

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS**

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

“Aplicación de un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos para el dióxido de azufre producido por las plantas termoeléctricas que operan con diésel en la ciudad de Guayaquil”

Previo a la obtención del título de
INGENIERO QUÍMICO

Autores

**JHONN GONZALO MERCHÁN BERREZUETA
JORGE FRANCISCO MUÑOZ LOOR**

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO 2017

RESUMEN

El presente trabajo se basa en el análisis de la dispersión de contaminantes atmosféricos en este caso el SO₂ presente en las emisiones de las principales centrales termoeléctricas de la ciudad de Guayaquil producto de su combustión para generar energía eléctrica, mediante un programa de simulación especializado en dispersión atmosférica. Como fundamento teórico se revisa las principales variables y parámetros que se necesitan para poder desarrollar el modelo de dispersión de Gauss y lograr su óptima ejecución. Dentro de la metodología primero se evalúa los diferentes parámetros meteorológicos existentes en el año 2013 para la ciudad de Guayaquil como son: la nubosidad, velocidad del viento, temperatura y otros. Una vez realizado el análisis con los resultados se promedió a crear los datos meteorológicos que serán ingresados en el programa. Una vez establecidos los parámetros para la ejecución del programa, se procede a revisar los límites establecidos en el marco legal local para el contaminante SO₂, basándose principalmente en el Texto Unificado Legislación Ambiental (TULSMA) para fuentes puntuales de emisión. Finalmente se presentan los resultados obtenidos en forma gráfica y numérica de los puntos máximos obtenidos en la simulación y su comparación con los límites máximos permitidos por el marco legal (TULSMA).

Palabras claves: contaminantes atmosféricos, termoeléctricas, combustión, dispersión.

ABSTRACT

This work is based on the analysis of the dispersion of atmospheric pollutants in this case the SO₂ present in the emissions of the main thermoelectric plants of the city of Guayaquil product of its combustion to generate electrical energy, through a program of simulation specialized in atmospheric dispersion. As a theoretical foundation, we review the main variables and parameters that are needed to develop the Gauss dispersion model and achieve its optimal execution. Within the methodology first evaluates the different meteorological parameters existing in the year 2013 for the city of Guayaquil as they are: cloudiness, wind speed, temperature and others. Once the analysis was done with the results it was measured to create the meteorological data that will be entered in the program. Once the parameters for the implementation of the program are established, the limits established in the local legal framework for the pollutant SO₂ are reviewed, based mainly on the unified text environmental legislation (TULSMA) for point sources of emission. Finally, the results obtained in graphic and numerical form of the maximum points obtained in the simulation and their comparison with the maximum limits allowed by the legal framework (TULSMA) are presented.

Keywords: Atmospheric pollutants, thermoelectric, combustion, dispersion.

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a la Escuela Superior Politécnica del Litoral, a mis padres, a mis tíos y a mi novia.

Jhonn Merchán Berrezueta

Este trabajo lo dedico a la Escuela Superior Politécnica del Litoral, a mis padres, a mis tíos y familiares.

Jorge Muñoz Loor

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, a mis padres Miguel Merchán y Laura Berrezueta, a mis tíos Rogelio Merchán y Nery Palacios, a mi novia Marianela Pesántez, a mis hermanos por su apoyo incondicional en todo el trayecto de mi formación profesional y al Ph. D. Juan Peralta por su guía durante este proyecto.

Jhonn Merchán Berrezueta

Agradezco a Dios, a mis padres Kelly Loor y Johnny Imacaña, a mis hermanos, a mis tíos Hermelinda Vidal y Alberto Vera, a mi amiga Karen Quimi por su apoyo, a mi familia, a todas las personas que han influido en todo el trayecto de mi formación profesional y al Ph.D. Juan Peralta por su guía en este proyecto.

Jorge Muñoz Loor

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Jhonn Gonzalo Merchán Berrezueta

Jorge Francisco Muñoz Loor

Y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

Jhonn Merchán Berrezueta
CI: 0105730725

Jorge Muñoz Loor
CI: 1723120711

SIGLAS

TULSMA	Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente
GLP	Gas Licuado de Petróleo
EN	Norma Europea
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
EP	Empresa Pública
ON	Ontario
CELEC	Corporación Eléctrica del Ecuador
SO ₂	Dióxido de azufre

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	
ABSTRACT.....	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	I
DECLARACIÓN EXPRESA	II
SIGLAS.....	III
TABLA DE CONTENIDO	IV
INDICE DE FIGURAS.....	VI
LISTADO DE TABLAS.....	VII
INDICE DE GRÁFICAS	VIII
INTRODUCCIÓN.....	1
Focos de emisión.	2
Alteraciones atmosféricas producidas por contaminantes antropogénicos	3
Emisiones de dióxido de azufre según normativa TULSMA (Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio de Ambiente).....	3
1. MARCO TEÓRICO.....	6
1.1. La combustión	6
1.1.1. El combustible	7
1.1.2. Comburente.....	7
1.1.3. Combustión completa.....	8
1.1.4. Combustión incompleta	8
1.1.5. Combustión estequiométrica o teórica.....	8
1.1.6. Combustión con exceso de aire.....	8
1.1.7. Combustión con déficit de aire	9
1.1.8. Reacción real	9
1.1.9. Coeficiente de exceso de aire (λ)	9
1.1.10. Diésel y sus propiedades.....	10
1.1.11. Contaminantes primarios y secundarios	11
1.1.12. Difusión o dispersión atmosférica	11
1.1.13. Dióxido de azufre SO ₂	12
1.1.14. Afecciones provocadas por el SO ₂	14
1.2. La atmósfera.....	14
1.2.1. Variación en las proporciones del aire	14

1.2.2.	Capas que forman la atmósfera.....	15
1.2.3.	Equilibrio energético de la atmosfera.....	17
1.2.4.	Estratificación diaria de la atmósfera colindante al suelo	18
1.2.5.	La relación entre la dispersión y la estratificación térmica	19
1.2.6.	Estabilidad atmosférica	19
1.3.	Meteorología y climatología	21
1.3.1.	Radiación solar.....	21
1.3.2.	La temperatura	23
1.3.3.	El viento	25
1.4.	Modelos de dispersión	29
1.4.1.	Clases de modelos	29
1.4.2.	Modelo Gaussiano.....	31
2.	MÉTODOLÓGÍA.....	38
2.1.	Método empleado	38
2.2.	Datos requeridos para la simulación	38
2.3.	Procesamiento de los datos	39
2.3.1.	Modelo de combustión	39
2.4.	Datos meteorológicos	42
2.4.1.	Validación de la data 2007 con respecto a la data de 2013	43
2.5.	Datos de las fuentes	48
2.6.	Datos del receptor.....	49
2.7.	Datos de salida	51
3.	RESULTADOS	53
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	58
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63
5.2.	Recomendaciones	64
	REFERENCIAS	65
	GLOSARIOS DE TÉRMINOS Y SIMBOLOGÍA.....	67
	ABREVIATURAS	68
	APENDICE A.....	69
	APENDICE B.....	70

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Componentes de la reacción de combustión.....	6
Figura 1.2. Reacción de combustión completa.....	8
Figura 1.3. Reacción de combustión incompleta.....	8
Figura 1.4. Reacción de combustión estequiométrica.....	8
Figura 1.5. Reacción real de combustión.....	9
Figura 1.6. Oxígeno efectivo.....	9
Figura 1.7. Variación de la concentración de los contaminantes con la distancia a sotavento de una fuente de longitud finita.....	12
Figura 1.8. Fotografía de emisiones de Inco Superstack (ON, Canadá). Representa la turbulencia, advección y deposición por acción gravitatoria.....	13
Figura 1.9. Capas de la atmósfera estratificadas en variación térmica y de altura.....	16
Figura 1.10. Curva de estado de la baja atmósfera.....	17
Figura 1.11. Espectro de emisión de un cuerpo negro a 300°K.....	18
Figura 1.12. Estratificación diaria de la atmósfera junto al suelo.....	19
Figura 1.13. Variación típica de la temperatura atmosférica respecto a la radiación solar.....	23
Figura 1.14. Ciclo de temperatura anual en dos estaciones de latitud media. (De A.N. STRAHLER, Geografía Física, Omega, Barcelona, 1989).....	24
Figura 1.15. Clasificación de zonas latitudinales.....	24
Figura 1.16. El viento por acción del gradiente de presión.....	25
Figura 1.17. Direcciones del viento geostrófico.....	26
Figura 1.18. El viento en la superficie.....	26
Figura 1.19. Direcciones de vientos a escala global.....	27
Figura 1.20. Rosa de los vientos de la ciudad de Guayaquil.....	28
Figura 1.21. Modelo de proceso.....	31
Figura 1.22. Modelo Gaussiano esquematizado.....	32
Figura 1.23. Ecuación del modelo Gaussiano.....	32
Figura 1.24. Esquema espacial del modelo Gaussiano.....	33
Figura 1.25. Deducción teórica de las desviaciones estándar Gaussianas.....	34
Figura 2.1. Modelo de dispersión esquematizado.....	39
Figura 2.2. Validación de velocidades de la data 2013 con respecto a la del 2007.....	44

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1. Composición estándar aire.....	7
Tabla 1.2. Composición porcentual del diésel #2	10
Tabla 1.3. Composición porcentual del Fuel Oil #4	11
Tabla 1.4. Norma NTE INEN 1489:2012. Requisitos del Diésel N°2	11
Tabla 1.5. Contenido en azufre de diferentes combustibles	13
Tabla 1.6. Componentes permanentes del aire.....	15
Tabla 1.7. Determinación de la estabilidad atmosférica según la velocidad del viento y la radiación solar (SEIN78)	20
Tabla 1.8. Clases de estabilidad según Turner	20
Tabla 1.9. Espectro de radiación solar	21
Tabla 1.10. Categorías de estabilidad en función del índice relativo de radiación neta	22
Tabla 1.11. Categoría de estabilidad de Pasquill	34
Tabla 1.12. Categoría de estabilidad de Pasquill según el viento horizontal	35
Tabla 1.13. Ecuaciones de Briggs para los factores de dispersión en una zona urbana	35
Tabla 1.14. Ecuaciones de Briggs para los factores de dispersión en una zona rural	36
Tabla 2.1. Datos de consumos anuales de las centrales termoeléctricas.....	41
Tabla 2.2. Datos de emisiones generadas por la hoja de cálculo para cada termoeléctrica	42
Tabla 2.3. Desviación de la data meteorológica del 2013	43
Tabla 2.4. Desviación de la data meteorológica del 2007	44
Tabla 2.5. Extracto de los datos meteorológicos	47
Tabla 2.6. Datos técnicos de las fuentes.....	48
Tabla 3.1. Velocidad del viento y horas de incidencia	54
Tabla 4.1. Concentraciones máximas de los periodos anuales y 24 horas	59
Tabla 4.2. Porcentajes de aportación de SO ₂ por las termoeléctricas	60

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 2.1. Rosa de los vientos de la ciudad de Guayaquil del año 2007	45
Gráfica 2.2. Rosa de los vientos de la ciudad de Guayaquil del año 2013	46
Gráfica 2.3. Trasposición de las rosas de los vientos de la ciudad de Guayaquil del año 2007 sobre el 2013.....	46
Gráfica 2.4. Zona urbana de estudio	49
Gráfica 2.5. Grilla y la localización de las centrales termoeléctricas.....	50
Gráfica 2.6. Terreno para la zona de estudio STRM3 (Global- 90m).....	50
Gráfica 2.7. Presentación de los datos de salida	51
Gráfica 3.1. Rosa de los vientos del Aeropuerto de Guayaquil	53
Gráfica 3.3. Simulación sobre el terreno de estudio en un periodo de 24 horas...	55
Gráfica 3.4. Simulación sobre el terreno de estudio en un periodo anual.....	55
Gráfica 4.1. Localización del punto máximo en un periodo de 24 horas.....	58
Gráfica 4.2. Localización del punto máximo en un periodo anual.....	58
Gráfica 4.3. Localización de concentraciones superiores a las permisibles	59
Gráfica 4.4. Localización de concentraciones periodo anual.....	60

INTRODUCCIÓN

La emisión de contaminantes proviene de la combustión de hidrocarburos fósiles entre estos el dióxido de azufre en la atmósfera donde centraremos nuestro trabajo.

La atmósfera está formada por una mezcla de gases cuya composición en su mayoría es nitrógeno, oxígeno, argón, dióxido de carbono y trazas de diferentes gases en pequeñas cantidades consideradas despreciables. Se llaman contaminantes a los compuestos ajenos a la composición típica de la atmósfera, cuya presencia en altas concentraciones provocan daños notables a la biosfera.

La contaminación atmosférica ocurre cuando gases contaminantes se transfieren de la fuente a la atmósfera manteniéndose en ella y viajando con las corrientes de viento. Su evolución depende de los parámetros climatológicos, así como las características físico-químicas del compuesto.

La emisión de los gases comprende el hecho de que estos abandonan la fuente de la que proceden siendo éstas las chimeneas, erupciones volcánicas, gases de escape de vehículos entre otros, cruzando a la atmósfera a lo largo de la misma. La dispersión a la atmósfera se basa en dos parámetros: las condiciones de emisión en la fuente y la meteorología.

La evaluación de contaminantes atmosféricos requiere de cuantificación de las concentraciones del mismo en un ambiente gaseoso a nivel del terreno. Los valores de concentración que se pueden producir se encuentran regulados por organismos locales o nacionales, los cuales establecen los límites máximos permisibles, informando la concentración y período de tiempo de emisión.

Los gases al ser dispersados en la atmósfera se diluyen por medio de procesos naturales como reacciones químicas, absorción por vegetales, cuerpos de agua, nubes y sedimentación; reduciendo la concentración en la atmósfera, pero dando

comienzo a nuevas problemáticas ambientales como contaminación de suelos entre otros.

La contaminación atmosférica antropogénica se ha dado desde que el hombre descubrió el fuego, y a medida que fue evolucionando el hombre, la contaminación fue aumentando. La revolución industrial logró que gobiernos como Inglaterra y Francia empezaran a preocuparse por la contaminación del aire. A mediados de los 1860s se publican estudios que ligan la alta tasa de muertes de varias especies de plantas, siendo la causa la presencia de sulfuros y metales pesados, es así como comienzan los análisis del dióxido de carbono en el aire puesto que ocasiona severas afecciones. (Espert & López, 2004)

Existen diferentes tipos de estudios de contaminación atmosférica, donde se relaciona al foco de emisión y la zona afectada; habiendo estudios a nivel puntual, local, regional, y a nivel nacional e internacional, donde básicamente la diferencia recae en la extensión en la que se aborda el estudio, variando desde decenas a miles de kilómetros de distancia, así como el conocimiento del archivo meteorológico volviéndose más compleja a medida que sube el nivel de estudio.

Focos de emisión.

El archivo meteorológico, levantamiento topográfico del terreno, tasas y condiciones de emisión, índice de reactividad en la atmósfera son los responsables del grado de afección en la zona de interés. Para el estudio deben considerarse los diferentes focos que están dentro del lugar de estudio, y sin depreciar las que se encuentran fuera de la zona porque de alguna manera podría ocasionar grados de afección notorios.

Las fuentes o focos de combustión pueden ser estacionarios, móviles o procesos industriales consistentes. Las centrales termoeléctricas pertenecen a las fuentes estacionarias que con el conocimiento previo del combustible quemado y de la eficiencia de los procesos depurativos en caso de haberlos, se obtiene la concentración de emisiones pudiéndolos clasificar en dos grupos como fuentes puntuales y superficiales, respecto a las tasas de consumo de combustibles altas y bajas respectivamente.

Las emisiones pueden darse al nivel del terreno o a diferentes alturas mediante el uso de chimeneas, siendo la de mayor preocupación la que está a nivel del suelo, puesto que es más agresiva e inmediata para la biota. (Espert & López, 2004)

Alteraciones atmosféricas producidas por contaminantes antropogénicos

Estas emisiones a la atmósfera ocasionan muchas alteraciones, entre las principales tenemos efecto invernadero, smog fotoquímico, daños en la capa de ozono, acidificación ambiental, entre otros. El dióxido de azufre afecta seriamente a la calidad del aire y por ende afectaciones a la salud. Asimismo, existe la posibilidad que pueda formar lluvia ácida, que es la responsable del deterioro de un gran número de construcciones con una rapidez mayor en las que tienen cemento y piedra caliza, acidificación de las aguas, alterando el pH lo cual desenlaza en muertes y deformaciones de las especies que ahí habitan. Las vegetaciones que sufren daños directos al caer la lluvia ácida sobre sus tallos y hojas, quemándolos lentamente, e indirectamente contribuye a un déficit de nutrientes en el suelo por la acidificación del mismo e incluso altera el proceso de absorción de las raíces por acción del aluminio liberado en el suelo ácido.

Emisiones de dióxido de azufre según normativa TULSMA (Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio de Ambiente).

