



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

“Evaluación de riesgos a la salud por tóxicos atmosféricos generados por la operación de una termoeléctrica de ciclo combinado”

T E S I S

QUE PARA OBTENER TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

AGUSTÍN ARELLANO RIVERA

**ASESOR: DR. JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA
REYNOSO**



México D.F.

Marzo de 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ZARAGOZA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

OFICIO: FESZ/JCIQ/ 001/12

ASUNTO: Asignación de Jurado

Alumno (a):

ARELLANO RIVERA AGUSTÍN

PRESENTE

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

PRESIDENTE	I. Q. RAUL RAMÓN MORA HERNÁNDEZ
VOCAL	DR. JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO *
SECRETARIO	I. Q. MARIO BARROSO MORENO
SUPLENTE	I. Q. ALEJANDRO JUVENAL GUZMÁN GÓMEZ
SUPLENTE	I. Q. JAVIER TORRES LUNA

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
México D.F., a 11 de enero de 2011

JEFE DE CARRERA

DR. ROBERTO MENDOZA SERNA



A G R A D E C I M I E N T O S .

Antes que nada quiero agradecer a Dios, por regalarme el tiempo para la realización de este trabajo y agradecer también su compañía en todo momento de mi vida, hoy en esta ocasión tan especial te pido Señor también me acompañes.

Gracias Padre.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de formarme en sus aulas, ser universitario fue para mí un gran honor y un privilegio.

Muchas gracias.

A la termoeléctrica de ciclo combinado El Sauz, por proporcionarme la información necesaria para el desarrollo de este trabajo.

Gracias.

A mi asesor, el Dr. José Agustín García Reynoso, por su desinteresado apoyo, consejos y paciencia, que hicieron posible la realización de este trabajo.

Agradezco sus atenciones.

A los Ingenieros Químicos Raúl Ramón Mora Hernández, Mario Barroso Moreno, Juvenal Guzmán Gómez y Javier Torres Luna, por su tiempo, disposición y sus valiosas aportaciones para mejorar el presente trabajo.

Gracias por su apoyo.

Un agradecimiento a todos mis profesores, que con su trabajo diario y constante han hecho de mí una persona útil a la sociedad.

Los recuerdo con aprecio.

A la Familia Castro Ramos, gracias por el desinteresado apoyo que me brindaron durante mis estudios. Sin ustedes este momento jamás hubiera sido posible.

Mi gratitud infinita.

Así mismo a la familia Arellano Villanueva, especialmente a Baltazar y Sonia, gracias por el apoyo que me brindaron para realizar mis estudios.

Siempre les agradeceré.

También a la Familia Garnica Rivera, sobre todo a mi Guicha y a mi compadre Baldo, gracias por creer en mí, su apoyo moral alimentó mi fuerza de voluntad.

Son excepcionales.

A mis amigos, principalmente a las Maestras Hortensia Granados Avilés y Martha Estela Pastrana Dueñas, por impulsarme a cerrar una etapa más de mi vida, con la conclusión de este trabajo.

Las aprecio mucho.

DEDICATORIAS

Dedico esta tesis a mis padres Rafael Arellano Vera y Ma. Dolores Rivera Ramírez, por el esfuerzo que hicieron para sacarnos adelante, su ejemplo de vida es la mejor de las enseñanzas que he recibido, quiero que este logro lo sientan también como suyo.

Gracias por darme la vida.

También la dedico a mi esposa, María Isabel Camacho Hernández y le doy las gracias por impulsarme, pero sobre todo por apoyarme a realizar este trabajo. El sacrificio al final valdrá la pena.

Mary te amo.

Por último quiero dedicar éste trabajo a mis hijas Ximena Elizabeth y Adriana Lisseth, quiero que sepan que fueron el principal motor de convencimiento para concluir este trabajo.

