida por dicha industria; esto implica un importante efecto negativo tanto de la contaminación de aire de exteriores y de interiores.

La calidad de aire en el Perú está altamente contaminada, comparado con otros países latinoamericanos, según un reporte reciente de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Una de las principales causas de la alta concentración del material particulado y los gases de efecto invernadero (GEI) están relacionados con la actividad antropogénica dentro del territorio peruano. Esto comparado con el estándar de calidad de aire (ECA) D.S N° 003-2017MINAM.

El 80% de la presencia de los GEI y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), que se encuentran en los lugares aledaños a refinerías, son de origen antropogénico, mientras que el 20% es de origen natural (Álvarez et al., 2007).

Los contaminantes se liberan en diversas áreas y fuentes en las industrias de refinación de petróleo, desde el proceso de refinación, almacenamiento y manipulación, como también en la propia infraestructura ya sea: tuberías, bridas, válvulas, tanques de almacenamiento y zonas de desechos (Cortés Martínez et al., 2019). Los contaminantes se liberan incluso durante operaciones no rutinarias como el mantenimiento.

La liberación de contaminantes puede variar según la estación y la cantidad de crudo procesado por las refinerías. Por ello es importante la determinación de la trayectoria, concentración de las partículas y contaminantes gaseosos en el aire, se emplean modelos matemáticos estadísticos (PETROPERÚ, 2018).

En el presente artículo se tomó como referencia al modelo HYSPLIT. Esta investigación tiene como objetivo evaluar la información del impacto de las emisiones producto de la refinación del petróleo.

## **2. Marco teórico**

### **2.1. Aire**

El aire es una mezcla de gases que es de vital para el desarrollo de la vida en la tierra, ya que cumple con múltiples funciones una de ellas es el ciclo hidrológico, ya que está compuesta por vapor de agua, la cual produce las precipitaciones mediante el fenómeno de la condensación por lo cual el aire brinda un equilibrio químico (Carazo et al., 2013).

### **2.2. Composición del aire**

La composición del aire está constituida principalmente de oxígeno (20.94%), nitrógeno (78.08%), y otros gases como: argón, Kriptón, hidrogeno entre otros (0.98%) (Martí Valls, 2017).

La composición puede variar de acuerdo la ubicación, ya que mientras más elevado se encuentre la presión será menor y los elementos que lo compongan que sean más pesados serán atraídos por la gravedad (Querol, 2017).

### **2.3. Contaminación del aire**

Querol (2017), Menciona que se da cuando hay la presencia de ciertos compuestos (sólidos, líquidos o gaseosos), que habitualmente no componen el aire y que se incorpora por actividades antropogénicas o de manera natural.

Las sustancias contaminantes pueden ingresar al organismo mediante la respiración y exposición, la intensidad daño dependerá de la concentración del agente contaminante (López, 2020).

### **2.4. Transporte y dispersión de contaminantes en el aire**

La atmosfera está involucrada en el proceso de transporte concentración y destino de las sustancias químicas contaminantes en el aire, para ello se debe tener en cuenta los siguientes factores como: flujos de contaminantes, dispersión y las fuentes (Acevedo & Ni, 2010).

El transporte de contaminantes en el ambiente es conocido como el traslado del contaminante, puede darse por movimientos turbulentos y en algunos casos los contaminantes tiendes a ocupar mayor volumen esto se traduce en una mayor concentración de dicho contaminante (Portal-castillo, 2018).

Technische Universität München (2018), menciona que el transporte y dispersión del contaminante está influenciado por múltiples factores entre los cuales se encuentran: variaciones locales del clima, variación de las condiciones topográficas locales y sobre todo la dirección e intensidad del viento.

### **2.5. Industrias de refinación de petróleo en el Perú**

La industria de refinación en el Perú cuenta con siete (6) plantas de refinación que son: Conchán, Iquitos, Pucallpa y el milagro, talara y “La Pampilla”, las cuales tienen una capacidad de 203 mil barriles diarios. La más importante es “La Pampilla”, con una producción de 110 mil barriles diarios y Talara con 70 mil barriles diarios aproximadamente PETROPERÚ. (2018).

El tipo de producción de los derivados de petróleo producidos en Perú en comparación de América Latina y el Caribe

## **2.6. Fuentes de contaminación del aire de la industria del petróleo**

Hay varias fuentes de emisiones en la industria de refinación de petróleo, y las siguientes son las principales categorías de fuentes de emisión.

### **2.7. Emisiones de proceso**

En la industria de refinación de petróleo, los procesos típicos que tienen lugar incluyen separaciones, conversiones y procesos de tratamiento como craqueo, reformado, isomerización, por nombrar algunos. Las emisiones que surgen de estos procesos se denominan emisiones de proceso y, por lo general, se liberan de los respiraderos del proceso, los puntos de muestreo, las válvulas de seguridad y elementos similares (Elena et al., 2011).