Luego de que los diferentes países se preocuparan por la contaminación atmosférica, crean diferentes organismos de regulación y control de las emisiones contaminantes, Ecuador también cuenta con el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, donde se encuentran todas las leyes en lo que respecta a la protección medio ambiental. El libro VI Anexos 3 y 4, son la norma de emisiones al aire desde fuentes fijas de combustión y norma de calidad del aire ambiente, respectivamente. Estas normas se objetan principalmente en la preservación de la salud de las personas, la calidad del aire, y el bienestar de los ecosistemas en general.

EL libro VI Anexo 3, expone las disposiciones y prohibiciones, así como los límites permitidos de emisiones hacia la atmosfera proveniente de fuentes fijas de combustión.

El uso de herramientas para el modelaje de contaminantes atmosféricos es una alternativa importante para estimar las diferentes concentraciones del dióxido de

azufre en el aire de las zonas urbanas de Guayaquil, las misma que serán explicadas a lo largo del presente trabajo.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1. MARCO TEÓRICO

1.1. La combustión

La combustión es un proceso químico en el que existe una transformación del combustible al reaccionar rápidamente con el oxidante. Tanto el oxidante como el combustible pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos. La reacción da como resultado productos de combustión que en su gran mayoría suelen ser gases, aunque también sólidos como es el hollín.

Este proceso requiere además de una fuente de calor externa para poder dar inicio a la combustión. Los derivados del petróleo son los combustibles de mayor uso en la actualidad, al igual que la madera y el carbón lo fueron en tiempos pasados. El oxidante es el oxígeno que se encuentra en el aire aproximadamente en un 21%, por lo que para la combustión se toma este oxígeno en conjunto con el resto de componentes presentes en el aire.

Los gases que se forman producto de esta reacción poseen elevadas temperaturas debido a la transferencia de calor durante la combustión, y son estos los usados como fuente de calor para los diversos requerimientos. Estos compuestos gaseosos formados dependen de la composición del combustible usado, los cuales al poseer carbono e hidrogeno casi en su totalidad además de nitrógeno, oxígeno, pequeñas cantidades de azufre y otros elementos, originan dióxido de carbono, vapor de agua, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, y en caso de ser una combustión incompleta se formará monóxido de carbono. (Hall, 2015)

La reacción de combustión consta de tres componentes, estos son:

Combustible	+	Comburente	=	Productos de combustión
-------------	---	------------	---	-------------------------

Figura 1.1. Componentes de la reacción de combustión

Fuente: (Biblioteca UNS, 2007)

1.1.1. El combustible

Es toda sustancia de origen fósil denominadas hidrocarburos, cuya composición en su mayoría es hidrogeno y carbono; además pequeñas cantidades de O, N, S, entre otros. Los combustibles más utilizados son carbones minerales (carbón), hidrocarburos líquidos (gasolina, diésel, jet fuel) e hidrocarburos gaseosos (GLP, gas natural).

1.1.2. Comburente

El oxígeno que se encuentra en el aire es el comburente más utilizado en la mayoría de procesos de combustión, en algunas aplicaciones es necesario utilizar aire enriquecido u oxígeno puro.

Tabla 1.1. Composición estándar aire

Aire	% en volumen		% en peso	
	Real	Uso	Real	Uso
Nitrógeno	78,03	79	75,45	76,8
Oxígeno	20,99	21	23,2	23,2
Argón	0,94	0	1,3	0
CO2	0,03	0	0,05	0
Otros	0,01	0	despreciable	0
Peso molecular (Kg/Kmol)			28,97	29

Fuente: (Biblioteca UNS, 2007)

En la combustión de hidrocarburos se producen muchas reacciones químicas elementales y muchas especies químicas dependiendo de la riqueza de aire que se utilice para el proceso de combustión de los hidrocarburos. (Glassman & Yetter, 2008)

Se pueden considerar cinco reacciones de combustión:

- Combustión completa
- Combustión incompleta
- Combustión estequiométrica o teórica
- Combustión con exceso de aire
- Combustión con déficit de aire

1.1.3. Combustión completa

Ocurre cuando todo el combustible reacciona con el comburente produciéndose en su totalidad dióxido de carbono y vapor de agua.



Figura 1.2. Reacción de combustión completa

Fuente: (Warnat, Maas, Dibble, 2006)

1.1.4. Combustión incompleta

En esta reacción se produce monóxido de carbono y vapor de agua debido a que no se logra la oxidación completa del combustible.



Figura 1.3. Reacción de combustión incompleta

Fuente: (Glassman, Yetter, 2008)

1.1.5. Combustión estequiométrica o teórica

Es la cantidad de comburente necesario para la oxidación de todo el combustible sin exceso de aire.



Figura 1.4. Reacción de combustión estequiométrica

Fuente: (Benites, Calderón, Escate, 2007)

1.1.6. Combustión con exceso de aire

Es el proceso de oxidación del combustible con una cantidad de comburente mayor con respecto al estequiométrico. Este tipo de reacción es aplicada para garantizar que todo el combustible reaccione en el proceso.

1.1.7. Combustión con déficit de aire

Es el proceso de oxidación del combustible con una cantidad de comburente menor con respecto al estequiométrico.

1.1.8. Reacción real

La reacción real de combustión característica para cualquier mezcla de combustible y comburente es:

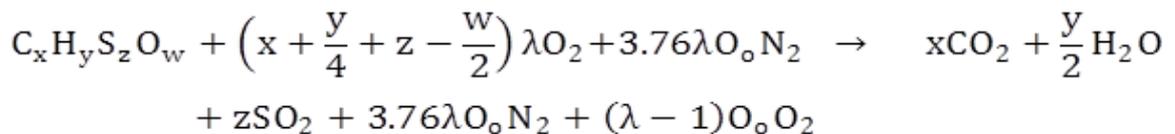


Figura 1.5. Reacción real de combustión

Fuente: (Biblioteca UNSAM, 2005)

$$O_e = \left(x + \frac{y}{4} + z - \frac{w}{2}\right) \lambda = \text{oxígeno efectivo}$$

Figura 1.6. Oxígeno efectivo

Fuente: (Biblioteca UNSAM, 2005)

1.1.9. Coeficiente de exceso de aire (λ)

Es la relación del aire que ingresa al proceso de combustión y el aire teórico o estequiométrico que se requiere para una combustión completa. Este se representa con la letra griega lamda (λ), cuyo valor es adimensional.

- $\lambda > 1$ Ingreso de un exceso de aire, la mezcla se considera pobre y combustión completa.
- $\lambda = 1$ Ingreso requerido de aire para lograr una combustión estequiométrica o teórica.
- $\lambda < 1$ Ingreso de un déficit de aire, la mezcla se considera rica y combustión incompleta.

1.1.10. Diésel y sus propiedades

El diésel también denominado gasoil es un hidrocarburo que se obtiene como producto intermedio en una torre de destilación atmosférica a temperaturas que están alrededor de 190 a 400 [°C]. Generalmente está compuesto por 75% de hidrocarburos saturados los cuales pueden ser: parafinas, isoparafinas y ciclo parafinas; además tiene un 25% de hidrocarburos aromáticos.(Tipanluisa, 2008).

La densidad del diésel es alrededor de 0.820 a 0.860 Kg/L, con respecto a la norma europea (EN 90). La importancia de un valor mínimo para la densidad se evidencia con una potencia máxima idónea para el motor o cámara de combustión. Por otro lado, el límite máximo se fija para evitar la producción de humos al ingresar la carga; debido que en la cámara de combustión se produce un incremento de la riqueza media. (Wauquier, 1994)

Con respecto a la normativa técnica del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), NTE INEN 1489:2012, esta normativa establece las condiciones de comercialización del diésel en el Ecuador, mediante la siguiente tabla se detalla los requisitos de comercialización del Diésel N°2.

Tabla 1.2. Composición porcentual del diésel #2

DIÉSEL #2	
Densidad (Kg/m ³)	846,80
% C	86,87
% H	12,97
% S	0,156

Fuente:(EP Petroecuador, 2016)

Tabla 1.3. Composición porcentual del Fuel Oil #4

Fuel Oil #4	
Densidad (Kg/m ³)	957,40
% C	86,68
% H	11,65
% S	1,67

Fuente:(EP Petroecuador, 2016)

Tabla 1.4. Norma NTE INEN 1489:2012. Requisitos del Diésel N°2

Requisitos	Unidad	Mínimo	Máximo
Punto de inflamación	°C	51	..
φ Contenido de agua y sedimentos	%	..	0,05
W Contenido de residuo carbonoso sobre el 10% del residuo de la destilación	%	..	0,15
W contenido de cenizas	%	..	0,01
Temperatura de destilación del 90%	°C	..	360
Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	2	5
W contenido de azufre	%	..	0,7
Corrosión a la lámina de cobre	Clasificación	..	No. 3
Índice de cetano calculado	..	45	...
Contenido de biodiésel	%	..	5

Fuente: Adaptado y modificado de (NTE INEN 1489:2012, 2012)

1.1.11. Contaminantes primarios y secundarios

Los contaminantes primarios son todos aquellos compuestos que son emitidos abiertamente a la atmósfera y los contaminantes secundarios son aquellos compuestos que se forman a partir de los contaminantes primarios mediante reacciones químicas o fotoquímicas en la atmósfera. Algunos ejemplos de contaminantes primarios son: hidrocarburos no combustionados, material particulado, NO y óxidos de azufre.

1.1.12. Difusión o dispersión atmosférica

El proceso de dispersión no elimina los contaminantes atmosféricos; al contrario, aumentan el volumen afectado por ellos y disminuyen la concentración en la atmósfera. La dilución es el

proceso por el cual en la atmosfera se realiza un movimiento turbulento periódicamente y es el medio por el cual la atmósfera logra reducir la concentración de compuestos impuros. La concentración de los contaminantes se dispersa al desplazarse el aire por encima de una fuente de longitud finita, distanciándose del foco emisor.

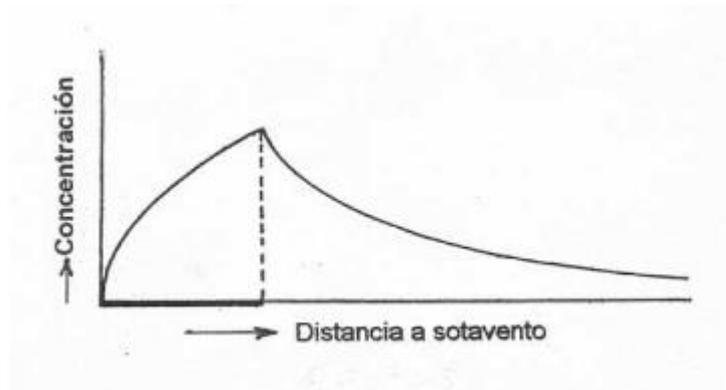


Figura 1.7. Variación de la concentración de los contaminantes con la distancia a sotavento de una fuente de longitud finita

Fuente: (M. Dolors Carrascal, 2008)

La concentración aumenta proporcionalmente a la raíz cuadrada de la distancia y luego decrece rápidamente hasta lograr una mayor distancia en la cual disminuye lentamente.

Por el contrario, las difusiones laterales y verticales no eliminan los contaminantes; sino que los reducen. El aire al pasar por otra fuente suma la contaminación residual no nula con la contaminación adquirida, llevándose a cabo una acumulación de contaminantes hasta que factores externos los elimine. (Puigcerver & Carrascal, 2008)

1.1.13. Dióxido de azufre SO₂

El azufre es uno de los componentes habituales en los combustibles, este puede encontrarse en forma de compuesto orgánico e inorgánico.

Tabla 1.5. Contenido en azufre de diferentes combustibles

Combustible	% peso de S
Carbón	≤ 10
Derivados pesados del petróleo	0.5 – 4
Combustibles Diésel	0.1 – 0.8
Gasolina sin plomo	0.015 – 0.06

Fuente: (Juan Hernández, 2001)

El dióxido de azufre junto a los otros gases luego de la combustión es emitido hacia la atmósfera por las chimeneas, lográndose esta emisión naturalmente debido a la baja densidad de estos gases calientes en comparación con la del aire. Al ser emitido de la fuente, este entra en contacto con las diferentes condiciones meteorológicas, siendo estas las responsables de la dispersión.

Los procesos de difusión y advección son los que rigen la dispersión de los contaminantes en la atmósfera. El dióxido de azufre se difundirá desde la fuente hacia el seno del aire quien está siempre en movimiento, mientras que la advección trata del transporte en fluido, que para este proceso se considera al aire como un campo vector y al dióxido de carbono como un escalar de concentración que está presente en el fluido. La advección se hace más notoria cerca de la superficie de la tierra. (Stockie, 2011)

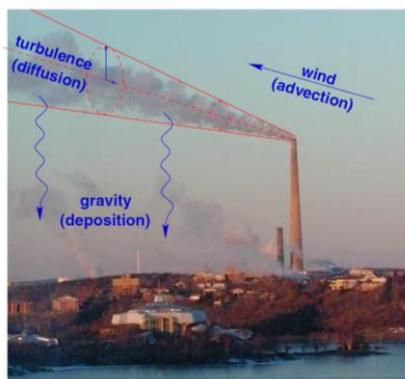


Figura 1.8. Fotografía de emisiones de Inco Superstack (ON, Canadá). Representa la turbulencia, advección y deposición por acción gravitatoria

Fuente: (Stockie, 2011).

1.1.14. Afecciones provocadas por el SO₂

El dióxido de azufre afecta seriamente a la calidad del aire y por ende afectaciones a la salud. Asimismo, existe la posibilidad que pueda formar lluvia ácida, que es la responsable del deterioro de gran número de construcciones con una rapidez mayor en las que tienen cemento y piedra caliza, acidificación de las aguas, alterando el pH lo cual desenlaza en muertes y deformaciones de las especies que ahí habitan. Las vegetaciones que sufren daños directos al caer la lluvia ácida sobre sus tallos y hojas, quemándolos lentamente, e indirectamente contribuye a un déficit de nutrientes en el suelo por la acidificación del mismo e incluso altera el proceso de absorción de las raíces por acción del aluminio liberado en el suelo ácido.

1.2. La atmósfera

La mezcla de gases que generalmente la conocemos como aire, y que rodea a todo el suelo se la conoce como atmósfera. Aproximadamente un 50% de la masa total de aire se encuentra confinado en un radio de 6 Km colindante al suelo. Está formada por una variedad de gases en proporciones diferentes, siendo mayoritariamente el gas nitrógeno, oxígeno y argón frente a mínimos porcentajes de los otros gases que para fines prácticos se los considera despreciables. (Molina, 2013)

Cuando la descripción de estos fenómenos se los estudia en una zona delimitada, se conoce como tiempo atmosférico, el mismo que tiene una alta influencia sobre importantes actividades tales como agricultura, turismo, transporte, entre otras. (Rodríguez, Benito, & Portela, 2004)

1.2.1. Variación en las proporciones del aire

El aire suele permanecer en proporciones casi constantes dentro de un radio atmosférico de 90 km, aunque hay algunos gases que varían dependiendo sus fuentes de emisión y dispersión. Fuera de

este radio, las proporciones empiezan a variar debido a que la difusión es más fuerte que el movimiento turbulento del aire, incrementando así las proporciones relativas de los gases menos densos a medida que incrementa la altura.

Tabla 1.6. Componentes permanentes del aire

Componente	Fórmula	% en volumen
Nitrógeno	N ₂	78,084
Oxígeno	O ₂	20,9476
Argón	Ar	0,934
Neón	Ne	18,18*10 ⁻⁴
Helio	He	5,24*10 ⁻⁴
Kriptón	Kr	1,14*10 ⁻⁴
Xenón	Xe	0,087*10 ⁻⁴
Hidrógeno	H ₂	0,5*10 ⁻⁴
Metano	CH ₄	2,0*10 ⁻⁴

Fuente: (Espert & López, 2004)

Los componentes que varían sus proporciones por lo general son vapor de agua, ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y de carbono. La variación de estos componentes depende de factores como masas de aguas, extensión de vegetales, intensidad de la actividad humana en cuanto a deforestaciones y procesos industriales.

1.2.2. Capas que forman la atmósfera

La atmósfera está formada por cuatro capas radiales, las mismas que se han estratificado acorde a las variaciones de temperatura con respecto a las alturas de cada capa. La que colinda con el suelo es la troposfera que abarca un radio aproximado de 12 km, siguiéndole la estratosfera hasta un radio de 50 km caracterizándose por tener una capa inferior isoterma mientras que en la capa superior existe una relación proporcional directa entre el aumento de la temperatura y altura, pues debido a que ocurren reacciones exotérmicas. Para la

zona radial de entre los 50 y 80 km está la mesosfera, quien tiene una relación inversamente proporcional de temperatura con la altura. Y finalmente la termosfera quien abarca hasta el espacio, la absorción de ondas cortas por parte del oxígeno y nitrógeno hace posible una relación proporcional directa entre la temperatura y altura.