Son la luz de mi vida.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Contaminación atmosférica	4
2.1.1. Componentes del aire.....	4
2.1.2. Concepto de contaminación del aire.....	4
2.1.3. Contaminantes del aire y su clasificación.....	4
2.1.4. Fuentes de contaminación del aire.....	7
2.2. Conceptos básicos de meteorología	7
2.2.1. Estructura vertical de la atmósfera.....	7
2.2.2. Radiación e insolación.....	8
2.2.3. Balance térmico de la atmósfera.....	9
2.2.4. Presión atmosférica.....	11
2.2.5. Movimiento horizontal de la atmósfera.....	11
2.2.6. Influencias topográficas en la circulación del aire.....	12
2.2.7. Flotabilidad del aire.....	14
2.2.8. Gradiente vertical de temperatura.....	14
2.2.9. Altura de mezcla.....	16
2.2.10. Estabilidad atmosférica.....	16
2.2.11. Inversión térmica.....	19
2.3. Métodos de estimación de los contaminantes	21
2.3.1. Método de los factores de emisión.....	21
2.3.2. Método de balance de masa.....	22
2.3.3. Método de cálculos de ingeniería.....	22
2.4. Transporte y dispersión de los contaminantes	22
2.4.1. Dispersión de los contaminantes en fuentes puntuales.....	22
2.4.2. Comportamiento de pluma.....	23

2.4.3.	Elevación de la pluma.....	25
2.4.4.	Determinación de la elevación de la pluma.....	26
2.5.	Modelos de dispersión de la calidad del aire.....	27
2.5.1.	Estimación de la concentración de los contaminantes...	27
2.5.2.	Tipos de modelos de la calidad del aire.....	27
2.5.3.	Modelo de distribución gaussiano.....	28
2.5.4.	Clasificación de la estabilidad atmosférica.....	30
2.5.5.	Modelos computarizados de dispersión atmosférica.....	31
2.6.	Toxicología de la contaminación del aire.....	32
2.6.1.	Mecanismos naturales de defensa del cuerpo.....	32
2.6.2.	Valoración de los efectos adversos a la salud.....	34
2.6.3.	Niveles críticos de las sustancias tóxicas.....	35
2.6.4.	Índices de riesgo cancerígeno.....	36
2.7.	Análisis de riesgos.....	37
2.7.1.	Riesgo.....	37
2.7.2.	Evaluación del riesgo.....	38
3.	METODOLOGÍA.....	42
3.1	Identificación del peligro.....	43
3.2.	Modelo de dispersión del aire.....	43
3.2.1.	Inventario de emisiones.....	43
3.2.2.	Caracterización de la fuente.....	45
3.2.3.	Caracterización del terreno.....	45
3.2.4.	Exposición de la población.....	46
3.2.5.	Nivel de detalle del estudio.....	46
3.3.	Evaluación de la exposición.....	50
3.3.1.	Estimación de la dosis	50
3.4	Evaluación de la dosis-respuesta para efectos cancerígenos.....	52
3.5.	Evaluación de la dosis-respuesta para efectos no cancerígenos...	53
3.5.1.	Índice de riesgo agudo.....	54
3.5.2.	Índice de riesgo crónico.....	57

3.6	Caracterización del riesgo.....	59
4.	RESULTADOS.....	60
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	65
	ANEXO 1.....	67

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1	Composición química del aire seco a nivel del mar en unidades de partes por millón.....	4
Cuadro 2.2	Categorías de estabilidad Pasquill-Gifford.....	30
Cuadro 2.3	Clases de estabilidad Pasquill-Gifford para condiciones diurnas y nocturnas, según la radiación solar incidente, para todos los rangos de velocidad del viento.....	30
Cuadro 3.1	Contaminantes peligrosos del aire para una termoeléctrica de ciclo combinado.....	43
Cuadro 3.2	Producción en MWh de energía eléctrica para el año 2005 en la central termoeléctrica de ciclo combinado El Sauz.....	44
Cuadro 3.3	Factores de emisión para una turbina que emplea gas natural como combustible.....	44
Cuadro 3.4	Tasa de emisión en g/s por unidad generadora y para cada contaminante peligroso del aire.....	45
Cuadro 3.5	Modelos de dispersión del aire recomendados por EPA.....	47
Cuadro 3.6	Características geométricas de las chimeneas y propiedades termodinámicas de los gases de salida.....	49
Cuadro 3.7	Concentraciones máximas a nivel de piso en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en cinco puntos distintos a partir de la fuente de emisión.....	50
Cuadro 3.8	Valores recomendados de velocidad de respiración diaria en L/peso del cuerpo kg-d.....	51
Cuadro 3.9	Dosis por inhalación en mg/kg/día de los cinco contaminantes peligrosos del aire que pueden causar efectos cancerígenos a la salud en las localidades dentro de la zona de impacto.....	52
Cuadro 3.10	Factores potenciales de cáncer en $(\text{mg}/\text{kg}/\text{día})^{-1}$ de los CPA que pueden causar efectos cancerígenos a la salud identificados para la termoeléctrica.....	53
Cuadro 3.11	Riesgo de cáncer en casos por millón de habitantes en localidades ubicadas dentro de la zona de impacto de la termoeléctrica.....	53
Cuadro 3.12	Sistemas del organismo que pueden sufrir daño agudo por la exposición de los contaminantes peligrosos del aire.....	54