### **2.8. Emisiones de combustión**

Las emisiones de combustión se generan a partir de la quema de combustibles, que se realiza con fines de producción y transporte (Huneus et al., 2020). La naturaleza y la cantidad de las emisiones dependen del tipo de combustible que se utilice. Generalmente, las emisiones de combustión se liberan de fuentes de combustión de combustible estacionarias como hornos, calentadores y calderas de vapor, pero también pueden liberarse de las antorchas, que se utilizan de forma intermitente para la liberación controlada de materiales peligrosos durante las alteraciones del proceso (Rosell-Melé et al., 2018).

### **2.9. Emisiones fugitivas**

Según Rosell-Melé et al. (2018), las emisiones fugitivas incluyen fugas repentinas de vapores de equipos o tuberías, así como pequeñas fugas continuas de los sellos de los equipos. Estas pueden ocurrir en cualquier lugar dentro de una instalación de refinación de petróleo. Las fuentes de emisiones fugitivas son principalmente válvulas, bombas y compresores y bridas de tuberías. Las emisiones fugitivas son una fuente de creciente preocupación, ya que su control efectivo requiere buenos mecanismos de seguridad de procesos para la mitigación, así como programas continuos de detección y reparación (Martí Valls, 2017). (Gonzales et al., 2014), menciona que las emisiones fugitivas minimizarse mediante un diseño adecuado y constante mejora de los procedimientos.

### **2.10. Emisiones de almacenamiento y manipulación**

Estas emisiones son liberadas por el almacenamiento y manejo de petróleo y sus derivados. Este es un problema potencial en todas las industrias petroquímicas y de refinación de petróleo, incluidos los sitios de distribución de productos (Rosell-Melé et al., 2018).

Aunque el transporte de muchos productos de refinería se realiza a través de tuberías, también existen otros medios, como embarcaciones y camiones (Cortés Martínez et al., 2019).

En estos casos, puede haber emisiones durante la transferencia de material a estos vehículos. Estas instalaciones cuentan con tanques para almacenamiento en los sitios de producción y terminales de transporte, y la contaminación del aire aquí surge por la ebullición o pérdidas por evaporación (Acevedo & Ni, 2010).

Las pérdidas respiratorias también contribuyen a las emisiones al aire, ya que el aire dentro de los tanques se expande y se contrae con los cambios de temperatura diarios. Del mismo modo, cuando hay un aumento en el volumen de líquido en un tanque, hay una disminución correspondiente en el volumen de la fase de vapor a medida que se expulsa el aire saturado de COV (Elena et al., 2011).

### **2.11. Emisiones auxiliares**

Las emisiones auxiliares se originan en unidades como torres de enfriamiento, calderas, unidades de recuperación de azufre y unidades de tratamiento de aguas residuales. Las emisiones atmosféricas de las torres de enfriamiento incluyen principalmente gases, que se eliminan cuando la fase acuosa entra en contacto con el aire durante el proceso de enfriamiento (Acevedo & Ni, 2010).

### **2.12. Gases de efecto invernadero (GEI)**

La industria del petróleo consume una cantidad significativa de combustibles fósiles para fines operativos y esto contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero. Los gases de efecto invernadero asociados con las industrias petroquímica y de refinación de petróleo son principalmente metano, dióxido de carbono y nitrógeno (Benavides, 2007).

Cossío & Hernández-Garces (2020), observó que las fugas de equipos y la ventilación de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> de las industrias del petróleo y el gas natural contribuyeron a 317 millones de toneladas métricas de CO<sub>2</sub> equivalente (MTM CO<sub>2</sub>e). De esto, se emitieron 261 MMTCO<sub>2</sub>e de CH<sub>4</sub> y 28,50 MMTCO<sub>2</sub>e de CO<sub>2</sub> de la industria del gas natural, mientras que 27,74 MMT CO<sub>2</sub>e de CH<sub>4</sub> y 0,29 MMTCO<sub>2</sub>e de CO<sub>2</sub> fueron emitidos por la industria del petróleo (Huneus et al., 2020).

Muchos procesos involucrados requieren mucha energía, como la alquilación, la isomerización, etc. En los últimos años, el aumento de las especificaciones de combustible más estrictas plantea un desafío mayor para la industria del petróleo y el gas (Álvarez et al., 2007).

Para cumplir con estos requisitos, la industria está utilizando más energía para eliminar contaminantes como el azufre (Álvarez et al., 2007). El calor y la energía son necesidades persistentes y la primera se requiere en niveles más altos, a menudo indirectamente en forma de vapor. Muchas refinerías satisfacen sus necesidades de calor y electricidad produciéndolas ellas mismas a partir de gas, coque de craqueo catalítico fluido y fuel oil (Santiaguino & Originales, 2014).