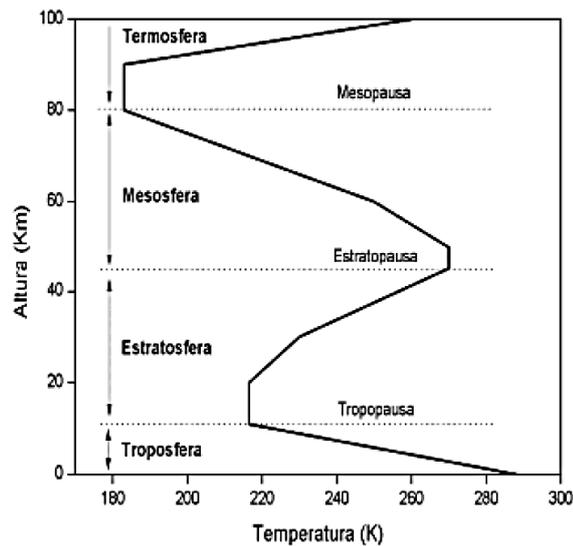


Figura 1.9. Capas de la atmósfera estratificadas en variación térmica y de altura

Fuente: (Molina, 2013)

Debido al mayor caso meteorológico suscitado y puesto que está más cerca al suelo, la capa de mayor interés es la tropósfera que posee una disminución de temperatura en $6,5^{\circ}\text{K/Km}$. Esta capa se subdivide en dos, la que colinda con el suelo llamada capa límite que posee una estratificación de temperaturas diferente al resto de la capa conocida como tropósfera libre. En la capa límite la variación en el día y la noche se produce por la latitud, condición atmosférica, estación, entre otros; apareciendo zonas de gran inestabilidad térmica y la conocida inversión térmica; adicionalmente existe un aumento de la temperatura al aumentar la altitud en determinadas zonas, siendo esto un proceso contrario al común. (Russell, 2009)

Las zonas de inversión térmica son de mucha importancia para la dispersión de los contaminantes, pues la dispersión se vuelve muy

difícil puesto que en estas zonas existe la mínima o nula turbulencia atmosférica, actuando como límites para la dispersión vertical. La dispersión se regiría por la dirección del viento horizontalmente sin atravesar las zonas de inversión. (Espert & López, 2004)

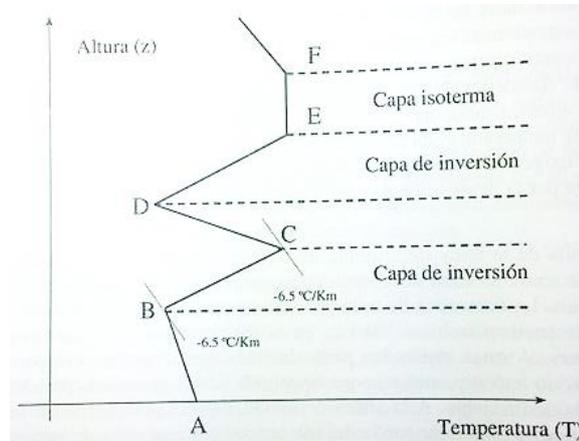


Figura 1.10. Curva de estado de la baja atmósfera

Fuente: (Espert & López, 2004)

1.2.3. Equilibrio energético de la atmósfera

El sistema tierra-atmósfera es abastecido de energía principalmente por el sol, pequeñas cantidades de estrellas, la luna e incluso el núcleo de la tierra misma. El flujo de energía que recibe la tierra es muy grande, pero la temperatura promedio permanece casi invariable, debiéndose a que conforme gana energía gran parte de esta es expulsada hacia el espacio mediante radiación. Este estado de equilibrio es controlado por la atmósfera, por lo que, al variar significativamente la proporción de alguno de estos componentes, se vería afectado este equilibrio energético que se basa tanto en la dispersión como absorción de la radiación solar.

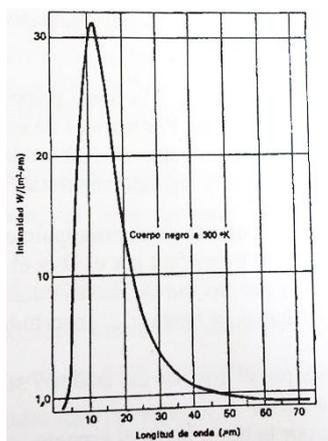


Figura 1.11. Espectro de emisión de un cuerpo negro a 300°K

Fuente: (Espert & López, 2004)

La temperatura promedio de la tierra es 300°K emanando radiación, cuya longitud de onda varía entre 4 y 80 μm aproximadamente, alcanzando la mayor intensidad entre los 10 y 13 μm de longitud de onda. (Espert & López, 2004)

1.2.4. Estratificación diaria de la atmósfera colindante al suelo

La temperatura de una partícula que se desplaza verticalmente en la atmósfera varía acorde al gradiente adiabático seco (en caso de no haber condensación). La trayectoria vertical que desarrolle la partícula ya sea que regrese a su posición de partida o continúe alejándose dependerá de las variaciones de temperatura en dirección vertical de la atmósfera donde se encuentre. De esta estratificación se caracteriza la atmósfera como estable si la partícula vuelve a su posición final, en caso de avanzar la separación se dice que la atmósfera es inestable y en caso de que la velocidad de la partícula coincida con la de la atmósfera, se la considera cómo neutra.

La inversión térmica se da a diario, pero no siempre es la misma, pues esta se ve alterada por la nubosidad, afectando a la intensidad de absorción, además que la radiación solar en todas las épocas del año no es la misma. Cuando existe turbulencia en la atmósfera y mínima presencia de nubosidad suele tenerse una atmósfera neutra.

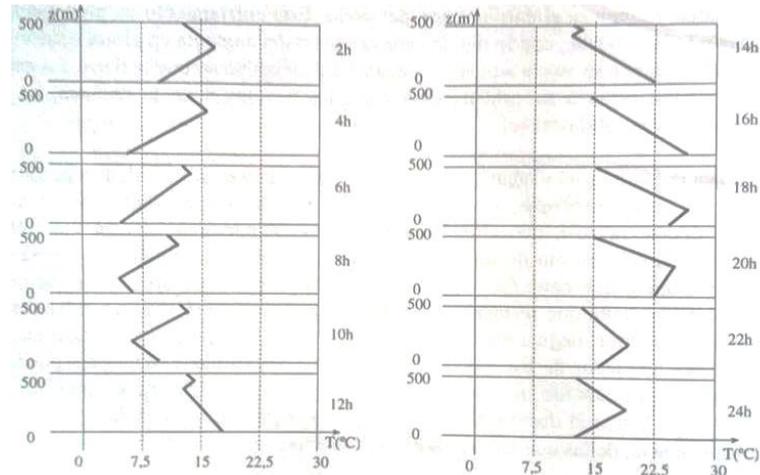


Figura 1.12. Estratificación diaria de la atmósfera junto al suelo

Fuente: (Espert & López, 2004)

1.2.5. La relación entre la dispersión y la estratificación térmica

La turbulencia atmosférica no es fácil de medir, un método simple es utilizar el gradiente de la estratificación térmica que logra relacionarlo como un índice de turbulencia. Un día despejado y soleado son las condiciones idóneas para una turbulencia alta, mejorando eficazmente la velocidad vertical de dispersión de cualquier contaminante; sin embargo, esta capa inestable podría limitarse por una inversión térmica, impidiendo su ascenso y acumulándose en la capa inestable convirtiéndose en un peligro potencial. Si los contaminantes son emitidos en la noche, tienden a ser arrastrados por el viento en un penacho con límites verticales definidos, recorriendo largas distancias antes de ser dispersados verticalmente en una mañana soleada. (Espert & López, 2004)

1.2.6. Estabilidad atmosférica

Una variable que nos indica la capacidad que tiene la atmósfera para poder dispersar un contaminante es la estabilidad atmosférica, o también se puede decir que representa el grado de turbulencia que existe en un instante determinado.

Tabla 1.7. Determinación de la estabilidad atmosférica según la velocidad del viento y la radiación solar (SEIN78)

Velocidad del viento en la superficie m/s (nudos)	Día			Noche	
	Nivel de radiación solar			Cobertura del cielo	
	Elevado	Moderado	Bajo	Más del 50%	Menos del 50%
<2 (4)	A	A-B	B	E	E
2-3 (4-7)	A-B	B	C	E	E
3-5 (7-11)	B	B-C	C	D	E
5-6 (11-13)	C	C-D	D	D	D
>6 (13)	C	D	D	D	D

Fuente: Adaptado y modificado de (Casal, Montiel, & colaboradores, 1999)

El desplazamiento vertical del aire depende de la estabilidad atmosférica puesto que esta precisa el comportamiento de la atmósfera. El nivel de permanencia atmosférica se forma por la diferencia de temperatura entre el aire circundante y una porción del mismo. Esta es la causa del movimiento vertical de la porción dándose una elevación o caída.

Los factores que influyen en los tipos de estabilidad son:

- Velocidad del viento
- Nubosidad
- El flujo neto de radiación solar que alcanza a la tierra

Tabla 1.8. Clases de estabilidad según Turner

Según Turner	Según Pasquill	Denominación
1	A	Extremadamente inestable
2	B	Moderadamente inestable
3	C	Ligeramente inestable
4	D	Neutral
5	E	Ligeramente estable
6	F	Moderadamente estable

Fuente: (Peralta, 2007)

1.3. Meteorología y climatología

Los estudios meteorológicos se clasifican acorde a su extensión en kilómetros y el tiempo que duran, teniendo tres tipos que son macroescala, donde los fenómenos se desarrollan en miles de kilómetros y puede tardar días o semanas, los mesoscala cuyo escenario es de cientos de Km y dura desde horas a días, y por último los de microescala que se llevan a cabo en extensiones de decenas de Km con duraciones entre minutos y horas. (Espert & López, 2004)

1.3.1. Radiación solar

La energía radiante que todo cuerpo emite en función de su temperatura lo hace por radiación electromagnética en forma de ondas, existiendo diversos tipos de radiación, puesto que las longitudes de onda son diferentes; es por esto que al conjunto de las radiaciones en función de su longitud se los conoce como espectro de radiación. La intensidad de energía que transmite una onda es directamente proporcional a la longitud de la misma.

Tabla 1.9. Espectro de radiación solar

Longitud de onda (nm)	Radiación
0,00005	cósmica
1 - 15	γ
15 - 280	x
280 - 380	ultravioleta (corta, media y larga)
380 - 440	violeta
440 - 490	azul
490 - 565	verde
565 - 595	amarillo
595 - 620	anaranjado
620 - 700/760	rojo
760 - 26000	infrarrojo (corta, media y larga)
>26000	ondas de radio, ondas eléctricas

Fuente: (Andrades & Núñez, 2012)

Tabla 1.10. Categorías de estabilidad en función del índice relativo de radiación neta

Velocidad de viento a 10 m [m/s]	Índice relativo de radiación neta						
	4	3	2	1	0	-1	-2
$V < 0,75$	A	A	B	C	D	F	G
$0,75 \leq V < 1,75$	A	B	B	C	D	F	G
$1,75 \leq V < 2,75$	A	B	C	D	D	E	F
$2,75 \leq V < 3,25$	B	B	C	D	D	E	F
$3,25 \leq V < 3,75$	B	B	C	D	D	D	E
$3,75 \leq V < 4,75$	B	C	C	D	D	D	E
$4,75 \leq V < 5,25$	C	C	D	D	D	D	E
$5,25 \leq V < 6,00$	C	C	D	D	D	D	D
$6,00 \leq V$	C	D	D	D	D	D	D

Fuente: (Espert & López, 2004)

1.3.1.1. Influencia de la latitud y continentalidad

La duración del día es dependiente de la geografía de la zona, puesto que la insolación es muy influenciada por la latitud. La incidencia perpendicularmente de la radiación solar sobre el ecuador es de menor tiempo que en el trópico, teniendo así los días más largos en este último.

La tierra y los océanos responden de manera diferente a la radiación solar, pues el agua posee una elevada capacidad calorífica que le permite absorber grandes cantidades de energía a costa de un mínimo incremento en su temperatura, además conduce bien el calor logrando distribuirlo en las masas de agua, a esto se debe su bajo albedo que aproximadamente es 10%. La tierra posee propiedades muy diferentes al agua, puesto que dependerá de las composiciones del suelo, y en general su capacidad calorífica suele ser baja al igual que su conductividad, es por esto que el suelo en el día es más caliente que el agua, y por ende el suelo posee mayor albedo que el agua. (Andrades & Núñez, 2012).

1.3.2. La temperatura

La temperatura es una magnitud referente a la cantidad de calor que posee el objeto de estudio, ésta es muy variante en la atmósfera y de esta depende la altura que alcance el penacho. La variabilidad de esta suele regirse por la topografía del terreno y la ubicación geográfica.

La temperatura del aire aumenta en caso de que la radiación solar sea mayor que la emitida por la tierra, este sobrante de energía es el responsable del aumento, pero en caso de que la radiación solar sea menor a la de la tierra pues la temperatura disminuirá, al igual que con las variaciones de la temperatura de la tierra sucede con la de la atmósfera.

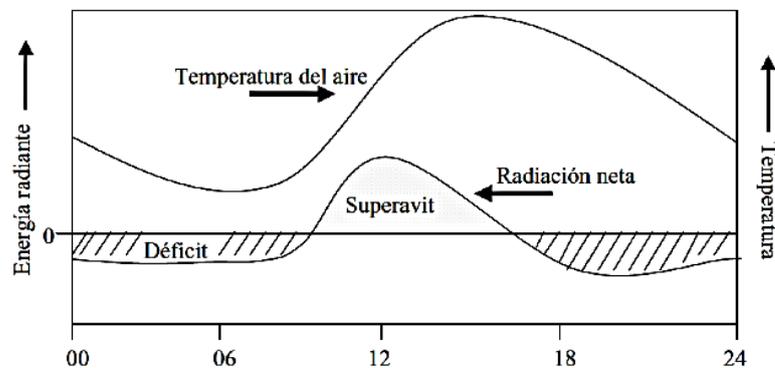


Figura 1.13. Variación típica de la temperatura atmosférica respecto a la radiación solar

Fuente: (Andrades & Núñez, 2012)

1.3.2.1. La variación de temperatura a escala anual

La temperatura presenta dos valores máximos y dos mínimos, en los equinoccios y en los solsticios respectivamente, y presentan muy pocas variaciones respecto a otros años, no así con la curva en general la cual varía dependiendo de las precipitaciones y nubosidades. Las temperaturas más altas suelen alcanzarse alrededor de un mes luego de la máxima insolación,

responsabilizando de este retraso al agua y suelo que influyen en el calentamiento del aire.

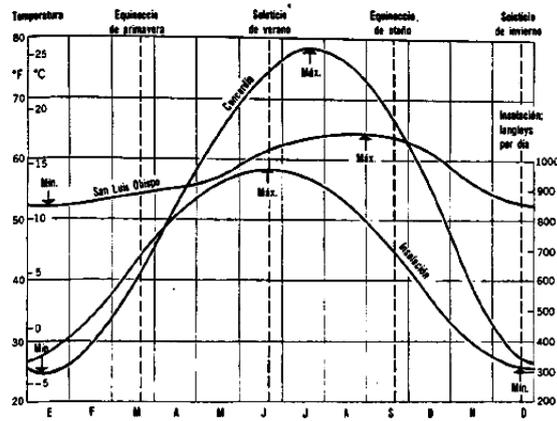


Figura 1.14. Ciclo de temperatura anual en dos estaciones de latitud media. (De A.N. STRAHLER, Geografía Física, Omega, Barcelona, 1989)

Fuente: (Andrades & Núñez, 2012)

1.3.2.2. La temperatura y su distribución geográfica

Las coordenadas de la tierra se las expresa en longitud y latitud, la una en referencia al meridiano y la otra al ecuador respectivamente, y dependiendo de estas zonas la temperatura tendera a variar, puesto que la insolación no es con la misma intensidad, tampoco es el mismo tiempo de duración del día en todas las zonas, logrando temperaturas muy bajas en los polos en comparación a la zona ecuatorial donde la temperatura es más estable y la radiación suele ser perpendicular, en la figura 1.15 se aprecia las zonas en función de la latitud.



Figura 1.15. Clasificación de zonas latitudinales

Fuente: (Andrades & Núñez, 2012)

1.3.3. El viento

El desplazamiento de masa de aire ocasionado por diferenciales de presión en la atmósfera se conoce como viento. Como se ha dicho, el calentamiento en las diferentes zonas no son las mismas, y al estar la presión ligada con la temperatura en las zonas más calientes se crea una depresión y todo lo contrario en las zonas frías, moviéndose así grandes masas de aire de la zona fría a la caliente.