Cuadro 3.13	Niveles de referencia agudos en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para los contaminantes peligrosos del aire de la termoeléctrica El Sauz.....	55
Cuadro 3.14	Coefficientes de riesgo agudos para los distintos sistemas del organismo en cada una de las localidades de la zona de impacto.....	56
Cuadro 3.15	Índices de riesgo agudos en las cinco localidades elegidas dentro de la zona de impacto.....	56
Cuadro 3.16	Sistemas del organismo que pueden sufrir daño crónico por la exposición de los contaminantes peligrosos del aire.....	57
Cuadro 3.17	Niveles de referencia crónico en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para los contaminantes peligrosos del aire de la termoeléctrica el Sauz.....	58
Cuadro 3.18	Coefficientes de riesgo crónicos para los sistemas del organismo en cada una de las localidades elegidas de la zona de impacto.....	59
Cuadro 3.19	Índices de riesgo agudos en las cinco localidades elegidas dentro de la zona de impacto.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Estructura vertical de las capas de la atmósfera.....	8
Figura 2.2	Radiación y balance térmico de la atmósfera por cada 100 unidades de radiación recibidas.....	10
Figura 2.3	Representación del gradiente vertical adiabático seco.....	14
Figura 2.4	Representación de los gradientes vertical adiabático seco y adiabático húmedo.....	15
Figura 2.5	Representación de los gradientes vertical ambiental y vertical adiabático seco.....	15
Figura 2.6	Representación de la altura de mezcla.....	16
Figura 2.7	Representación de las condiciones de una atmósfera estable.....	17
Figura 2.8	Representación de las condiciones de una atmósfera inestable.....	17
Figura 2.9	Representación de las condiciones de una atmósfera neutra.....	18
Figura 2.10	Representación de la estabilidad condicional de la atmósfera.....	18
Figura 2.11	Representación de una inversión en el gradiente vertical ambiental.....	19

Figura 2.12	Inversión térmica por radiación generada por el enfriamiento acelerado de la superficie terrestre.....	19
Figura 2.13	Inversión térmica por subsidencia generada por sistemas de alta presión...	20
Figura 2.14	Inversión térmica frontal generada por frentes fríos y cálidos.....	20
Figura 2.15	Convección por advección provocada por el terreno.....	21
Figura 2.16	Pluma de espiral generada en condiciones de inestabilidad.....	23
Figura 2.17	Pluma de abanico generada por condiciones estables.....	24
Figura 2.18	Pluma de cono generada en condiciones neutrales o ligeramente estables.	24
Figura 2.19	Pluma de flotación generada en condiciones inestables y sobre una inversión.....	24
Figura 2.20	Fenómeno de fumigación, se produce bajo una capa de inversión.....	25
Figura 2.21	Elevación de la pluma.....	25
Figura 2.22	Representación esquemática del modelo gaussiano de dispersión de pluma.	28
Figura 2.23	Coefficientes de dispersión horizontal y vertical de acuerdo a la estabilidad y a la distancias a sotavento de la chimenea.....	31
Figura 2.24	Proceso de transporte y transformación de las sustancias tóxicas en el cuerpo.....	33
Figura 2.25	Etapas de una evaluación de riesgos.....	39
Figura 3.1	Ubicación de la central termoeléctrica de ciclo combinado El Sauz, Pedro Escobedo, Querétaro.	42
Figura 4.1	Casos de cáncer por millón de habitantes en localidades ubicadas dentro la zona de impacto de la termoeléctrica.....	60
Figura 4.2	Índices de riesgo agudo en localidades ubicadas dentro del área de impacto de la termoeléctrica.....	61
Figura 4.3	Índices de riesgo crónico en localidades ubicadas dentro del área de impacto de la termoeléctrica.....	62
Figura A1.	Unidad de ciclo combinado en una termoeléctrica.....	67

RESUMEN

En el presente proyecto de tesis se efectuó una evaluación de riesgos a la salud humana, por la exposición de la población a los contaminantes peligrosos del aire, vertidos a la atmósfera por la termoeléctrica de ciclo combinado El Sauz, ubicada en Municipio de Pedro Escobedo, el Estado de Querétaro.