### **2.13. Material particulado**

El material particulado (PM) es una preocupación creciente en los últimos años, ya que los estudios han mostrado vínculos con una variedad de impactos en la salud, como la morbilidad respiratoria y cardiovascular, e incluso el cáncer de pulmón. Según la publicación 30 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), el material particulado de mayor tamaño, (más de 10 µm) es interceptado por el moco nasal y traqueal y se concentra principalmente en la región nasofaríngea (Gonzales et al., 2014). Las partículas de muy pequeño diámetro se consideran las más problemáticas, ya que penetran profundamente en los pulmones y se depositan en los bronquiolos y alvéolos de la región del parénquima pulmonar. Por lo tanto, en muchas regiones, la medición y la regulación se centran en las partículas con un tamaño inferior a 2,5 µm (PM<sub>2,5</sub>) (Álvarez et al., 2007).

Según el mecanismo de formación, el material particulado se puede clasificar en dos tipos, a saber, material particulado primario y secundario. La materia particulada primaria se emite directamente desde la fuente a la atmósfera, y una fuente importante de la industria de refinación de petróleo es la Unidad de Craqueo Catalítico Fluido (FCC). El material particulado secundario se forma principalmente en la atmósfera a partir de gases precursores. Como SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y COV, de reacciones fotoquímicas o reacciones en fase líquida en gotas de niebla o nubes. El SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> se oxidan para formar ácido sulfúrico y ácido nítrico respectivamente, y oxidación de SO<sub>2</sub> (Ragothaman & Anderson, 2017).



## **2.14. Ozono**

El ozono es un contaminante secundario que se forma a partir de la reacción entre los COV, los óxidos de nitrógeno y la luz solar. Por lo tanto, la producción de ozono depende de la cantidad de COV, NO<sub>x</sub> y también de la proporción de COV / NO<sub>x</sub>. La industria petrolera puede ser una fuente importante de hidrocarburos (COV) y NO<sub>x</sub>, por lo que contribuye a crear una atmósfera favorable para la formación de ozono (Cortés Martínez et al., 2019). En el caso de ozono resultante de las emisiones de las centrales eléctricas de carbón (que contienen NO<sub>x</sub> pero muy pocos COV), los hidrocarburos deben provenir de la región circundante y la ubicación de la central eléctrica en relación con las fuentes de hidrocarburos reactivos es importante para determinar el impacto en la formación de ozono (“Latest Findings on National Air Quality,” 2002). Sin embargo, la industria petrolera puede liberar ambos precursores de ozono y, por lo tanto, puede tener un impacto más directo en la formación regional de ozono (Castro & Yáñez, 2017).

## **2.15. Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)**

El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Es un contaminante criterio que se estudia debido a su capacidad de contribuir a la producción de lluvia ácida y a los efectos adversos en la salud, pero en menor grado. También es considerado un marcador de la cantidad de combustibles fósiles que se usa en las ciudades (Francis, 2012).

La exposición de las personas a altas concentraciones de SO<sub>2</sub> produce irritación y aumenta la resistencia al flujo de aire en las vías respiratorias; el SO<sub>2</sub> también es dañino para las plantas, pues la exposición a altos niveles de este gas mata el tejido de las hojas (blaquean o ponen amarillas las hojas), también la exposición a bajos niveles de SO<sub>2</sub>; pero por largo plazo puede reducir los rendimientos de las cosechas del trigo o la cebada; este gas también puede dañar o llegar a deteriorar los materiales de construcción (Inca, 2019).

No son gases de efecto invernadero, pero su presencia en la atmósfera puede influenciar el clima. El SO<sub>2</sub> se puede encontrar en los aerosoles (puede reaccionar con una gran variedad de oxidantes producidos fotoquímicamente para formar aerosoles sulfatados) y tiene un efecto adverso en el clima, por lo tanto, debe ser incluido en la modelación del clima (Ciencias et al., 2017).

El dióxido de azufre se encuentra naturalmente en la naturaleza ya sea en volcanes activos o algún proceso de combustión. Mientras que de manera antrópica se produce principalmente por la quema de combustibles fósiles sulfurados (carbón, petróleo, derivados del petróleo, gas natural, etc.) en industrias de generación eléctrica o refinamiento de crudo (Cempre, 1998).

## **2.16. Tipos de modelos**

Los principales tipos de modelos para evaluar la calidad de aire son:

### **2.16.1. Gaussianos.**

Los modelos gaussianos son modelos populares de dispersión que usan la ecuación de distribución de la pluma gaussiana, ya sea en una simple forma, o con una formulación compleja (para dispersar los contaminantes, y estimar las concentraciones en ubicaciones de receptores fijos en toda la red (Universidad Pablo de Olavide, 2017).

### **2.16.2. Modelos Eulerianos.**

Los modelos Eulerianos investigan y observan procesos en puntos fijos en el espacio con el marco de referencia, ya sea estacionario o en movimiento.