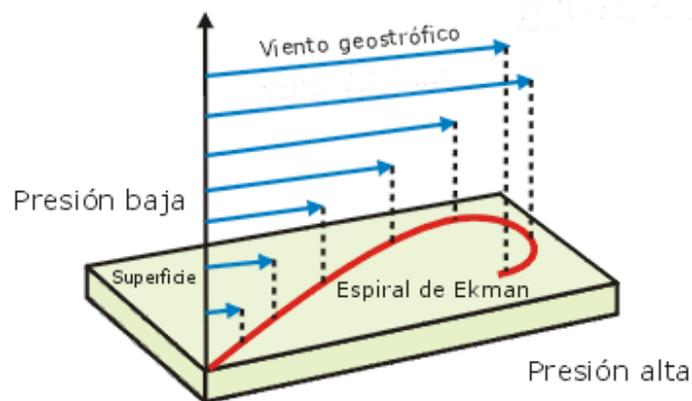


Figura 1.16. El viento por acción del gradiente de presión

Fuente: (ITE, 2010)

1.3.3.1. La dirección del viento y las fuerzas presentes

La zona que mayor insolación y por ende calienta más el aire es en el ecuador, y las más frías la de los polos, habiendo un flujo desde el ecuador hacia los polos y viceversa, existiendo corrientes frías de aire en la tierra, pero gracias al movimiento rotacional del planeta existe una fuerza llamada Coriolis, esta es perpendicular al sentido del viento producido por el gradiente de presión. Estos cambios de dirección se rigen a la ley de Ferrel, que todo fluido se desviará hacia la derecha siempre que se mueva horizontalmente en el hemisferio norte, y hacia la izquierda de encontrarse en el hemisferio sur. Este fenómeno se presenta en las capas superiores de la atmósfera y se conoce como viento geostrófico.

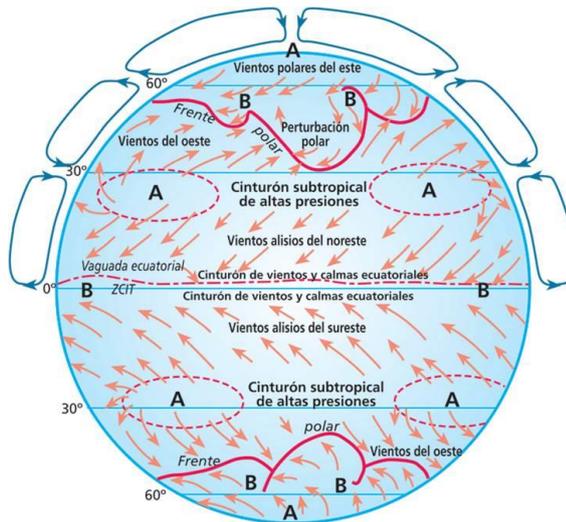


Figura 1.17. Direcciones del viento geostrófico

Fuente: (Mario Dolores, 2012)

Pero este viento geostrófico se ve afectado por las fricciones que presentan las superficies tanto del suelo como agua, alterando las direcciones, por lo que en las zonas latitudinales los vientos adoptarán diferentes sentidos.

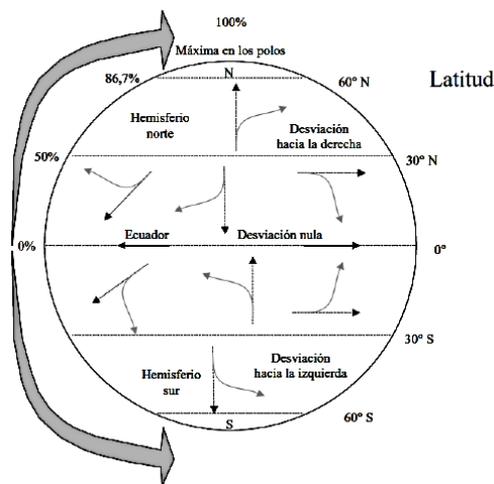


Figura 1.18. El viento en la superficie

Fuente: (Andrades & Núñez, 2012)

1.3.3.2. La clasificación de los vientos

Los vientos pueden ser esporádicos que se forman en cualquier momento y lugar, y que se desplaza en cualquier dirección y puede ser en grandes masas de aire o pequeñas. Mientras que los persistentes tienen su dirección de soplado, y se forman más a

menudo que los esporádicos. Dentro de los persistentes se puede clasificar a los vientos por su campo de acción siendo local, regional y global, además por su intensidad la cual se ve reflejada en notorias modificaciones del suelo.

Los vientos a escala global se pueden predecir por los cinturones de presión, en la que las grandes masas de aire se desplazan de las zonas de alta presión a las de baja presión, es por eso que los vientos soplan en distintas direcciones dependiendo de las zonas en que se encuentre esta atmósfera.

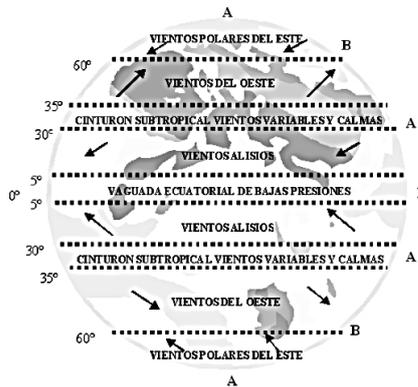


Figura 1.19. Direcciones de vientos a escala global

Fuente: (Andrades & Núñez, 2012)

1.3.3.3. Vientos locales

Las variaciones de presión que coexisten en el planeta causan que exista un sistema general de vientos a nivel global. Debido a las perturbaciones topográficas, grandes masas de agua, vegetación, entre otros; se forman el régimen de vientos a nivel local sobreponiéndose en muchos casos al régimen a nivel global. (Fariña, 2007)

1.3.3.3.1. Vientos de valle

Al anochecer, el aire elevado que se encuentra en contacto con la montaña se enfría más rápido en comparación con el aire presente encima del valle, provocando que descienda por la ladera en dirección al valle. Este tipo de viento se lo denomina catabático.

Por efecto de la radiación solar y durante el día, el proceso se invierte; el viento próximo al valle empieza a subir por la ladera. A este tipo de viento se lo denomina anabático. (Villarubia, 2004)

1.3.3.3.2. Brisas de mar y brisas de tierra

En el día el suelo se calienta más rápido que el mar, debido al calor específico del suelo que es menor que el del agua. Esto provoca una corriente de aire ascendente formando una depresión dando lugar a la circulación del aire de mar a la tierra. A este fenómeno se lo denomina brisa marina. En la noche el proceso se invierte y el viento circula de tierra al mar, a este proceso se lo conoce como brisas de tierra. Por lo general las brisas de mar son más fuertes que las de tierra. Además, entre el anochecer y amanecer se lo conoce como periodos de calma. (Villarubia, 2004)

1.3.3.3.3. Rosa de los vientos

La rosa de los vientos es una representación gráfica de la dirección y velocidad del viento las 24 horas del día. (Pongutá, 2003)

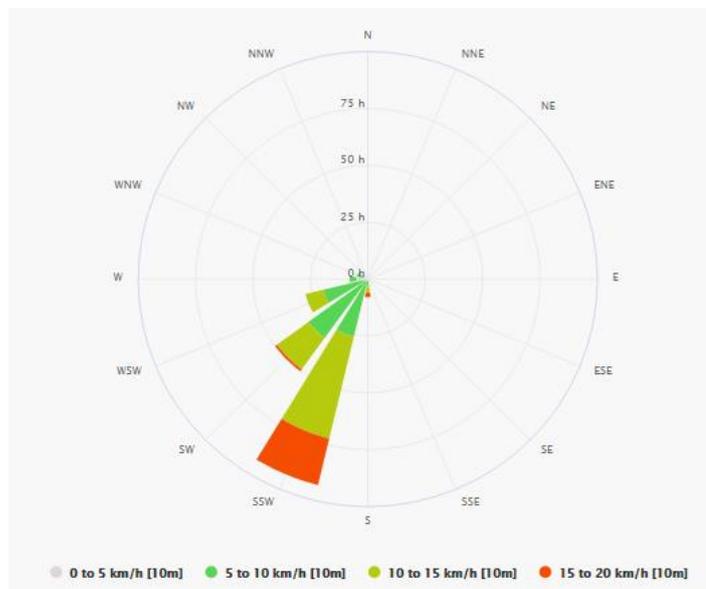


Figura 1.20. Rosa de los vientos de la ciudad de Guayaquil

Fuente: (meteoblue, 2017)

1.3.3.4. Nubosidad

Es un indicativo atmosférico de la cantidad de nubes presentes en el cielo con valores mínimos y máximos; evaluándose según la porción de cielo cubierto y tipos de nubes presentes.

1.3.3.5. Las precipitaciones

La condensación o congelación viene como fruto del enfriamiento de las masas de aire, formándose gotitas de agua o hielo que pronto se acumulan y debido a su peso tienden a precipitarse. Al igual que las nubes, la precipitación se la puede clasificar de diferentes formas, como tipo de enfriamiento del aire, pudiendo ser ciclónico, orográfico o por convección. También se puede abordar por el estado en que se da la precipitación líquido o sólido. De ser líquida acorde a su intensidad será llovizna, lluvia o chubasco siendo este último más intenso, pero de poca duración respecto a las dos anteriores. Y al ser sólida está la nieve y granizo, la cual depende de la rapidez del proceso de cristalización siendo lenta o rápida respectivamente. La intensidad de ese fenómeno está relacionada a la cercanía al mar, topografía del terreno y la forestación. (Andrades & Núñez, 2012)

1.4. Modelos de dispersión

El entendimiento y la posterior representación cuantitativa y cualitativa de concentraciones en la atmósfera se logran con la ayuda de modelos matemáticos de transporte y difusión de contaminantes. De esta manera se puede realizar un estudio de la dispersión de contaminantes gaseosos o material particulado emitidos por una o varias fuentes hacia la atmósfera. Existen diferentes tipos de modelos como empíricos o científicos, estocásticos o deterministas, estáticos o dinámicos.

1.4.1. Clases de modelos

1.4.1.1. Modelos empíricos y científicos

Los científicos se fundamentan en leyes físicas universales, mientras que un empírico en relaciones estadísticas que son significativas, pero bajo una serie de limitaciones, que a pesar de predecir muy bien no logra explicar tal fenómeno, logrando una

comparación de caja negra y caja blanca para modelos empíricos y físicos respectivamente, por la limitación a explicar que ocurre dentro de las cajas.

De estos modelos nace una combinación llamada conceptual o caja gris, en la que se soluciona con base en modelos empíricos pero que requieren de integraciones y otras cosas de la ciencia para tener una idea de que ocurre en el sistema. Los resultados que se obtengan de estos modelos dependerán de la calidad y cantidad de datos ingresados así también de que modelo se esté usando. (Universidad de Mursia, 2017)

1.4.1.2. Modelos estocásticos y deterministas

Los estocásticos se basan en la aleatoriedad de procesos modificando algunas variables, por lo que no se obtendrían el mismo conjunto de datos en la salida que los de la entrada, a diferencia que el determinista arrojará el conjunto de parámetros igual al que lo ingresaron. Los procesos muy complejos se los suele modelizar como estocásticos y los aleatorios en sí.

1.4.1.3. Modelos estáticos y dinámicos

La referencia es el tiempo, donde los estáticos tratan al proceso como que, si no cambiase respecto al tiempo como por ejemplo un caudal, mientras que los dinámicos modelan las series temporales en los que cambian las variables estudiadas dentro de un periodo de tiempo. Las variables tanto de entrada como salida representan a flujos de materia y energía que se ven involucrados en el proceso a modelar y pues estos se verán modificados no así con los parámetros quienes se mantienen fijos durante ese periodo de tiempo.

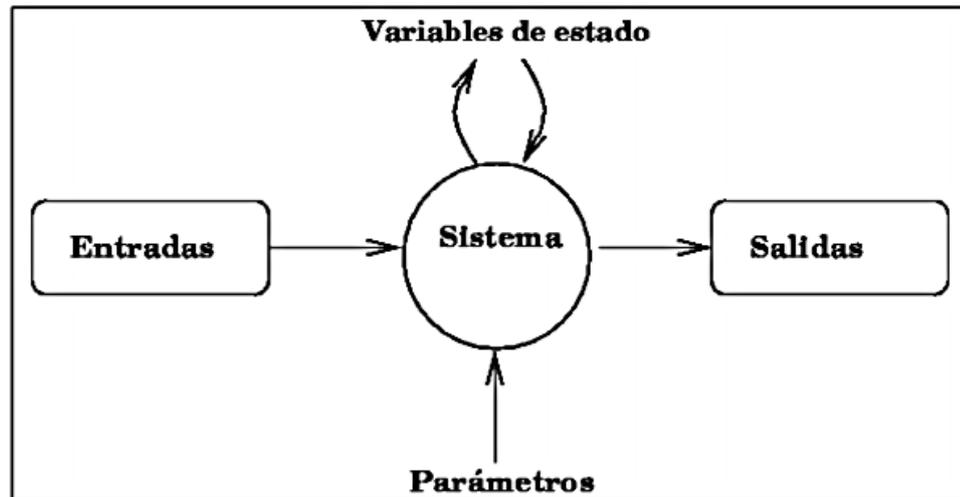


Figura 1.21. Modelo de proceso

Fuente: (Universidad de Murcia, 2017)

1.4.2. Modelo Gaussiano

Los modelos de dispersión requieren el ingreso de variables y parámetros espaciales y temporales de las emisiones, información meteorológica como viento, coeficiente de difusión, altura de la capa dónde ocurre la mezcla, nubosidad, precipitación, características topográficas, concentraciones previas en los receptores, caudales de emisión, entre otros. (Molina, 2013)

El modelo de pluma de Gauss se basa en la premisa de que un componente al dejar el foco de emisión entra en la atmosfera y se aleja, a medida que se va dispersando se aproxima a una distribución descrita matemáticamente, conocida en estadística y probabilidades como campana de Gauss.

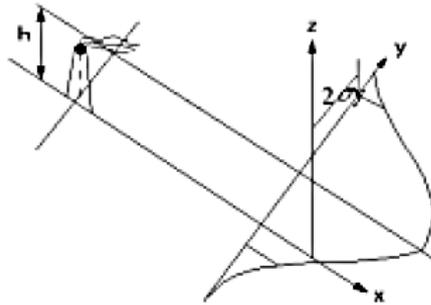


Figura 1.22. Modelo Gaussiano esquematizado

Fuente: (Sánchez, Siabato, & Cely, 2002)

El modelo permite estimar la distribución de un contaminante emitido a la atmósfera proveniente desde una fuente fija como chimenea, cráteres de volcanes, edificaciones en fuego, escapes de gases radiactivos. Además, que este modelo puede ser modificado para estudios de focos lineales representados por una carretera donde transitan automóviles con motores de combustión interna entre otros. Así se logra obtener la concentración en cualquier punto.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2 * \pi * u * \sigma y * \sigma z} e^{\frac{-1}{2(\frac{y}{\sigma y})^2}} \left\{ e^{\frac{-1}{2(\frac{z-h}{\sigma z})^2}} + e^{\frac{-1}{2(\frac{z+h}{\sigma z})^2}} \right\}$$

Figura 1.23. Ecuación del modelo Gaussiano

Fuente: (Sánchez, Siabato, & Cely, 2002)

De la ecuación:

C(x,y,z): Concentración del contaminante [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] en cualquier punto a **x** metros en dirección del viento partiendo desde el foco, **y** metros en sentido lateral y **z** metros sobre el nivel del suelo.

Q: Caudal másico [g/s].

u: Velocidad del viento [m/s].

h: Altura del foco partiendo desde el suelo.

σy , σz : Desviaciones estándares de la pluma en sentido lateral y vertical respectivamente.