La metodología empleada para llevar a cabo la evaluación de riesgos es la utilizada por la Agencia de Protección Ambiental de California, (CEPA, por sus siglas en inglés), que cuantifica el riesgo a la salud, mediante el cálculo de tres métricas; el índice de riesgo agudo, el índice de riesgo crónico y el riesgo de cáncer.

Las concentraciones de los contaminantes de interés, se estimaron con la información de la producción del año 2005, el empleo del método de los factores de emisión y el modelo de pluma gaussiano SCREEN3, que es un modelo de dispersión de contaminantes de nivel sondeo.

Con el estudio de este caso, se determinó que la comunidad El Sauz es la que sufre mayor impacto por las emisiones de la termoeléctrica, encontrándose que el índice de riesgo agudo tiene un valor de 0.017, el índice de riesgo crónico de 0.26 y el riesgo de cáncer de 0.45. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), establece que para que no exista un riesgo a la salud, ninguna de las tres métricas anteriores debe tener un igual o superior a la unidad, por lo que se puede afirmar que la termoeléctrica en cuestión, no representa por si sola un riesgo significativo a la salud, sin embargo éstos valores no se deben tomar como definitivos, pues cada organismo reacciona de manera diferente.

1. INTRODUCCIÓN.

El presente trabajo de tesis, se orientó al estudio y caracterización de las emisiones a la atmósfera provenientes de la termoeléctrica de ciclo combinado El Sauz, ubicada el Municipio de Pedro Escobedo en el Estado de Querétaro. La termoeléctrica cuenta con siete unidades para la producción de energía eléctrica; las unidades 1, 2, 3, 5 y 6 en ciclo combinado, operan con los gases producto de la combustión del gas natural, la unidad 4 trabaja con el vapor de agua recuperado de las unidades 1, 2 y 3, por último la unidad 7 trabaja con el vapor de agua que se recupera de las unidades 5 y 6.

Actualmente se desconocen los tipos y cantidades de contaminantes peligrosos del aire (CPA) generados por la termoeléctrica y como consecuencia, también los riesgos a la salud que estas emisiones puedan ocasionar en los habitantes de esa región.

Por tanto el objetivo de este trabajo consistió en realizar una evaluación de los riesgos a la salud humana, por la exposición de la población a los contaminantes peligrosos del aire que provienen de la termoeléctrica. La metodología usada, es la recomendada por CEPA, quien establece que el impacto a la salud humana, se puede valorar mediante el cálculo de tres indicadores; el índice de riesgo agudo, el índice de riesgo crónico y el riesgo de cáncer expresado en casos por millón de habitantes.

En el capítulo dos, se presenta la definición de contaminación del aire y las distintas formas de clasificarla; esta sección también contiene los dos mecanismos naturales que favorecen la dispersión de los contaminantes, el movimiento horizontal y vertical de la atmósfera y se menciona también a las chimeneas como medio mecánico para ayudar en la dispersión de los mismos; se dedica también un espacio para explicar el mecanismo mediante el cual los contaminantes peligrosos del aire entran al cuerpo y la forma que éste emplea para desechar y/o neutralizar sus efectos; por último se presentan las etapas que se deben observar para desarrollar una evaluación de riesgos a la salud humana.

El capítulo tres puntualiza la metodología, para cada una de las etapas en una evaluación de riesgos a la salud, los puntos más importantes a tratar en este capítulo, es la identificación de los contaminantes peligrosos del aire que provienen de la termoeléctrica, la estimación de la tasa de emisión de dichos contaminantes, la elección del modelo de dispersión, mediante al cual se estima el valor de la concentración máxima de los contaminantes en un punto cualquiera a nivel de piso.