Según Moscoso, Vázquez, & Astudillo (2015) “los modelos Eulerianos son aplicables a escalas global, meso-escalar, regional o local. Permiten el procesamiento numérico en paralelo con gran eficiencia y generan información meteorológica en lugares exentos de monitoreo directo”.

### **2.16.3. Modelos Lagrangeanos.**

El enfoque lagrangiano es rastrear el movimiento de partículas contaminantes en una red tridimensional, sujeto a movimiento estocástico de cada partícula individual.

De acuerdo a (Universidad Pablo de Olavide, 2017), la simulación y predicción de la calidad de aire es un problema complicado que involucra factores meteorológicos (como la velocidad y dirección del viento, turbulencia, radiación, nubes, precipitación) y procesos químicos (como emisiones, deposición, transformaciones). En la atmósfera real, los procesos químicos y físicos son acoplados.

Todos los modelos requieren ser configurados para su aplicación en cada caso específico. Estas configuraciones determinan características como el periodo y dominio vertical, parametrizaciones físicas, formato de resultados, entre otros (Cossío & Hernández-Garces, 2020). Dado que la distribución temporal y espacial de las concentraciones de contaminantes depende en gran medida de la meteorología, las parametrizaciones de los modelos meteorológicos (o preprocesadores meteorológicos) se requieren de una atención especial.

### **2.16.4. Modelo HYSPLIT**

“El modelado de las trayectorias de partículas es importante para el estudio de fenómenos de transporte en la atmósfera”.

El modelo Híbrido de Trayectoria Integrada Lagrangiano de Una Sola Partícula (HYSPLIT), desarrollado por el Laboratorio de Recursos del Aire de la NOAA, actualmente es uno de los modelos más utilizados para los cálculos de trayectorias de masas de aire y dispersión (Universidad Pablo de Olavide, 2017).

De acuerdo a (Rosell-Melé et al., 2018), el modelo HYSPLIT es un sistema completo que es diseñado para apoyar un amplio rango de simulaciones relacionadas al transporte, dispersión de los contaminantes atmosféricos de circulación atmosférica a diversas escalas: local, meso escala, sinóptica, hemisférica, planetaria y también por su interacción con los procesos de remoción y además puede calcular las trayectorias de masas de aire desde una región fuente a otra, y de este modo demostrar, si en realidad el vector para el transporte de contaminación atmosférica está presente (“The Petroleum Refining Industry—Air Pollution Problems and Control Methods,” 2016).

La NOAA, menciona que el método de cálculo del modelo es un híbrido entre el enfoque lagrangiano, utilizando un marco de referencia móvil para los cálculos de advección y difusión a medida que las trayectorias o paquetes aéreos se mueven desde su ubicación inicial, y la metodología Euleriana, que usa una cuadrícula tridimensional fija como un marco de referencia para calcular las concentraciones de contaminantes atmosféricos (el nombre del modelo, que ya no se entiende como un acrónimo, reflejó originalmente este enfoque computacional híbrido).

Es utilizado para la estimación de trayectorias, las cuales suceden progresivamente o regresivamente en una masa de aire lo cual resulta importante para determinar los efectos que intervienen en la calidad del aire (Rosell-Melé et al., 2018).

El análisis de trayectorias regresivas ayuda a determinar los orígenes y fuentes de los contaminantes, mientras que el análisis de trayectorias progresivas ayuda a determinar la dispersión de los contaminantes (Technische Universität München, 2018).

De acuerdo a (Portal-castillo, 2018), el cálculo de las trayectorias hacia adelante y hacia atrás permite representar los patrones de flujo de aire para interpretar el transporte de contaminantes en diferentes rangos espaciales y temporales. Con frecuencia, las trayectorias se utilizan para rastrear el historial de la masa de aire o para pronosticar el movimiento de la masa de aire y para dar cuenta de la incertidumbre en los patrones de viento asociados. Agrupar trayectorias que comparten algunas características comunes en el espacio y el tiempo simplifica su análisis e interpretación y también reduce la incertidumbre en la determinación de las vías de transporte atmosférico.

### 2.17. Ventajas y desventajas del modelo frente al modelo AERMOD

Una de las grandes ventajas de este modelo, es que los datos meteorológicos provienen del Centro Nacional de Predicción Ambiental del Servicio Nacional de Meteorología (NCEP, por sus siglas en inglés) el Laboratorio de Recursos de Aire (ARL) de NOAA utiliza rutinariamente los datos del modelo NCEP para su uso en el transporte de calidad del aire y los cálculos de modelado de dispersión (Santiaguino y Originales, 2014).