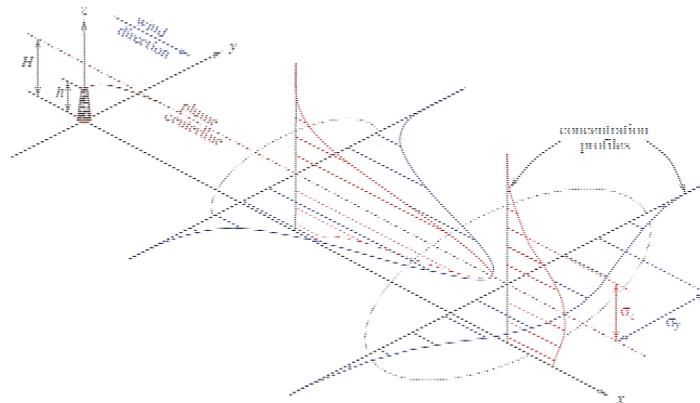


Figura 1.24. Esquema espacial del modelo Gaussiano

Fuente: (Stockie, 2011)

Para usar este modelo se deben considerar las siguientes suposiciones:

- El caudal de emisión se mantiene constante.
- El foco emisor no se encuentra impedido por barreras superior ni inferior.
- El contaminante por estudiar no reacciona en la atmósfera.
- La densidad del contaminante es la misma que la del aire.
- La distribución de la concentración se realiza en forma gaussiana. (Peralta, 2007)

Los parámetros que se consideran para aplicar el modelo de dispersión de Gauss son:

- Tasa de emisión
- Velocidad y dirección del viento
- Dimensiones de la chimenea
- Velocidad de salida de los gases
- Estabilidad atmosférica
- Condiciones atmosféricas
- Temperatura de salida de los gases

1.4.2.1. Coeficientes o parámetros de dispersión

Los parámetros σ_y , σ_z son una medida de la dispersión del penacho en las direcciones laterales y verticales. Estos parámetros son funciones de la distancia desde la fuente emisora y la estabilidad atmosférica. Para establecer los valores de los coeficientes sigmas se pueden desarrollar diferentes métodos aproximados de representación teórica o semi-empírica. Dedución teórica (Draxler):

$$\sigma_y = \sigma_\theta \cdot x \cdot \left[1 + 0.9 \left(\frac{t}{T_y} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1} \rightarrow \begin{array}{l} T_y = 300 \text{ s} \text{ foco en suelo} \\ T_y = 1000 \text{ s} \text{ foco elevado} \end{array} \rightarrow x < 10 \text{ km}$$

$$\sigma_z = \sigma_\phi \cdot x \cdot \left[1 + 0.9 \left(\frac{t}{T_z} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1} \rightarrow \begin{array}{l} T_z = 500 \text{ s} \text{ (inestabilidad)} \\ T_z = 10^4 \text{ s} \text{ (estabilidad)} \end{array} \rightarrow x < 10 \text{ km}$$

Figura 1.25. Dedución teórica de las desviaciones estándar Gaussianas

Fuente: (Martinez & Diaz, 2004)

Los coeficientes σ_θ , σ_ϕ representan las desviaciones estándar de la fluctuación de las componentes horizontales y verticales del viento, estos valores se deducen por medidas.

Dedución semi-empírica ($x < 10 \text{ Km}$)

En esta deducción se consideran varios tipos de estabilidad atmosférica, cuyos valores se establecen a través de observaciones.

Tabla 1.11. Categoría de estabilidad de Pasquill

Viento en superficie	Insolación			Periodo nocturno	
	Fuerte	Moderada	Débil	Nub>4/8	Nub<4/8
<2m/s	A	A - B	B
2 - 3 m/s	A - B	B	C	E	F
3 - 5 m/s	B	B - C	C	D	E
5 - 6 m/s	C	C - D	D	D	D
> 6 m/s	C	D	D	D	D

Fuente: (Martinez & Diaz, 2004)

Tabla 1.12. Categoría de estabilidad de Pasquill según el viento horizontal

Categorías de estabilidad	Desviación estándar del viento horizontal
A	25,0°
B	20,0°
C	15,0°
D	10,0°
E	5,0°
F	2,5°

Fuente: (Martinez & Diaz, 2004)

Los coeficientes también se pueden calcular mediante las ecuaciones de Briggs.

Tabla 1.13. Ecuaciones de Briggs para los factores de dispersión en una zona urbana

Cat. Estabilidad	σ_y (m)	σ_z (m)
A - B	$0,32x(1+0,0004x)^{-0,5}$	$0,24x(1+0,001x)^{0,5}$
C	$0,22x(1+0,0004x)^{-0,5}$	0,20x
D	$0,16x(1+0,0004x)^{-0,5}$	$0,14x(1+0,0003x)^{-0,5}$
E - F	$0,11x(1+0,0004x)^{-0,5}$	$0,08x(1+0,00015x)^{-0,5}$

Fuente: (Martinez & Diaz, 2004)

Tabla 1.14. Ecuaciones de Briggs para los factores de dispersión en una zona rural

Cat. Estabilidad	σ_y (m)	σ_z (m)
A	$0,22x(1+0,0001x)^{-0,5}$	0,20x
B	$0,16x(1+0,0001x)^{-0,5}$	0,12x
C	$0,11x(1+0,0001x)^{-0,5}$	$0,08x(1+0,0002x)^{-0,5}$
D	$0,08x(1+0,0001x)^{-0,5}$	$0,06x(1+0,0015x)^{-0,5}$
E	$0,06x(1+0,0001x)^{-0,5}$	$0,03x(1+0,0003x)^{-1}$
F	$0,04x(1+0,0001x)^{-0,5}$	$0,016x(1+0,0003x)^{-1}$

Fuente: (Martinez & Díaz, 2004)

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

2. MÉTODOLÓGÍA

2.1. Método empleado

La dispersión del dióxido de azufre emitido por las termoeléctricas de Guayaquil, como resultado de la combustión del diésel, será modelado en la zona urbana de la ciudad de Guayaquil, identificando las zonas de mayor concentración a nivel del suelo de este contaminante, y conocer las posibles afecciones que causan a la población de dichas zonas, en especial sectores más críticos como hospitales, centros de educación, guarderías, entre otros.

La dispersión del contaminante es modelada con el método de la pluma de Gauss, para fuentes fijas puntuales de combustión, puesto que los gases al dejar la fuente se dispersan en forma aproximada a la campana de Gauss. (Sánchez, Siabato, & Cely, 2002)

2.2. Datos requeridos para la simulación

El modelaje de un contaminante gaseoso en la atmósfera requiere la recopilación de información meteorológica, en cierto período de tiempo, así como información respecto a la fuente tales como tasa de emisión del contaminante, altura de la fuente respecto al nivel del suelo, información topográfica del terreno, además de barreras cercanas a la fuente que influyan en la dispersión, entre otros. La información recopilada debe ser representativa a un año típico para ejecutar el modelo, la misma que debe contener intervalos por hora dando una cantidad de 8760 datos.

Dentro de los datos meteorológicos las principales variables son magnitud y dirección del viento, nubosidad, estabilidad de la atmósfera, insolación y temperatura.

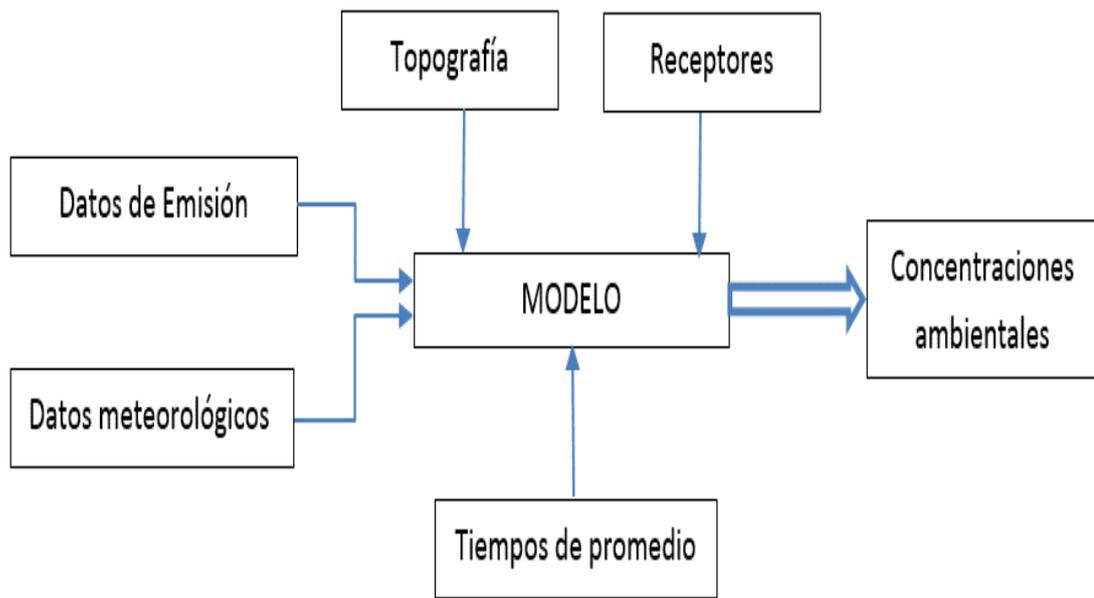


Figura 2.1. Modelo de dispersión esquematizado

Fuente: (Peralta, 2007).

2.3. Procesamiento de los datos

2.3.1. Modelo de combustión

Para el desarrollo de este trabajo se establecerá un modelo de combustión para determinar la cantidad de emisiones que genera cada una de las termoeléctricas basándose en el consumo anual de combustible sea este Diésel #2 o Diésel #4.

Para este modelo de combustión se considerará lo siguiente:

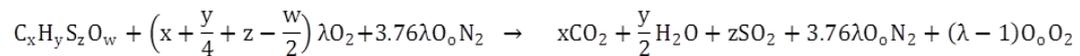
- Todo el azufre se combustiona y se transforma en SO_2
- Las reacciones secundarias que se podrían dar se las considerara despreciables
- La ecuación general de combustión representa la reacción de combustión que se genera en los calderos de cada central termoeléctrica
- Se considera como gas inerte y concentración constante en el periodo de interés

Una vez establecidas las consideraciones del modelo que se aplicará, se requiere conocer las variables necesarias para la aplicación del modelo.

Las variables necesarias para desarrollar el modelo de combustión son:

- La gravedad específica del combustible
- Composición porcentual del combustible
- Consumo anual de cada central termoeléctrica de la ciudad de Guayaquil
- Aire en exceso de cada unidad térmica de las centrales termoeléctricas

Ecuación general de combustión:



Mediante una hoja de cálculo se ingresan los valores del consumo de combustible en galones por hora (GPH), el exceso de aire, la composición porcentual del combustible y la gravedad específica; la hoja de cálculo nos va a generar los valores de emisión en gramos por segundo (g/s); estos valores son los que se ingresaran en el simulador generando una imagen de la dispersión del contaminante SO₂ sobre la zona urbana de la ciudad de Guayaquil.

Tabla 2.1. Datos de consumos anuales de las centrales termoeléctricas

Planta	Tecnología	Consumo de Diésel # 2 (gal/año)	Consumo de Diésel # 4 (gal/año)
Electroguayas CELEP EP	Turbo Gas	1629591,84	-
	Turbo Vapor	-	27696808,51
	Turbo Vapor	-	32575382,37
	Turbo Gas	13472597,86	-
	Turbo Gas	4938628,16	-
	Turbo Vapor	-	7737887,21
	Turbo Gas	1820537,43	-
	Turbo Gas	927272,73	-
	Turbo Gas	1733971,29	-
	Turbo Gas	1860940,70	-
Electroguayas Pascuales II	Turbo Gas	23086690,02	-
Electroguayas Trinitaria	Turbo Vapor	-	48396776,19
Electroquil S.A.	Turbo Gas	4936154,42	-
Electroquil S.A.	Turbo Gas	5132167,83	-
Electroquil S.A.	Turbo Gas	8387165,02	-
Electroquil S.A.	Turbo Gas	8121554,77	-
Termoguayas Generation S.A.	Turbo Gas	23649065,8	-

Fuente: (Patiño, 2017)

Tabla 2.2. Datos de emisiones generadas por la hoja de cálculo para cada termoeléctrica

Planta	Tecnología	Tasa de emisión SO ₂ (gr/s)
Electroguayas CELEP EP	Turbo Gas	0,26
	Turbo Vapor	53,15
	Turbo Vapor	62,51
	Turbo Gas	9,58
	Turbo Gas	3,51
	Turbo Vapor	14,85
	Turbo Gas	0,29
	Turbo Gas	0,15
	Turbo Gas	0,27
	Turbo Gas	0,30
Electroguayas Pascuales II	Turbo Gas	3,66
Electroguayas Trinitaria	Turbo Vapor	92,87
Electroquil S.A.	Turbo Gas	0,78
Electroquil S.A.	Turbo Gas	0,81
Electroquil S.A.	Turbo Gas	1,33
Electroquil S.A.	Turbo Gas	1,29
Termoguayas Generation S.A.	Turbo Gas	3,75

Fuente: (Patiño, 2017)

2.4. Datos meteorológicos

Para lograr el modelaje de la dispersión del dióxido de azufre en la atmósfera de la zona urbana de Guayaquil, se requiere los datos meteorológicos tomados por alguna estación local. Estos datos deben ser tomados en intervalos de cada hora, los 365 días del año cumpliendo con un total de 8760 datos meteorológicos para cada variable como temperatura (K), rapidez (m/s), dirección del viento (grados), estabilidad atmosférica (que va entre 1 y 6), alturas de mezclado para la zona rural y urbana (m). La obtención de los datos meteorológicos es una tarea compleja puesto que no se consigue la información de todas las variables para el modelo, sin embargo, se cuenta con datos meteorológicos del año 2007 cuyos parámetros están completos y serán

validados con los datos meteorológicos del año 2013 cuyos parámetros están incompletos perteneciente al Aeropuerto de Guayaquil.

2.4.1. Validación de la data 2007 con respecto a la data de 2013

2.4.1.1. Validación de velocidades

Los datos meteorológicos de una misma zona varían en pequeños porcentajes respecto al tiempo, por lo que al tener velocidad y dirección del viento del año 2013 se calculara el promedio diario, el promedio mensual para posteriormente crear intervalos de confianza y analizar si los datos meteorológicos del año 2007 se ajustan en estos intervalos. Si los datos están entre los intervalos de las velocidades del año 2013, los datos meteorológicos del año 2007 serán considerados validados ya que correspondería a un año típico del clima de la ciudad.

Tabla 2.3. Desviación de la data meteorológica del 2013

Mes	Desviación Estándar	Media
1	0,36	1,70
2	0,44	1,79
3	0,44	1,83
4	0,56	2,30
5	0,59	2,67
6	0,47	3,22
7	0,53	3,42
8	0,52	3,72
9	0,43	3,75
10	0,51	3,70
11	0,51	3,62
12	0,60	3,19

Tabla 2.4. Desviación de la data meteorológica del 2007

Mes	Desviación Estándar	Media
1	0,45	2,03
2	0,43	2,00
3	0,36	1,92
4	0,41	2,12
5	0,53	2,09
6	0,82	2,98
7	0,48	3,43
8	0,70	3,51
9	0,55	3,67
10	0,60	3,83
11	0,52	3,63
12	0,44	3,22

Para una mejor apreciación de los resultados, se ha graficado las medias de los dos años, con el intervalo de desviación del año 2013.

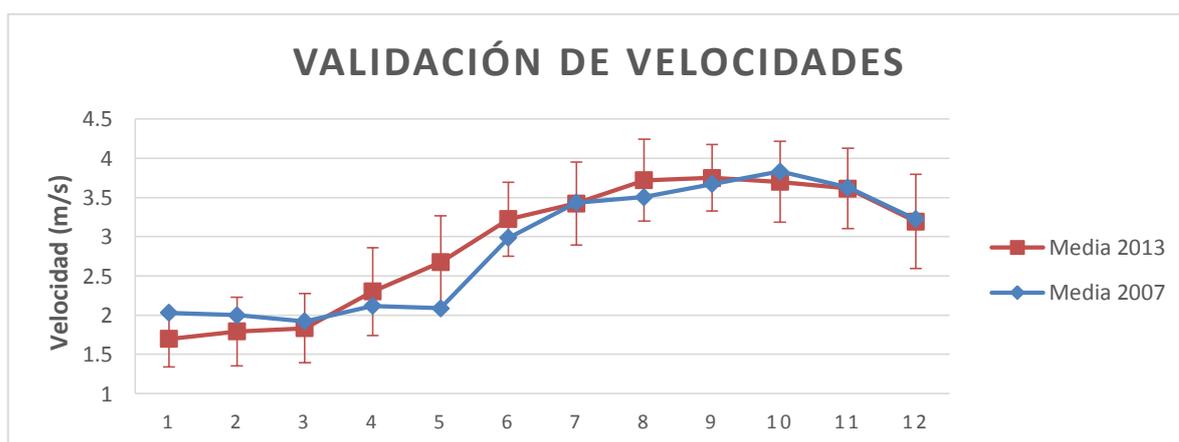


Figura 2.2. Validación de velocidades de la data 2013 con respecto a la del 2007

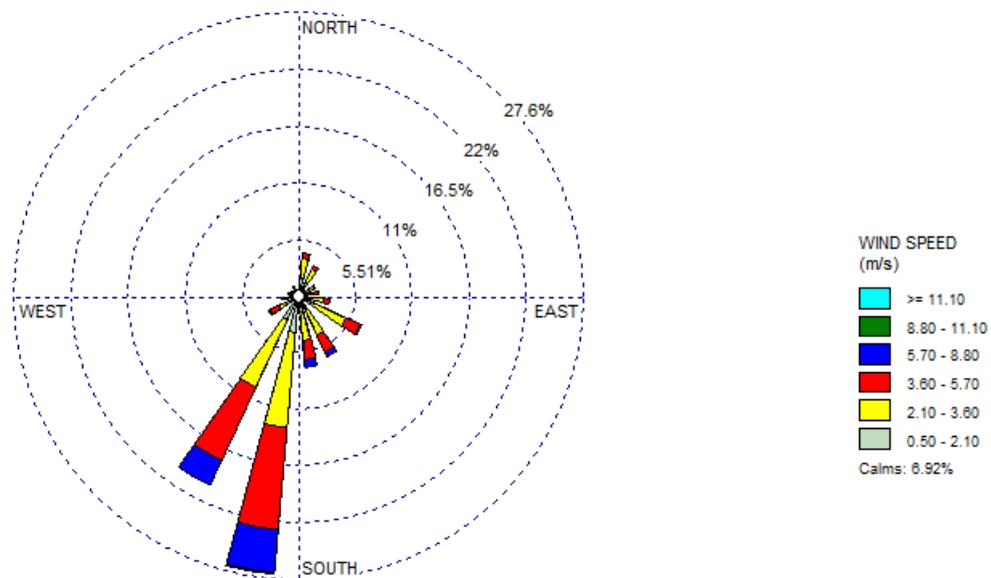
Los valores mensuales de velocidad del 2007 se encuentran dentro del intervalo de variación o desviación de la velocidad media mensual de los datos del 2013, sólo en el mes de Junio la velocidad presenta un valor en el límite con el intervalo. Por ende, podemos afirmar que los datos del 2007 que fueron adquiridos por

parte de la FIMCP a la compañía Trinity Consultants representan el comportamiento típico del viento en la ciudad de Guayaquil.