El capítulo cuatro contiene los indicadores de riesgo estimados para cinco localidades que se encuentran dentro de la zona de impacto delimitada para la termoeléctrica. Las comunidades contempladas en este estudio son, en orden de distancia creciente a la termoeléctrica: El Sauz y la Ciudad de Pedro Escobedo, ambas localidades en el municipio de Pedro Escobedo, La Estancia y La Ciudad de San Juan del Rio, en el municipio de San Juan del Rio y la Ciudad de Tequisquiapan en el municipio del mismo nombre, los tres municipios pertenecientes al Estado de Querétaro.

Por último el capítulo cinco presenta las conclusiones, así como algunas recomendaciones que permiten dimensionar el alcance de este trabajo.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1 Contaminación atmosférica.

2.1.1 Componentes del aire.

La atmósfera es la capa gaseosa que rodea la tierra y rota con ella a medida que gira alrededor del sol, a esta mezcla de gases se le denomina aire. Se desconoce la composición del aire no contaminado, sin embargo la composición química¹ aproximada del aire seco a nivel del mar es la que se presenta en el cuadro 2.1.

Cuadro 2.1. Composición química del aire seco a nivel del mar en unidades de partes por millón.

Sustancia	Concentración en ppm
Nitrógeno	780,900
Oxígeno	209,400
Argón	9,300
Dióxido de Carbono	315
Neón	18
Helio	5.2
Metano	2.3
Criptón	0.5
Hidrógeno	0.5
Xenón	0.08
Dióxido de Nitrógeno	0.02
Ozono	0.01-0.04

2.1.2 Concepto de contaminación del aire.

Se considera un contaminante del aire² a toda sustancia de origen natural o antropogénico (generada por la actividad del hombre), que introducida a la atmósfera produce un efecto perjudicial en la salud humana o al ambiente.

2.1.3 Contaminantes del aire y su clasificación.

Hay distintas formas de clasificar a los contaminantes del aire, a continuación se muestra la clasificación propuesta por EPA (1994).

Una primera clasificación de los contaminantes del aire, los cataloga como partículas o gases. Las partículas pueden estar en estado líquido o sólido y la conforman el polvo, humo, niebla y cenizas volantes. Los gases Incluye sustancias

¹ Air Pollution Training Institute. Basic Air Pollution Meteorology. USA. 2005, p.2.

² United States Environmental Protection Agency. Air Pollution Training Institute. USA. Noviembre de 2011. <http://www.epa.gov/apti/course422/index.html>.

como el monóxido de carbono, dióxido de azufre y compuestos orgánicos volátiles (COV).

Los contaminantes del aire también se pueden clasificar como primarios y secundarios. Los contaminantes primarios son los que se emiten a la atmósfera directamente de la fuente y mantiene la misma forma química, como por ejemplo, las cenizas de la quema de residuos sólidos. Los contaminantes secundarios son los que experimentan un cambio químico cuando llegan a la atmósfera, un ejemplo, es el ozono producido cuando los COV reaccionan con los óxidos de nitrógeno en presencia de la luz solar para formar el ozono.

Los contaminantes del aire también se pueden clasificar por la toxicidad que pueden generar en humanos, a este grupo de contaminantes se les denomina contaminantes tóxicos del aire y se les clasifica como contaminantes criterio y contaminantes peligrosos del aire (CPA).

Los contaminantes criterios son muy comunes y ahora se sabe que son perjudiciales para la salud de humanos, se les llamó criterio, porque cuando fueron estudiados por primera vez se publicaron en documentos de criterio de la calidad del aire. A nivel mundial los contaminantes criterios son el monóxido de carbono (CO), los óxidos de azufre (SO_x), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el ozono (O_3), el plomo (Pb) y el material particulado, que agrupa a las partículas totales en suspensión con 10 micrómetros o menos de diámetro (PM_{10}) y 2.5 micrómetros o menos de diámetro ($\text{PM}_{2.5}$). Actualmente cada contaminante criterio tiene su norma, que establece las concentraciones máximas permisibles de estos contaminantes en el aire durante un tiempo definido.

Los compuestos orgánicos volátiles originalmente pertenecieron a la clasificación de contaminantes criterio, hoy en día, muchos de ellos se encuentran dentro del grupo de los CPA, que además incluye al asbesto, arsénico, berilio, mercurio, radón y sus radionúclidos. Estos compuestos pueden ser cancerígenos y no cancerígenos capaces de causar efectos serios e irreversibles a la salud.