**Tabla 1**

Ventajas y desventajas del modelo HYSPLIT y el AERMOD

Modelo	Ventajas	Desventajas
HYSPLIT	<p>Se pueden utilizar los datos horarios de la estación meteorológica del sitio de estudio.</p> <p>No hay intercambio de masas de aire con sus alrededores; es decir, las trayectorias de los vientos modelados solamente se ven influenciadas por los parámetros de entrada y no por otro tipo de variables.</p> <p>Se pueden realizar simulaciones de las trayectorias de vientos.</p> <p>No tiene costo, es de acceso libre.</p>	<p>Se requiere dar a los datos meteorológicos el formato de otro software (previamente especificado por el HYSPLIT), antes de ser incorporados al programa.</p>
AERMOD View	<p>Se pueden utilizar los datos horarios de la estación meteorológica del sitio de estudio.</p> <p>Se puede incorporar la topografía del sitio de estudio.</p> <p>El modelo de tipo Gaussiano entrega resultados las concentraciones del contaminante estudiado en poco tiempo.</p>	<p>La desventaja más importante de utilizar dicho modelo es que solamente se pueden realizar modelados de diagnóstico y no de pronóstico.</p> <p>Alto costo de la licencia del software.</p>

### **3. Discusión**

El modelo HYSPLIT es una herramienta adecuada para hacer una evaluación del patrón de dispersión de contaminantes y de trayectorias en las comunidades aledañas a industrias de refinación de petróleo, su base de datos meteorológicos permite tener datos históricos y en tiempo semi real. Además, es un software libre que no tiene costo. A pesar de que el modelo es global y la resolución es baja con un dominio, permite tener aproximaciones de los patrones de dispersión y comparar estos con datos de monitoreo que provienen de mediciones reales.

El modelo al poseer una base de datos meteorológica integrada permite conocer la variación de la dispersión del contaminante en una fuente puntual. Permite corroborar los datos obtenidos con monitoreos ambientales de calidad de aire, que se realizan en la zona.

El modelo fue aplicado a las refinerías “Talara” y “La Pampilla”, las datas a procesar fueron la tasa de emisiones de SO<sub>2</sub>, que está sujeta al petróleo crudo procesado por dichas refinerías, los datos fueron administrados por el Ministerio de Energía y Minas y el Ministerio de Medio Ambiente. Con el fin de conocer la trayectoria del SO<sub>2</sub>, tiempo de dispersión y concentración por horas del dióxido de azufre.

Se procesó la data del día 22 de febrero del 2020, en ambas refinerías, la data procesada fue en un rango de 24 horas. El modelo tomo intervalos de 6 horas para procesar dicha data y se tomó como rango de distancia 3 kilómetros.

#### 4. Resultados obtenidos

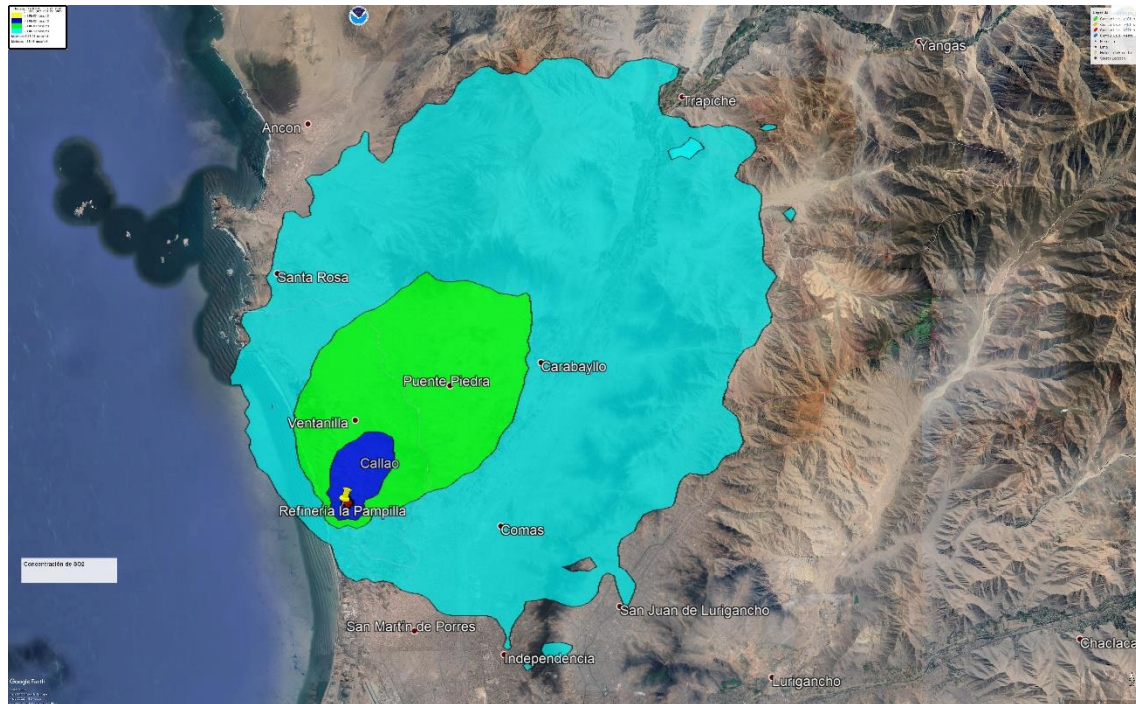


Figura 1 Concentración de SO<sub>2</sub> en la refinería "La Pampilla"