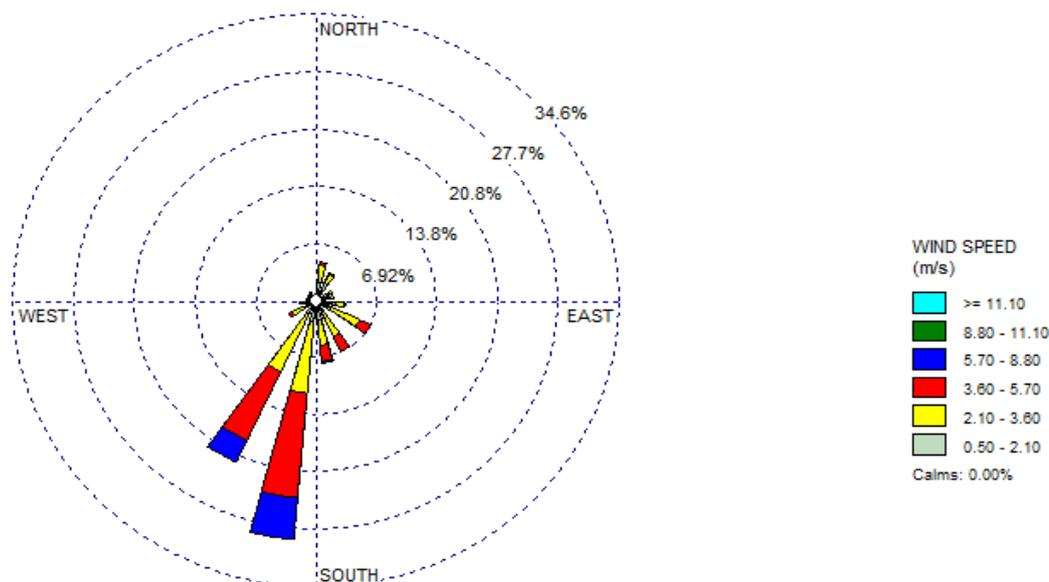
2.4.1.2. Validación de direcciones

Para validar los datos en función de las direcciones del viento, se gráfica las rosas de los vientos para cada año y posteriormente se las trasponen para identificar si existe variación significativa en la dirección.

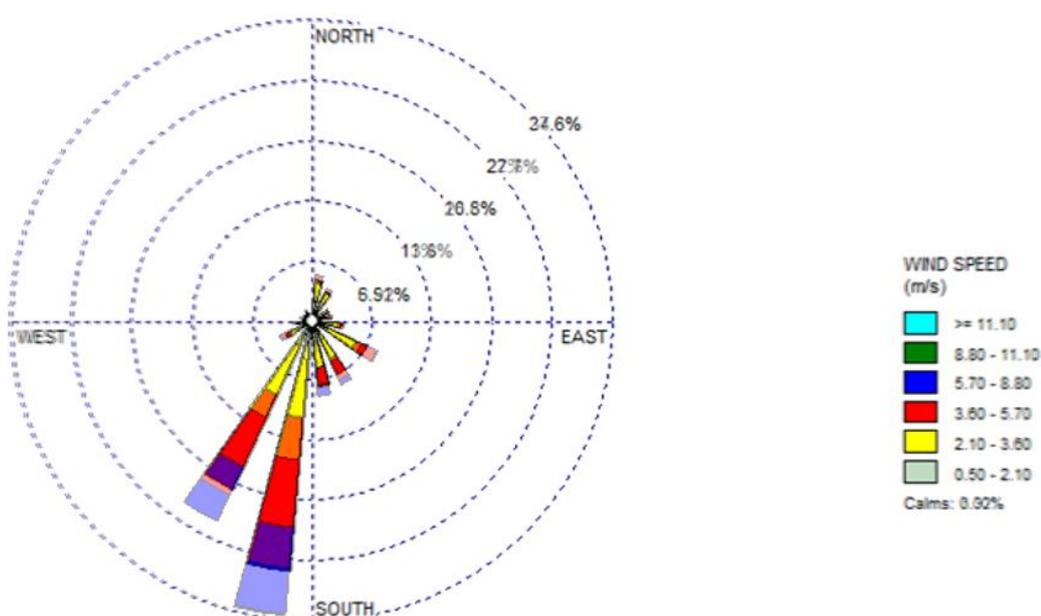
Las rosas de los vientos se las gráfica utilizando el programa WRPLOT de acceso libre diseñado por la compañía Lakes Environmental.



Gráfica 2.1. Rosa de los vientos de la ciudad de Guayaquil del año 2007



Gráfica 2.2. Rosa de los vientos de la ciudad de Guayaquil del año 2013



Gráfica 2.3. Trasposición de las rosas de los vientos de la ciudad de Guayaquil del año 2007 sobre el 2013

Se puede observar que las rosas de los vientos tanto para datos del 2007 y 2013 mantienen las mismas tendencias en la dirección del viento. Por lo tanto, se concluye que los datos meteorológicos del año 2007 son representativos para la zona de Guayaquil.

En resumen, los datos meteorológicos de los años analizados no varían considerablemente en magnitud y dirección, por lo tanto, se empleará como archivo meteorológico de entrada al modelo los datos del año 2007, la cual fue adquirida por la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción a la empresa TRINITY.

Tabla 2.5. Extracto de los datos meteorológicos

Año	Mes	Día	Hora	Velocidad (m/s)	Temperatura (K)	Estabilidad Atmosférica	Dirección
7	1	1	1	4,12	298,10	3,00	236,25
7	1	1	2	4,64	298,10	3,00	213,75
7	1	1	3	3,61	298,10	2,00	213,75
7	1	1	4	3,61	297,60	2,00	213,75
7	1	1	5	3,61	297,60	3,00	213,75
7	1	1	6	3,09	297,00	3,00	236,25
7	1	1	7	2,06	297,00	4,00	236,25
7	1	1	8	0,00	299,30	3,00	281,25
7	1	1	9	0,00	300,40	4,00	0,00
7	1	1	10	0,00	302,00	5,00	326,25
7	1	1	11	1,55	302,00	6,00	281,25
7	1	1	12	2,06	304,30	5,00	11,25
7	1	1	13	2,58	305,40	5,00	56,25
7	1	1	14	2,58	305,90	5,00	78,75
7	1	1	15	3,09	305,90	5,00	78,75
7	1	1	16	1,03	305,90	6,00	11,25
7	1	1	17	2,06	306,50	5,00	123,75
7	1	1	18	3,09	307,00	5,00	168,75
7	1	1	19	4,12	305,40	4,00	213,75
7	1	1	20	5,15	304,30	4,00	191,25
7	1	1	21	5,67	302,00	4,00	191,25
7	1	1	22	6,18	300,90	4,00	213,75
7	1	1	23	4,64	300,90	4,00	213,75
7	1	1	24	4,64	300,40	4,00	213,75

Fuente: (Peralta, 2007)

2.5. Datos de las fuentes

La información que se obtiene en la fuente demandada para la modelación principalmente es: tasa de emisión del dióxido de azufre, temperatura de salida de los gases, diámetro interno de la chimenea, altura de la chimenea y velocidad de salida de los gases.

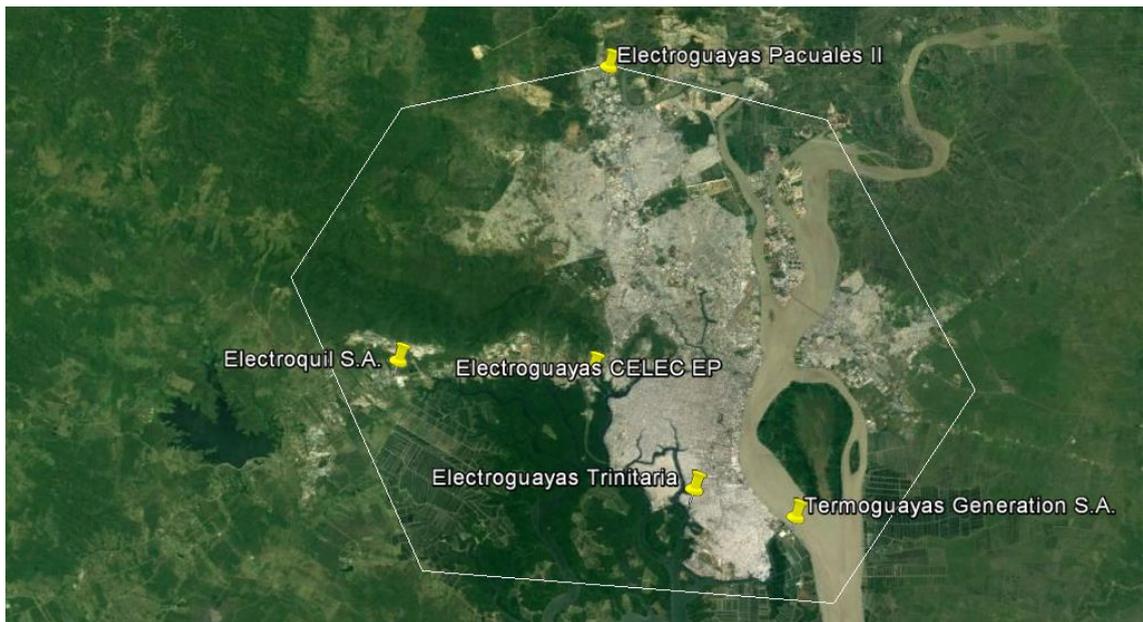
Tabla 2.6. Datos técnicos de las fuentes

Planta	Tecnología	Altura de chimenea (m)	Temperatura de gases (°C)	Diámetro de chimenea (m)	Velocidad de gases (m/s)
Electroguayas CELEP EP	Turbo Gas	15,00	463,95	2,57	19,94
	Turbo Vapor	30,00	172,15	2,50	27,70
	Turbo Vapor	30,00	175,15	2,50	28,40
	Turbo Gas	18,00	462,62	2,38	45,67
	Turbo Gas	15,00	546,00	3,57	23,05
	Turbo Vapor	30,00	174,40	2,50	13,50
	Turbo Gas	15,00	463,95	3,47	19,94
	Turbo Gas	15,00	463,95	3,47	19,94
	Turbo Gas	15,00	463,95	3,47	19,94
	Turbo Gas	15,00	488,15	3,47	20,36
Electroguayas Pascuales II	Turbo Gas	10,00	430,15	4,65	39,53
Electroguayas Trinitaria	Turbo Vapor	58,00	145,75	4,00	11,72
Electroquil S.A.	Turbo Gas	17,00	420,00	3,00	32,80
Electroquil S.A.	Turbo Gas	17,00	463,13	3,00	32,80
Electroquil S.A.	Turbo Gas	17,00	446,70	3,00	35,82
Electroquil S.A.	Turbo Gas	17,00	457,30	3,00	38,26
Termoguayas Generation S.A.	Turbo Gas	15,00	551,65	4,86	23,01

Fuente: (Patiño, 2017)

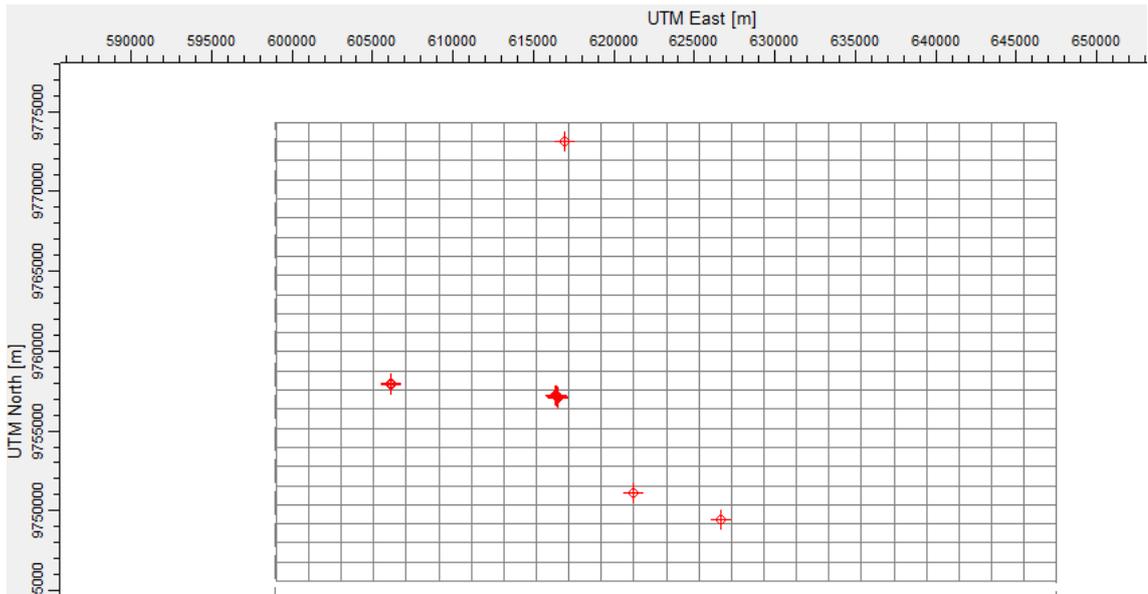
2.6. Datos del receptor

Como receptores para el estudio se ha considerado la zona urbana de Guayaquil, para la misma se generará una malla con 625 receptores, 25 puntos y las direcciones geográficas de varios puntos que estén dentro de la zona de estudio. También se considerará la información del terreno por si existen relieves considerables que podría afectar el flujo aerodinámico del contaminante, por lo tanto, se realizará un levantamiento topográfico del terreno.

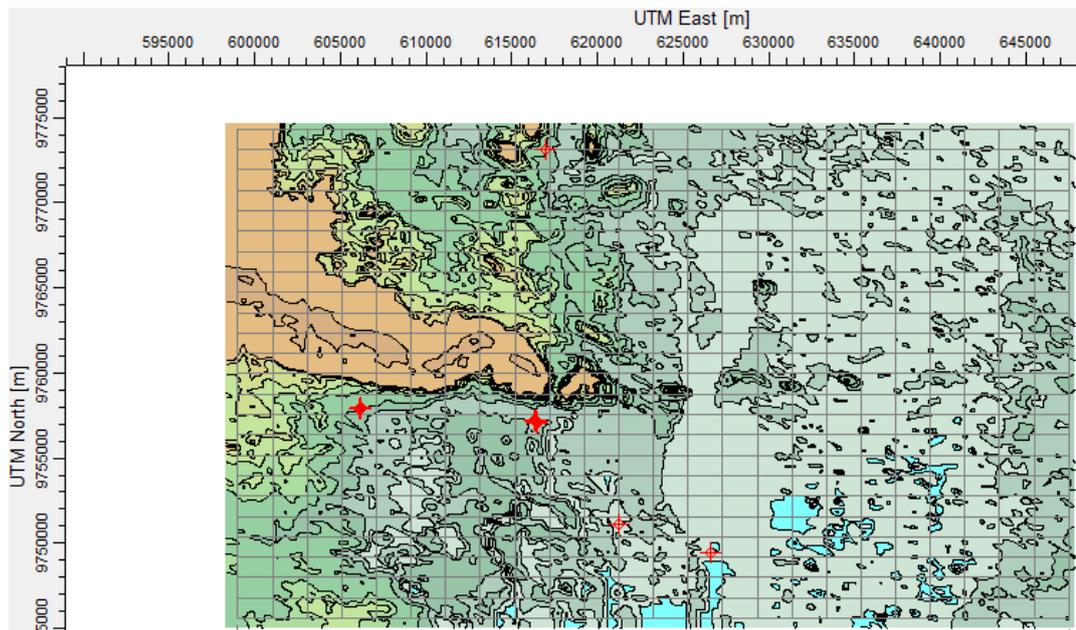


Gráfica 2.4. Zona urbana de estudio

Establecidos el número de receptores para la zona de estudio, se seleccionó el tamaño de la grilla apropiado, existen estudios que utilizan celdas de mayor longitud debido a que no existe información de mallado con menor tamaño en los terrenos de estudio; sin embargo, para nuestro estudio se estableció apropiado utilizar un tamaño de celda STRM3 (global - 90 m) ya que esta nos permite obtener una mejor resolución espacial del transporte del contaminante.