Los contaminantes tóxicos del aire se clasifican también según los efectos que causen a la salud y por la duración de la exposición requerida para provocar una respuesta tóxica³.

Según sus efectos a la salud se pueden agrupar en siete categorías, donde estas categorías no son mutuamente excluyentes:

- *Mutágenos*: Son sustancias que causan mutaciones o alteraciones en el material genético (especialmente al ácido desoxirribonucleico, ADN).
- *Cancerígenos*: Son sustancias que pueden provocar el crecimiento anormal o incontrolado de las células del cuerpo (cáncer).
- *Teratógenos*: Son sustancias que pueden causar anomalías en el desarrollo del feto, en dosis que no afecta a la madre.
- *Neurotóxicos*: Son sustancias que afectan al sistema nervioso.
- *Hepatotóxicos*: Son sustancias que incrementan o disminuyen la capacidad metabólica del hígado.
- *Tóxicos pulmonares*: Son sustancias que pueden causar daños a los pulmones.
- *Tóxicos que causan disfunciones reproductoras*. Son sustancias que pueden reducir la fecundidad y reducen la oportunidad de sobrevivencia del feto.

Según la duración de exposición requerida para provocar una respuesta tóxica, se pueden agrupar en dos categorías.

- *Agentes tóxicos de efecto agudo*: Son sustancias intensamente tóxicas que provocan una respuesta en un corto plazo.
- *Agentes tóxicos de efecto crónico*: Son sustancias que requieren una exposición a largo plazo o una forma repetida de exposición para tener un efecto.

³Air Pollution Training Institute. Introduction to Air Pollution Toxicology.USA. 1993. p. 2.24.

2.1.4 Fuentes de contaminación del aire.

Entre las diferentes fuentes de emisiones a la atmósfera⁴ se pueden distinguir dos grandes tipos: las fuentes fijas (puntuales, de áreas y naturales) y las fuentes móviles.

Las fuentes puntuales incluyen las plantas generadoras energía eléctrica y los establecimientos con actividad industrial como la industria: química, textil, alimentaria, maderera, metalúrgica y manufacturera entre otras.

Las fuentes de área comprenden las emisiones inherentes a las actividades y procesos tales como el consumo de solventes, limpieza de superficies y equipo, recubrimiento de superficies arquitectónicas e industriales, lavado en seco, artes gráficas, panaderías y distribución y almacenamiento de gas LP, tratamiento de aguas residuales, plantas de composteo, rellenos sanitarios, entre los más importantes.

Las fuentes naturales se refieren a las emisiones producidas por volcanes, océanos, plantas, emisiones por digestión anaerobia y aerobia de sistemas naturales,

Las fuentes móviles incluyen todas las unidades motrices que sirven como medio de transporte, tales como automóviles, autobuses, camiones, aviones y locomotoras, siendo la principal fuente de contaminación móvil, el automóvil.

2.2 Conceptos básicos de meteorología.

2.2.1 Estructura vertical de la atmósfera.

La atmósfera la constituyen cuatro capas⁵, la troposfera, la estratosfera, la mesosfera y la termosfera (figura 2.1).

La troposfera tiene un espesor que varía entre 9 Km en los polos y 18 Km en el ecuador, se estima que su altura media es de 12 Km, contiene la mayoría de los gases así como el vapor de agua que contiene la atmósfera, a los primeros 500 metros se le denomina capa sucia debido a que en este espacio se encuentran los

⁴ Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. Inventario de Contaminantes Tóxicos del Aire en la ZMVM. México. 2004.

⁵ APTI (2005), *Op. cit.*, p. 2.

polvos en suspensión provenientes de los desiertos, volcanes y de la contaminación. Esta capa tiene importantes flujos convectivos de aire, verticales y horizontales producidos por las diferencias de presión y temperatura, dando lugar a los fenómenos meteorológicos (precipitaciones, viento y nubes). La temperatura de la troposfera es máxima en su parte inferior, alrededor de 15°C en promedio, y desciende con la altura aproximadamente 6.5°C cada kilómetro, hasta llegar a los -70°C en el límite superior al que se le llama tropopausa.