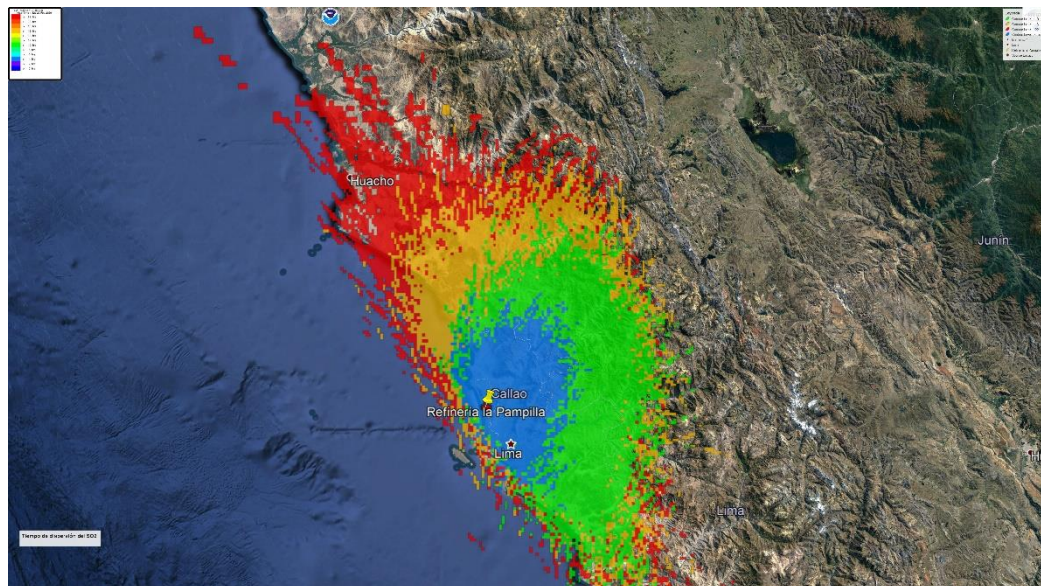


Figura 2 Tiempo de dispersión del SO<sub>2</sub> en la refinería "La Pampilla"



*Figura 3* Dispersión del  $SO_2$  en la refinería "La Pampilla"



*Figura 4* Dispersión del  $SO_2$  en la refinería "Talara"



Figura 5 Concentración de SO<sub>2</sub> en la refinería "Talara"

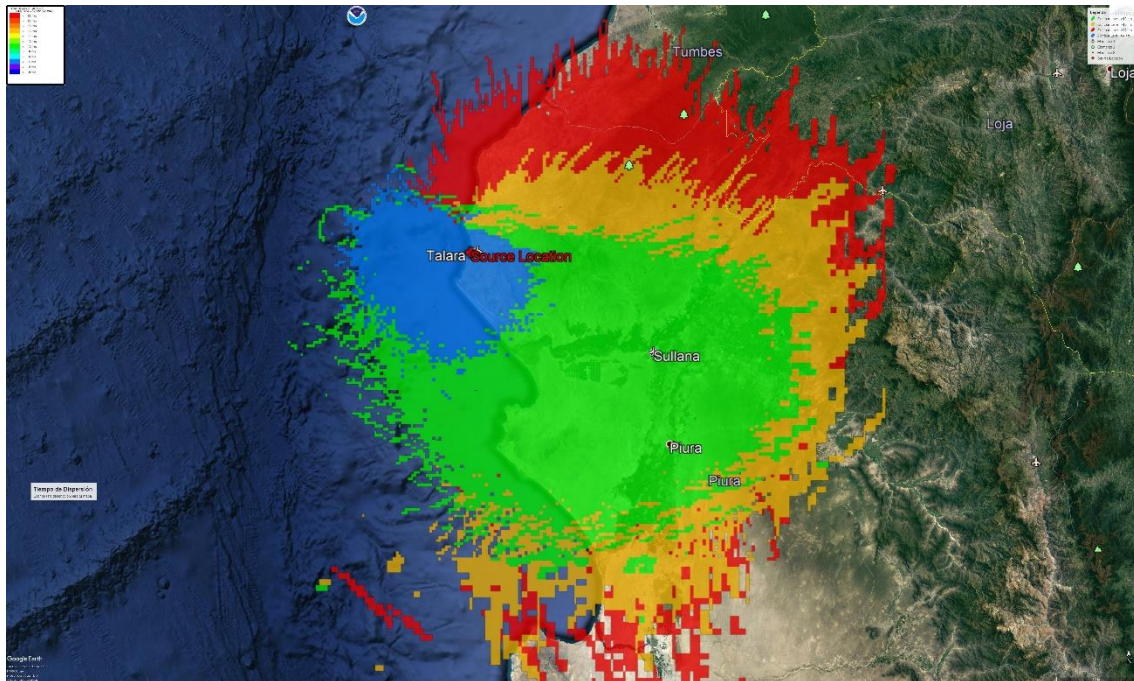


Figura 6 Tiempo de dispersión del SO<sub>2</sub> en la refinería "Talara"

## 5. Interpretación de resultados:

En la **figura 2** se procesó la data de la refinería “La Pampilla” se puede observar la predominancia de viento, en dirección al Nor Este (NE) la tasa de emisiones es de 5064 Kg/m<sup>3</sup>.