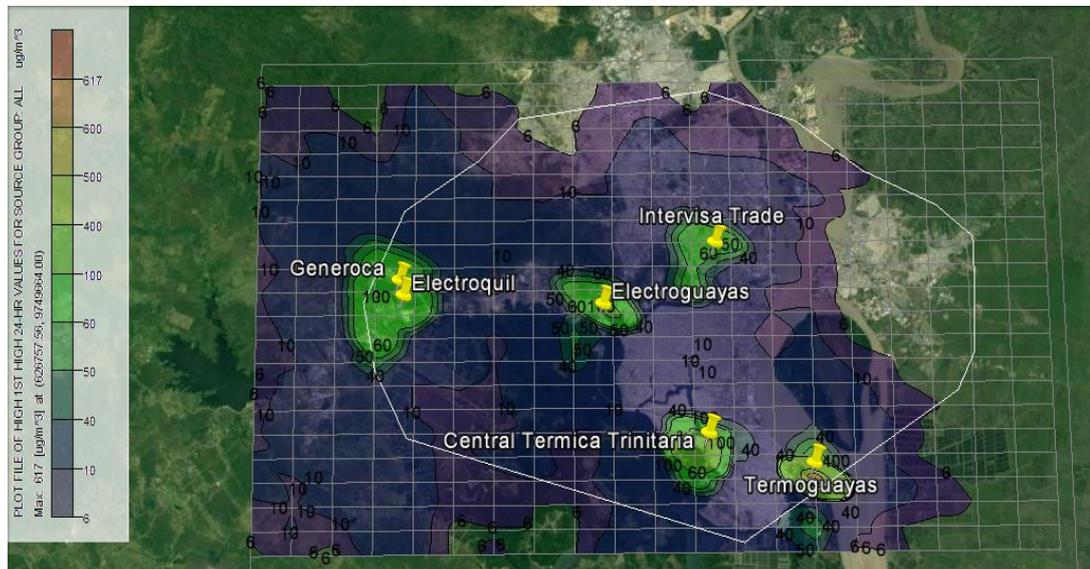
Gráfica 2.5. Grilla y la localización de las centrales termoeléctricas



Gráfica 2.6. Terreno para la zona de estudio STRM3 (Global- 90m)

2.7. Datos de salida

Mediante un programa de simulación de dispersión atmosférica se realiza el cálculo y graficación por medio de curvas de isoyetas de la concentración, obteniendo las diferentes concentraciones a través de la zona urbana de Guayaquil.



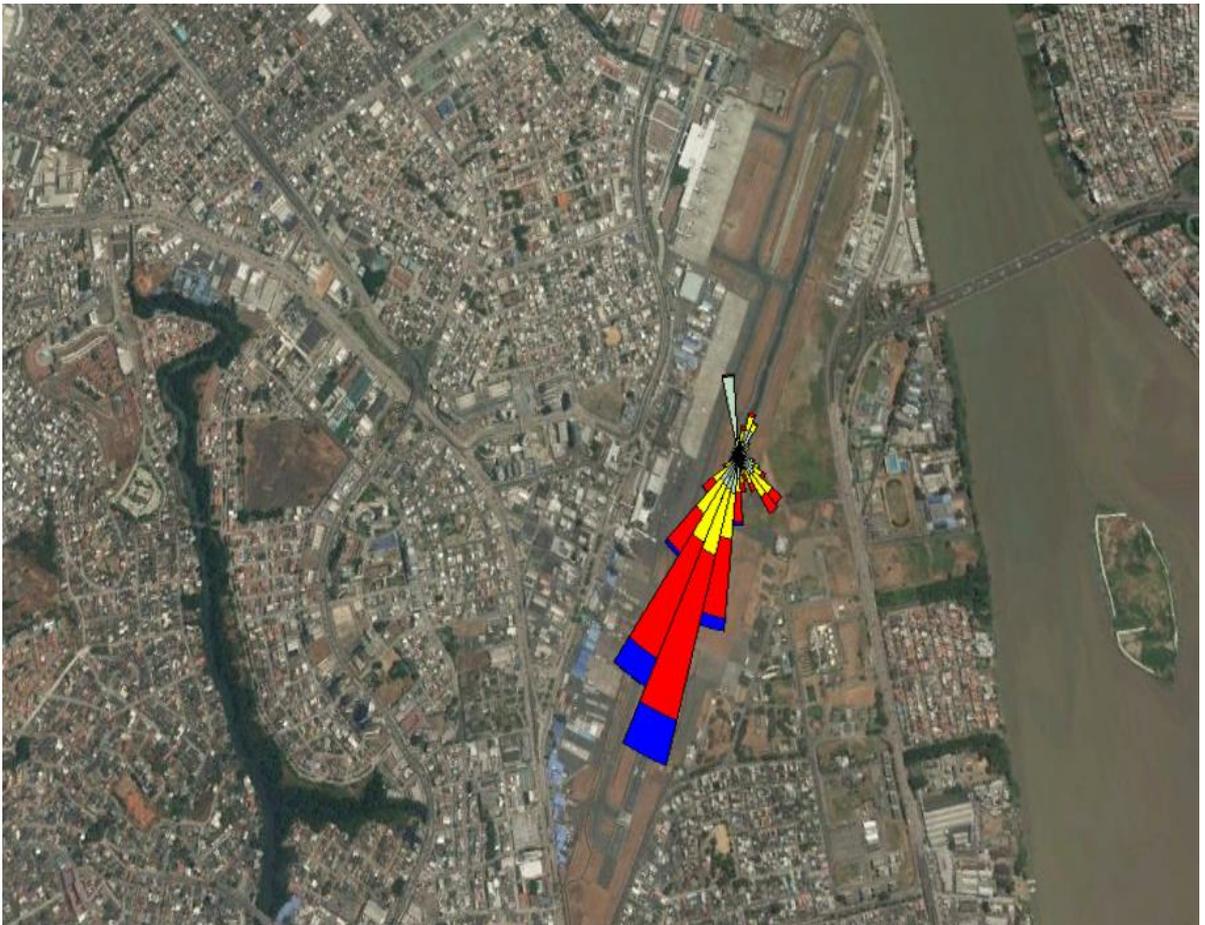
Gráfica 2.7. Presentación de los datos de salida

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3. RESULTADOS

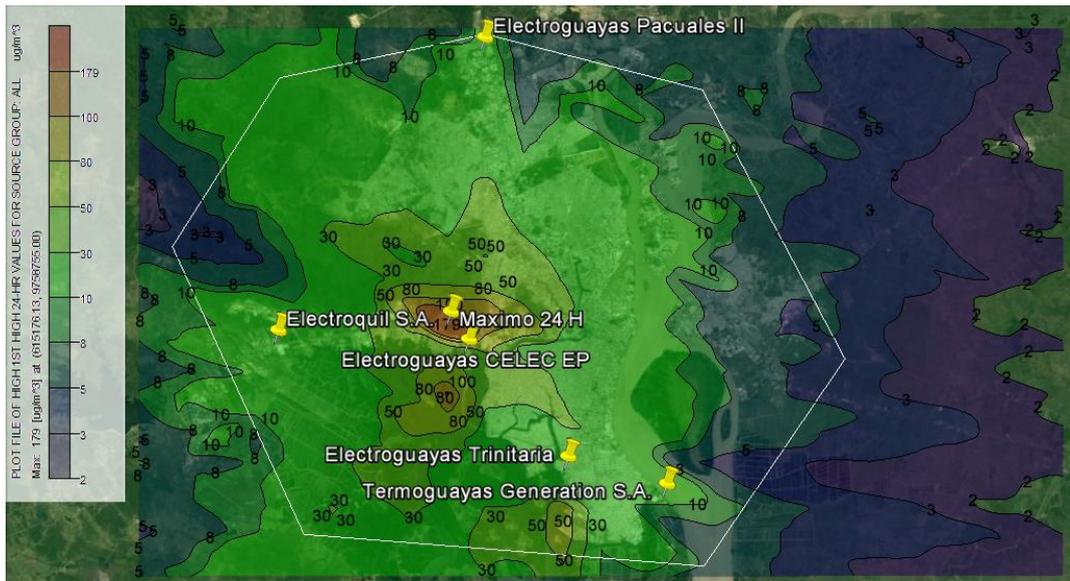
En la presente sección se muestra los resultados del modelaje de la dispersión del contaminante en la atmósfera, para cada fuente de emisión localizada en el terreno de estudio. Las siguientes gráficas son obtenidas a partir de un programa de modelamiento de dispersión atmosférica.



Gráfica 3.1. Rosa de los vientos del Aeropuerto de Guayaquil

Tabla 3.1. Velocidad del viento y horas de incidencia

		Velocidad del Viento (m/s)						Total
		0,50 - 2,10	2,10 - 3,60	3,60 - 5,70	5,70 - 8,80	8,80 - 11,10	>= 11,10	
Dirección del Viento (°)	355 - 15	466	26	11	1	0	0	504
	15 - 35	216	134	34	0	0	0	384
	35 - 55	216	61	11	0	0	0	288
	55 - 75	101	19	2	0	0	0	122
	75 - 95	68	6	2	0	0	0	76
	95 - 115	102	24	3	0	0	0	129
	115 - 135	199	75	27	0	0	0	301
	135 - 155	216	256	161	0	0	0	633
	155 - 175	108	117	75	0	0	0	300
	175 - 195	189	105	188	19	0	1	502
	195 - 215	345	546	1167	270	0	0	2328
	215 - 235	302	507	843	164	1	1	1818
	235 - 255	142	130	85	5	0	0	362
	255 - 275	60	24	8	0	0	0	92
	275 - 295	51	13	12	0	0	0	76
	295 - 315	55	19	6	0	0	0	80
	315 - 335	45	15	4	0	0	0	64
	335 - 355	59	9	2	0	0	0	70
	Subtotal	2940	2086	2641	459	1	2	8129
Calmado							631	
Total							8760	



Gráfica 3.2. Simulación sobre el terreno de estudio en un periodo de 24 horas



Gráfica 3.3. Simulación sobre el terreno de estudio en un periodo anual

Tabla 3.2. Resultados numéricos de la simulación

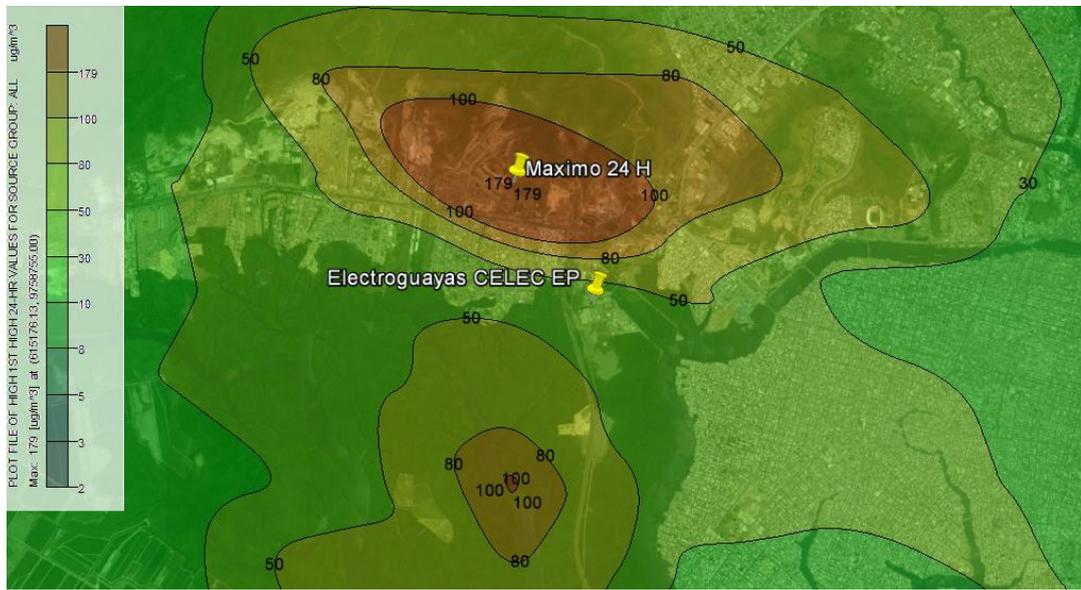
Periodo promedio	Máxima concentración ($\mu\text{g}/\text{m}$)	X (m)	Y (m)
24 horas	179,23	615176,13	9758755
Anual	36,48	617196,31	9758755

CAPÍTULO 4

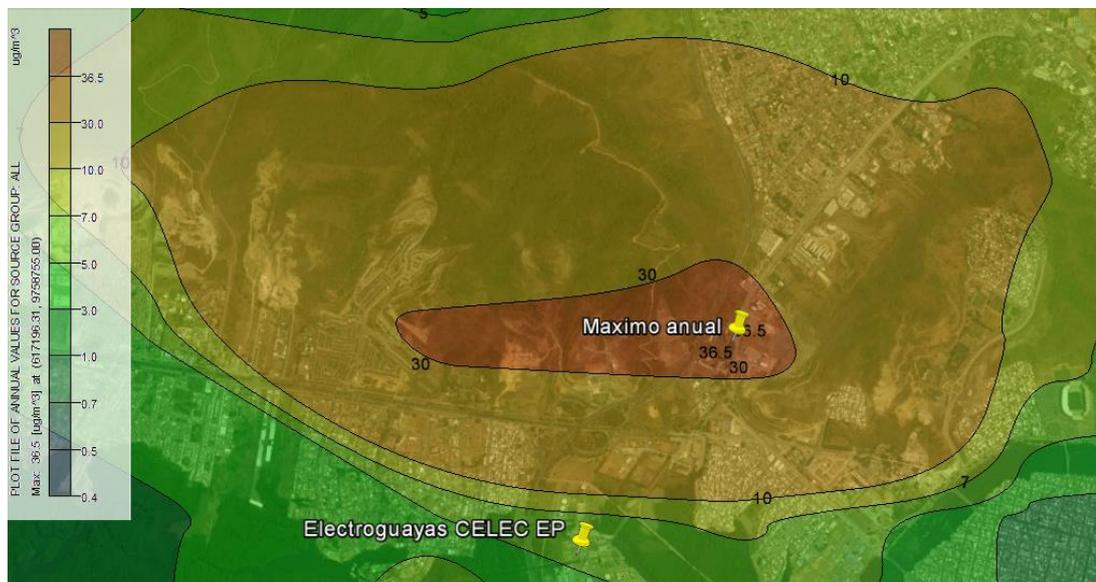
ANÁLISIS DE RESULTADOS

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se describirá el análisis de resultados donde se presentará la localización de los puntos de máxima concentración del dióxido de azufre para el periodo de 24 horas y anual.



Gráfica 4.1. Localización del punto máximo en un periodo de 24 horas



Gráfica 4.2. Localización del punto máximo en un periodo anual

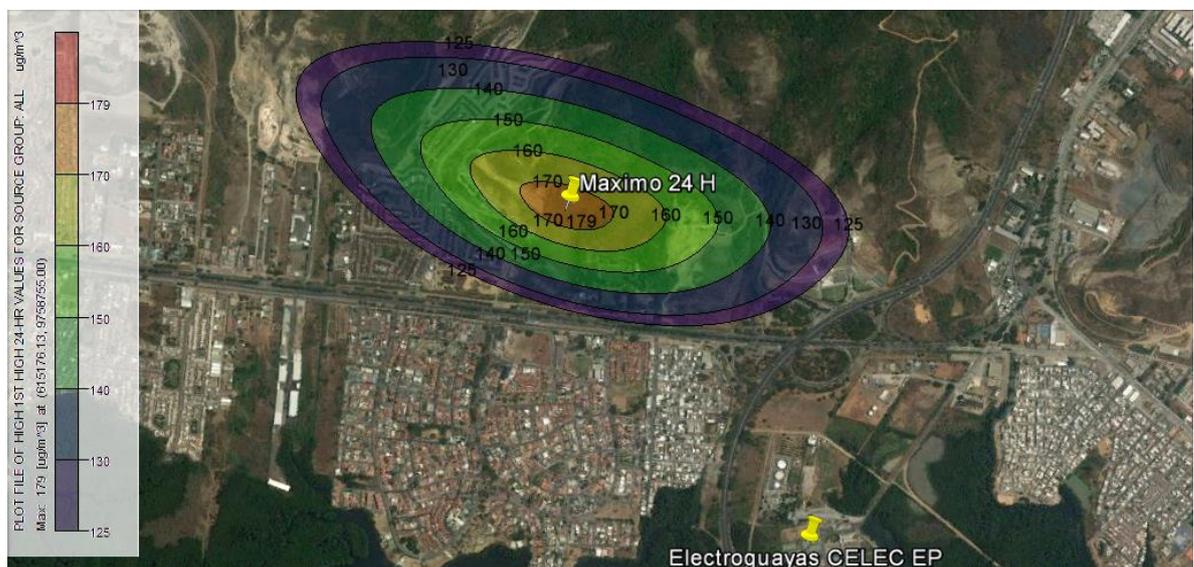
Los puntos máximos obtenidos en un periodo de 24 horas y anual del dióxido de azufre, se lo compara frente a los valores establecidos en el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, Título IV, Libro VI, Anexo 4 – Norma de Calidad de Aire Ambiente, que busca regular y controlar las emisiones de este y otros gases contaminantes.