La estratosfera se extiende desde la tropopausa hasta los 50 km de altura (límite de la estratosfera a la que se le llama estratopausa). Entre los 15 y 30 Km de altura se localiza la capa de ozono llamada ozonosfera. En esta capa, la temperatura se incrementa hasta llegar a los 0°C en la estratopausa, el incremento de la temperatura se debe a que el ozono absorbe parte de la radiación solar ultravioleta formando con esto una capa protectora. Dentro de esta capa no hay movimiento vertical del aire, sólo horizontal. Para fines de estudios de la contaminación del aire, solo las dos primeras capas de la atmósfera se consideran de importancia.

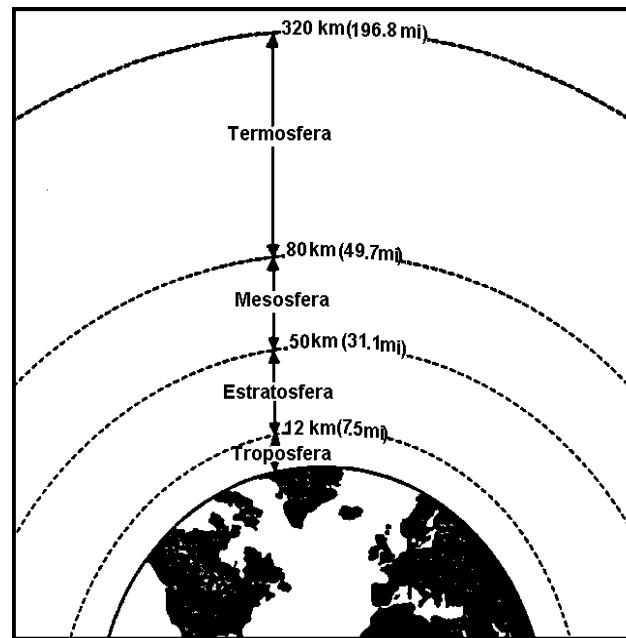


Figura 2.1. Estructura vertical de las capas de la atmósfera.

2.2.2 Radiación e insolación.

La energía requerida por los procesos atmosféricos proviene del sol, energía radiante en forma de ondas electromagnéticas. El 99 % de la energía solar, se emite en longitudes de onda comprendidas entre 0.5 y 40 micrómetros (μm), las longitudes de onda mayores a 2.5 μm son en gran medida, absorbidas por el vapor de agua y el

dióxido de carbono de la atmósfera, las radiaciones con longitudes de onda menores de 0.29 μm son altamente absorbidas en la atmósfera por el nitrógeno y el oxígeno, por lo que la radiación solar que cae sobre la tierra se encuentra en el rango de 0.29 y 2.5 μm .

La insolación⁶ es la cantidad de radiación solar recibida en una hora, en un lugar específico del sistema tierra-atmósfera, se determina por cuatro factores; la constante solar, la transparencia de la atmósfera, la duración de la luz del día y el ángulo con el que los rayos solares caen sobre la tierra.

La constante solar, es la cantidad promedio de radiación recibida en un punto localizado fuera de la atmósfera, en la distancia media entre el sol y la tierra, tiene una ligera variación dependiendo de la producción de energía del sol y la distancia de la tierra y el sol, su valor es de 4.871 kJ/m²h.

La transparencia, se refiere a la forma en que la radiación penetra la atmósfera y llega a la superficie terrestre sin agotarse, al atravesar la atmósfera, una parte de la radiación se refleja desde la parte superior de las nubes y desde la superficie terrestre y la otra parte es absorbida por las moléculas y las nubes; el vapor de agua absorbe en promedio seis veces más radiación solar que los demás gases combinados.

La duración de la luz del día afecta también a la insolación, en el ecuador la duración del día y la noche es siempre la misma, pero en las regiones polares el día puede alcanzar hasta 24 horas en verano.

El ángulo con el que los rayos solares caen sobre la tierra varía a medida que el sol “se mueve” de un lado a otro del ecuador motivo por el cual al medio día se produce la mayor intensidad de insolación y durante la mañana y tarde la insolación es menor.

2.2.3 Balance térmico de la atmósfera

De la radiación total⁷ proveniente del sol, 51 % es absorbida por la superficie terrestre (tierra y océano), 19 % absorbida por la atmósfera (Ozono, vapor de agua,

⁶ Ibíd., p. 7.