Se puede observar el color azul que representa una concentración de máxima de SO<sub>2</sub>, que es de 1064 Kg/m<sup>3</sup> dicha concentración se libera por las inmediaciones de Ventanilla y Callao, mientras que el color amarillo y turquesa representan el debilitamiento de la presencia de dicho contaminante, pero aún se tiene gran presencia del mismo

**En la figura 3** se puede observar la dispersión del contaminante a través de los distritos de Ventanilla, Callao, Carabaylo y Santa Rosa. Se puede observar que la mayor concentración se dio en la misma fuente de emisiones.

En la figura 4 se puede observar el tiempo de dispersión del SO<sub>2</sub> el color celeste nos manifiesta que en 6 horas la el contaminante se dispersó por los distritos del Callao y Ventanilla mientras que a las 22 horas la proyección de dispersión del contaminante llego a inmediaciones de la ciudad de Huacho.

En la **figura 5** se procesó la data de la refinería “Talara” se puede observar la predominancia de viento, en dirección al Nor Oeste (NO) la tasa de emisiones es de 3025 Kg/ m<sup>3</sup>

Se puede observar el color azul que representa una concentración de máxima de SO<sub>2</sub>, que es de 958 Kg/m<sup>3</sup> dicha concentración se libera por las inmediaciones de la ciudad de Talara por la predominancia de dirección de viento del Nor Oeste (NO), las concentraciones de SO<sub>2</sub> se dirigen hacia el Océano Pacífico, el cual sería la zona en la que se ejercería mayor impacto.

En la figura 3 se puede observar la dispersión del contaminante a través de la ciudad de Talara con dirección al Océano Pacífico.

En la **figura 4** se puede observar el tiempo de dispersión del SO<sub>2</sub> el color celeste nos manifiesta que en 6 horas la el contaminante se dispersó por la ciudad de Talara y en 22 horas la proyección de dispersión del contaminante llego a inmediaciones de la playa Zorritos.

## 6. Conclusiones y recomendaciones:

En conclusión, la aplicación del modelo HYSPLIT para el análisis de dispersión del SO<sub>2</sub> es satisfactoria, para determinar la dispersión y dirección del contaminante en el ambiente y en las comunidades aledañas.

Si bien en la fecha elegida para procesar los datos, el contaminante no supero los límites establecidos, se recomienda realizar una data de mínimo 8 meses como lo recomiendan estudios previos.

El factor meteorológico cumple un rol de suma importancia para la dispersión de los contaminantes en el ambiente, por ello es de gran importancia tener una data meteorológica.

La población aledaña a las refinerías mencionadas si se ven afectadas con la presencia de dicho contaminante, pero con la data obtenida no es posible precisar si los niveles de SO<sub>2</sub> en la zona son exclusivamente por la refinería. Se recomienda realizar un inventario de emisiones y corroborar los datos con monitoreos de calidad de aire.