Tabla 4.1. Concentraciones máximas de los periodos anuales y 24 horas

Sustancia contaminante	Límite máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Período regulado	Valor del estudio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Observaciones
Dióxido de azufre (SO ₂)	60	Anual	36.48	Si cumple
	125	24 horas	179.23	No cumple

El área de concentración máxima del periodo de 24 horas que se aprecia en la gráfica se encuentra en plena zona urbana de Guayaquil, e incumple el límite máximo permisible por el TULSMA, superándolo en un 30%. Mientras que, para el periodo anual a pesar de también estar en la zona urbana, si cumple el valor máximo al estar en un 39,2% bajo el máximo valor permisible del TULSMA.

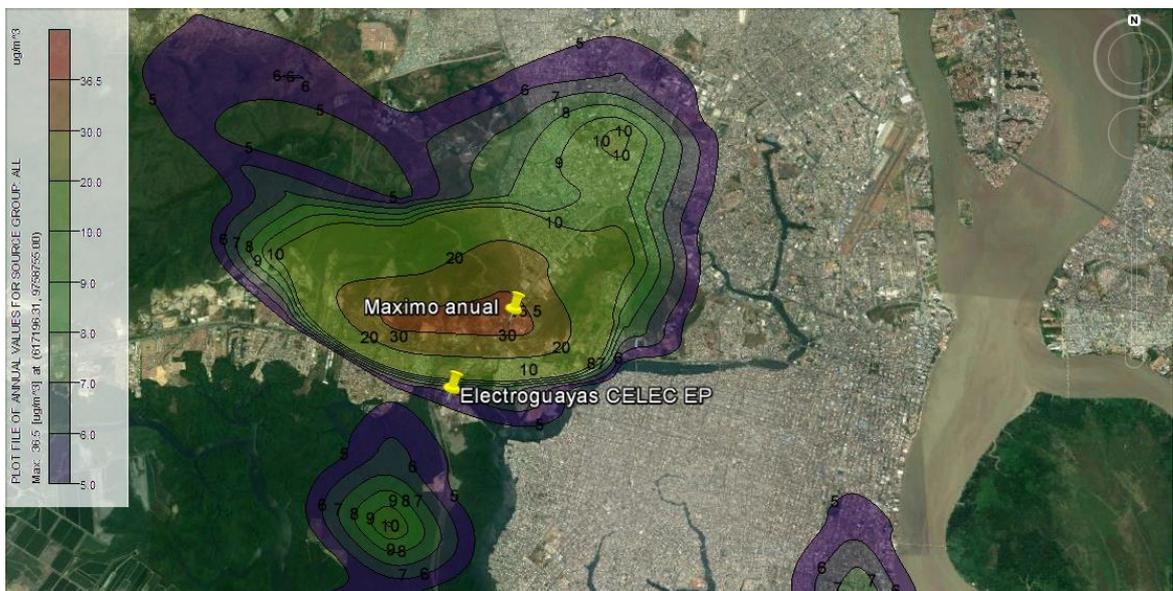
Las concentraciones del contaminante que superan los límites permisibles del periodo de 24 horas alcanzan una extensión de 187 Ha, éstas van desde 125 hasta el máximo 179,23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Gráfica 4.3. Localización de concentraciones superiores a las permisibles

Dentro de esta área se encuentra la urbanización Bosque de la Costa ubicada frente a urbanización Puerto Azul, el Campo de futbol Americano Independiente del Valle y la escuela fiscal Ciudad de Esmeraldas.

Las concentraciones del periodo anual, considerando las mayores o iguales desde 20 hasta 36,48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de dióxido de azufre, cubren una extensión de 648 Ha. Abarcando la urbanización Puerto Azul, Universidad del Pacifico, Cooperativa el Crisol, Hospital IESS Ceibos, Centro comercial Río Centro Ceibos, Jardines del Salado, Urbanización Los Parques a más de las zonas cubiertas por el periodo de 24 horas.



Gráfica 4.4. Localización de concentraciones periodo anual

Tabla 4.2. Porcentajes de aportación de SO_2 por las termoeléctricas

Termoeléctricas	% de aportación
Electroguayas CELEP EP	58,10
Electroguayas Pascuales II	1,47
Electroguayas Trinitaria	37,24
Electroquil S.A.	1,69
Termoguayas Generation S.A.	1,50

La mayor concentración tanto para los periodos de 24 horas y anual, se obtienen en áreas cercanas a la termoeléctrica Electroguayas CELEP EP y Electroguayas Trinitaria, puesto que juntas son las responsables del 95,34% de emisiones del dióxido de azufre.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos a partir del modelo de dispersión, y en función de los objetivos planteados, se concluye y recomienda:

- Para la ciudad de Guayaquil el viento tiene una componente predominante desde el suroeste, asimismo, la estabilidad atmosférica predominante es neutral y ligeramente estable.
- Durante la mayoría de horas de incidencia se presentan velocidades entre 0,5 y 5,7 (m/s), de las cuales un 30% se dirige hacia el noroeste, lo que explica la aparición de los primeros máximos del periodo anual y de 24 horas en esa dirección.
- Las concentraciones del dióxido de azufre para el periodo de 24 horas siendo de 179,23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, no cumple con el límite máximo permisible bajo el marco legal TULSMA de 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Mientras que para el periodo anual al ser 36,48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, cumple con el valor permitido que es 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- El área de exposición estimada para el primer máximo de 24 horas es 187 Ha y de 648 Ha para el periodo anual.
- En las zonas urbanas del noroeste de la ciudad de Guayaquil se observan los valores de máxima concentración de dióxido de azufre. Asimismo, se ha identificado que existen lugares que pueden ser críticos como zonas residenciales, escuelas, hospitales, complejos deportivos ubicados en las cercanías de la ruta Vía a la Costa y Ceibos, donde la presencia de este contaminante en la atmósfera podría incurrir en modificaciones a la calidad del aire.

5.2. Recomendaciones

- Es recomendable monitorear continuamente las fuentes de emisión, para obtener datos en tiempos reales, logrando así resultados de modelamiento con mayor precisión.
- Se recomienda realizar mediciones en la zona donde las concentraciones del dióxido de azufre sobrepasan los límites permisibles, para conocer la variabilidad del modelo respecto a mediciones in situ.

REFERENCIAS

- Andrades, M., & Núñez, C. (2012). *Fundamentos de climatología*. Logroño: Publicaciones Universidad La Rioja.
- Casal, J., Montiel, H., & colaboradores. (1999). Analisis del riesgo en instalaciones industriales . En J. Casal, H. Montiel, & colaboradores, *Analisis del riesgo en instalaciones industriales* (págs. 210-213). Barcelona: UPC.
- Espert, V., & López, A. (2004). *Dispersión de contaminantes en la atmósfera* . México, D.F.: Alfaomega grupo editor.
- Fariña, J. (2007). La ciudad y el medio natural . En J. Fariña, *La ciudad y el medio natural* (pág. 124). Madrid: Ediciones Akal S.A.
- Glassman, I., & Yetter, R. (2008). Combustion. En I. Glassman, & R. Yetter, *Combustion* (págs. 1-15). London: Elsevier Inc.
- Hall, N. (5 de Mayo de 2015). *NASA Combustión*. Obtenido de <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/combst1.html>
- Hernández, J. (2001). Óxidos de azufre. *Modelado de la formación y emisión de contaminantes en sistemas de combustión*. La Mancha, España: Servicio de publicaciones de la Universidad de Castilla.
- Martinez, E., & Diaz, Y. (2004). Contaminacion atmosferica . En E. Martinez, & Y. Diaz, *Contaminacion atmosferica* (págs. 126-128). Castilla: Universidad de Castilla-La Mancha.
- meteoblue. (16 de 07 de 2017). *meteoblue*. Obtenido de meteoblue: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/archive/windrose/guayaquil_ecuador_3657509
- Molina, P. (2013). *Simulación numérica de un problema de contaminación atmosférica*. Madrid.
- NTE INEN 1489:2012. (2012). *Productos derivados del petroleo. Diésel. Requisitos*. Quito: NTE INEN .
- Patiño, M. (2017). *Consumo de combustibles en termoeléctricas de Guayaquil*. Guayaquil.
- Peralta, J. (2007). *Aplicación del Modelo de Dispersión ISCST3 Para la Simulación de Emisión en Plantas Térmicas Medianas en la Ciudad de Guayaquil*. Guayaquil: Tesis ESPOL.
- Peralta, J. (2007). *Data Meteorologica*. Guayaquil.

- Pongutá, J. (2003). Guía para el manejo de energías alternativas. En J. Ponguta, *Guía para el manejo de energías alternativas* (pág. 26). Bogotá: CAB.
- Puigcerver, M., & Carrascal, D. (2008). El medio atmosférico: meteorología y contaminación. En M. Puigcerver, & D. Carrascal, *El medio atmosférico: meteorología y contaminación* (págs. 50-53). Barcelona: i Edicions.
- Rodríguez, M., Benito, Á., & Portela, A. (2004). *Meteorología y climatología*. Fecyt.
- Russell, R. (1 de Abril de 2009). *Open Windows to the Universe*. Obtenido de https://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/troposphere_temperature.html&lang=sp&edu=high
- Sánchez, A., Siabato, W., & Cely, J. (2002). Modelo de calidad del aire para Bogotá. *Dialnet*.
- Stockie, J. (2011). *The Mathematics of Atmospheric Dispersion Modeling*. Philadelphia: SIAM.
- Tipanluisa, L. (2008). Análisis comparativo de laboratorio a las mismas condiciones del biodiesel (piñon y palma africana) mezclado en porcentajes de 2% y 5% con diesel ecuatoriano comercial. *Tesis de grado*. Latacunga: Escuela politecnica del ejercito sede Latacunga.
- TULSMA. (2015). *Libro VI Anexo 3*. Obtenido de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu112182.pdf>
- TULSMA. (2015). *Libro VI Anexo 4*. Obtenido de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu112183.pdf>
- Universidad de Mursia. (20 de Junio de 2017). *OCW Universidad de Mursia*. Obtenido de <http://ocw.um.es/ciencias/modelizacion-de-sistemas-ambientales/material-de-clase-1/msa-cap-04.pdf>
- Villarubia, M. (2004). Energía Eólica. En M. Villarubia, *Energía Eólica* (págs. 34-35). Barcelona: Ceac.
- Wauquier, J. (1994). El refinado del petróleo. En J. Wauquier, *El refinado del petróleo* (págs. 211-212). Paris: Editions Technip.

GLOSARIOS DE TÉRMINOS Y SIMBOLOGÍA

Z	Altura
T	Temperatura de salida de los gases
Vs	Velocidad de salida de los gases
P	Presión
g	Aceleración debido a la gravedad
S	Parámetro de estabilidad
Ds	Diámetro de la chimenea
V	Velocidad media del viento
H	Altura efectiva
x	Coordenada en dirección del viento partiendo desde el foco
y	Coordenada transversal a la dirección horizontal del viento
z	Coordenada de altura a la dirección horizontal del viento
σ_y	Desviación estándar de la distribución de concentración lateral
σ_z	Desviación estándar de la distribución de concentración vertical
λ	Exceso de aire
O _e	Oxígeno efectivo
%C	Porcentaje en peso de carbono
%H	Porcentaje en peso de hidrogeno
%S	Porcentaje en peso de azufre
h	Altura del foco partiendo desde el suelo.
Q	Caudal másico
u	Velocidad del viento
C	Concentración del contaminante

ABREVIATURAS

Atm	Atmósfera
°C	Grados Celsius
K	Grados Kelvin
g	Gramo
Km	Kilómetros
m	Metros
m/s	Metros por segundo
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Microgramos por metro cubico
s	Segundos
knots	Nudos
Ha	Hectárea
Kg/m^3	Kilogramos por metro cubico
M	Peso molecular
g/mol	Gramos por mol
gpa	Galones por año
Kg/kmol	Kilogramos por kilomol
Kg/L	Kilogramos por litro
mm^2/s	Viscosidad cinemática
%p	Porcentaje en peso
pH	Potencial de hidrógeno
%v	Porcentaje en volumen
K/Km	Kelvin por kilometro
μm	Micrómetro
nm	Nanómetro
gph	Galones por hora

APENDICE A

Tabla A 1 Datos de control de calidad del Diésel 2

DIÉSEL 2						
PARÁMETROS	UNIDAD	MÉTODOS DE ENSAYO		U k=2	ESPECIFICACIONES	RESULTADOS
		ASTM / NTE	INTERNO			
GRAVEDAD API A 15,6 °C *	API	D-6822	PT.04	+/- 2,1	REPORTE	33,9
GAVEDAD ESPECIFICA A 15,6 °C/15,6 °C *	-	D-6822	-	-	REPORTE	0,8555
PUNTO DE INFLAMACION	°C	INEN 1493	PT.06	+/- 3,4	Min. 51	58,0
AGUA Y SEDIMENTO *	%v	INEN 1494	-	-	Max. 0,05	0,00
RESIDUO CARBON CONRADSON *	%p	INEN 1491	-	-	Max. 0,15	< 0,10
CONTENIDO DE CENIZAS *	%p	INEN 1492	-	-	Max. 0,01	0,00
DESTILACION * P.I.E.	°C	D-86	-	-	REPORTE	166
10%	°C	D-86	-	-	REPORTE	211
50%	°C	D-86	-	-	REPORTE	276
90%	°C	D-86	-	-	Max. 360	330
P.F.E.	°C	D-86	-	-	REPORTE	358
VISCOCIDAD CINEMATICA A 40 °C	cSt	INEN 810	PT.05	+/- 0,016	2,0 – 5,0	3,015
CONTENIDO DE AZUFRE *	%p	D-4294	-	-	Max. 0,7	0,156
CORROSION LAMINA DE COBRE *	-	INEN 927	-	-	Max. N° 3	1a
INDICE DE CETANO CALCULADO *	-	INEN 1495	-	-	Min. 45	47,3
CONTENIDO DE BIODIESEL *	%v	EN 14078	-	-	Min. 5 / Max. 10	0,0
COLOR ASTM *	-	D-1500	-	-	REPORTE	1,0

* No se encuentra incluidos en el Alcance de Acreditación

APENDICE B

Tabla B 1 Datos de control de calidad del Fuel Oil

DIÉSEL O FUEL OÍL 4B						
PARÁMETROS	UNIDAD	MÉTODOS DE ENSAYO		U Método	ESPECIFICACIONES	RESULTADOS
		ASTM / NTE	INTERNO			
GRAVEDAD API A 15,6 °C	API	D-6822 / INEN 2319	PT.04	-	REPORTE	15.5
DENSIDAD RELATIVA 15,6 °C/15,6 °C	-	D-6822 / INEN 2319	-	-	REPORTE	0.9626
DENSIDAD 15.6 °C	Kg/m ³	D-6822 / INEN 2319	-	-	REPORTE	961.7
PUNTO DE INFLAMACIÓN	°C	D-93 / INEN 1493	PT.06	-	Min. 60	104.0
CONTENIDO DE AGUA Y SEDIMENTO	%v	INEN 1494	-	-	Max. 1	< 0.05
VISCOSIDAD CINEMATICA A 50 °C	cSt	D-445 / INEN 810	PT.05	-	420 - 510	459.1
VISCOSIDAD REDWOOD A 37.8 °C	SRWD	INEN 1981 (1)	-	-	4040 - 5030	4470
VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL A 50 °C	SSF	INEN 1981 (1)	-	-	198.2 - 241.0	216.6
CONTENIDO DE CENIZAS	%p	INEN 1492 (2)	-	-	Max. 0.2	< 0.2
CONTENIDO DE AZUFRE *	%p	D-4294	-	-	Max. 2.3	1.670