## Bibliografía

- Acevedo, Y., & Ni, Z. (2010). Riesgos ambientales por emisiones atmosféricas en una refinería de petróleo. *Environmental risks in an atmospheric emissions from oil refinery*. 17, 85–91.
- Álvarez, N., Rodríguez, Á., Pompa, P., Reyes, M., & Franco, D. (2007). Impacto Ambiental De La Industria Petrolífera De Santiago De Cuba. Caracterización. *Tecnología Química*, XXVII(2), 83–91.
- Benavides, H. O. (2007). Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el cambio climático. *Ideam*, 1–102. <https://doi.org/IDEAM-METEO/008-2007>
- Carazo, L., Fernández, R., González-barcala, F. J., & Rodríguez, A. (2013). Contaminación del aire interior y su impacto en la patología respiratoria. *Archivos de Bronconeumología*, 49(1), 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2012.04.005>
- Castro, O. A. M., & Yáñez, R. M. (2017). EFECTO DEL TRH SOBRE LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE NITRATOS DE *Pistia stratiotes* Y *Myriophyllum aquaticum* EN ACUAPONÍA. *Jóvenes En La Ciencia*, 3(2), 117–121. <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/1686>
- Cempre. (1998). Incineración. *Manual Girsu*, 267–287. <https://doi.org/10.1016/B978-84-458-2066-7.00016-1>
- Ciencias, F. DE, Álvaro Suárez Córdor, R., & -Perú, L. (2017). UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA "EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE RESPECTO AL SO<sub>2</sub> Y SU RELACIÓN CON EL USO DE COMBUSTIBLE DIÉSEL EN Tesis para Optar el Título Profesional de: INGENIERO AMBIENTAL.
- Cortés Martínez, R., Lobelles-Sardiñas, G. O., & López-Bastida, E. J. (2019). Propuesta de mejora tecnológica en la recuperación de azufre de la refinería de petróleo de Cienfuegos. *Tecnología Química*, 39(1), 160–182.
- Cossío, R. P., & Hernández-Garcés, A. (2020). Inventario de las fuentes fijas que producen contaminantes atmosféricos en la bahía de La Habana. *Revista Cubana de Ingeniería*, 11(1), 31–37.
- Elena, M., Amelia, B., & Lilia, A. (2011). Tecnológico de Durango, Blvd. Felipe Pescador # 1830 Ote. Col. Nueva Vizcaya, C. P. 34080, Durango, Dgo., México. \* Autor responsable: [adriana.martinez@orst.edu](mailto:adriana.martinez@orst.edu) 2 Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional.
- Gonzales, G. F., Zevallos, A., Gonzales-Castañeda, C., Nuñez, D., Gastañaga, C., Cabezas, C., Naeher, L., Levy, K., & Steenland, K. (2014). Environmental pollution, climate variability and climate change: A review of health impacts on the peruvian population. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 31(3), 547–556. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2014.313.94>
- Huneus, N., Denier van der Gon, H., Castesana, P., Menares, C., Granier, C., Granier, L., Alonso, M., de Fatima Andrade, M., Dawidowski, L., Gallardo, L., Gomez, D., Klimont, Z., Janssens-Maenhout, G., Osses, M., Puliafito, S. E., Rojas, N., Ccoyllo, O. S., Tolvet, S., & Ynoue, R. Y. (2020). Evaluation of anthropogenic air pollutant emission inventories for South America at national and city scale. *Atmospheric Environment*, 235, 117606. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117606>
- Inca, L. (2019). Universidad Nacional Tecnológica De Lima Sur. Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, 1–120. <http://repositorio.untels.edu.pe/handle/UNTELS/166>
- Latest findings on national air quality. (2002). EPA Publications, 454 K-02-001, 1–27.
- López, B. (2020). Calidad del aire. *Calidad Del Aire*. <https://doi.org/10.35537/10915/73756>
- Martí Valls, J. (2017). Efectos de la calidad del aire sobre la salud. *FMC Formacion Medica Continuada En Atencion Primaria*, 24(9), 511–514. <https://doi.org/10.1016/j.fmc.2017.03.004>
- PETROPERÚ. (2018). IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES Y SOCIALES. 565–678. <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>
- Portal-castillo, D. (2018). Análisis de las emisiones provenientes de la Refinería Sergio Soto y su influencia en la calidad del aire en el municipio Cabaiguán Analysis of emissions from Refinery Sergio Soto and its influence in air quality in Cabaiguan Municipality. *Revista Cubana de Meteorología*, 24, 412–418.
- Querol, X. (2017). Calidad del aire, partículas en suspensión y metales. *Air quality, particles and metals*. *Rev. Esp. Salud Publica*, 82(5), 447–454. [http://www.scielosp.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1135-57272008000500001&lng=es&nrm=iso&tlng=es%5Cnhttp://scielo.isciii.es/scielo.php?pid=S1135-57272008000500001&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://www.scielosp.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272008000500001&lng=es&nrm=iso&tlng=es%5Cnhttp://scielo.isciii.es/scielo.php?pid=S1135-57272008000500001&script=sci_arttext&tlng=pt)

Ragothaman, A., & Anderson, W. A. (2017). Air quality impacts of petroleum refining and petrochemical industries. *Environments - MDPI*, 4(3), 1–16. <https://doi.org/10.3390/environments4030066>

Rosell-Melé, A., Moraleda-Cibrián, N., Cartró-Sabaté, M., Colomer-Ventura, F., Mayor, P., & Orta-Martínez, M. (2018). Oil pollution in soils and sediments from the Northern Peruvian Amazon. *Science of the Total Environment*, 610–611, 1010–1019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.208>

Santiaguino, A., & Originales, A. (2014). *Revista Aporte Santiaguino*. 7(1), 5–6.

Technische Universität München, L.-M.-U. M. (2018). 済無No Title No Title. In e-conversion - Proposal for a Cluster of Excellence.

The petroleum refining industry—air pollution problems and control methods. (2016). *Journal of the Air Pollution Control Association*, 14(1), 30–33. <https://doi.org/10.1080/00022470.1964.10468237>

Universidad Pablo de Olavide. (2017). *Dispersión de contaminantes atmosféricos: Modelo gaussiano de la columna de humo*. 1. 2(1), 1–10. <https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/CA/Pract/Practical1.pdf>