⁷ Ibíd., P. 15.

partículas de polvo y nubes), 30 % reflejadas al espacio (aire, nubes y superficie terrestre). El 70 % absorbido por el sistema superficie-atmósfera, es devuelto al espacio como radiación de onda larga, como lo muestra la figura 2.2.

Además de la radiación, el calor se trasmite por convección, conducción y advección. La conducción es el proceso por el que se trasmite el calor a través de la materia, pero sin que esta se transfiera; la convección por su parte es el proceso por el que se trasmite el calor a través de la materia, por el movimiento de esta, estas dos formas de transmisión del calor tiene relación directa con el movimiento vertical del aire. El término advección lo emplean los meteorólogos para denotar la transferencia de calor que se produce por el movimiento horizontal del aire.

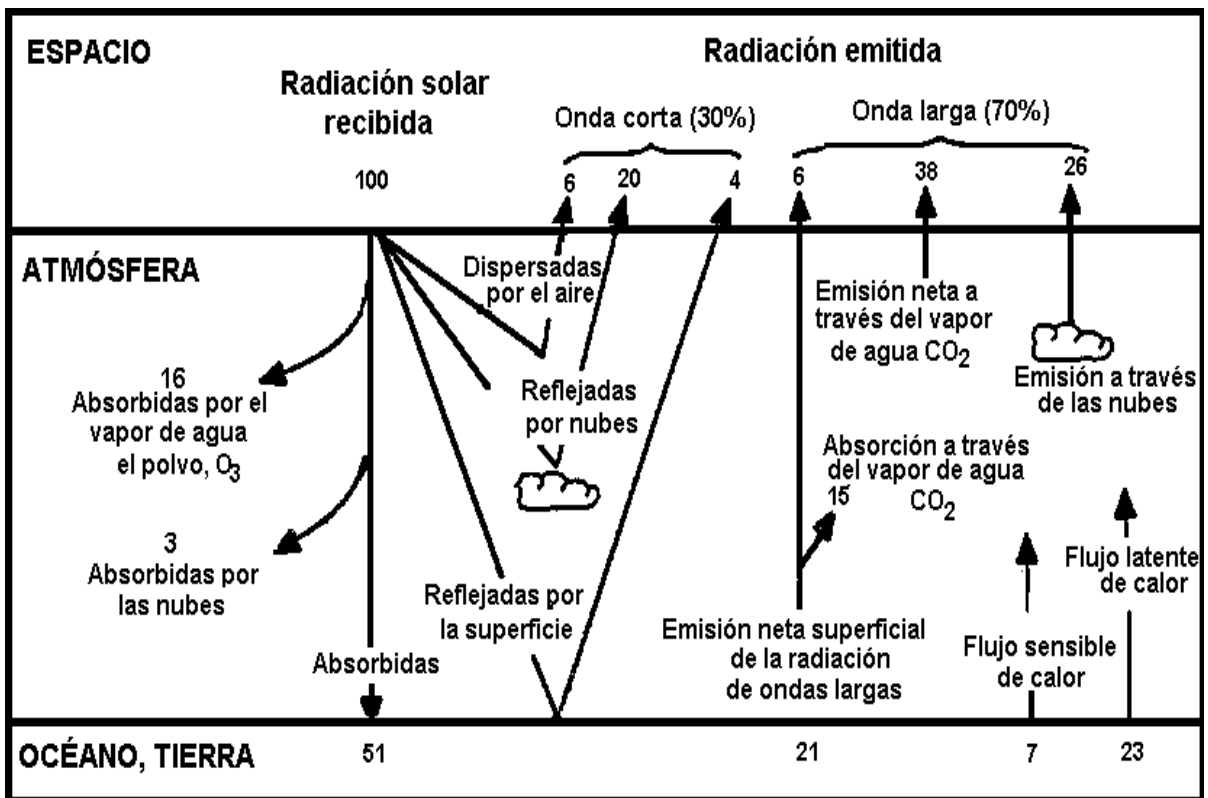


Figura 2.2. Radiación y balance térmico de la atmósfera por cada 100 unidades de radiación recibidas.

2.2.4 Presión atmosférica

La presión atmosférica,⁸ es el peso ejercido por la masa del aire sobre la superficie de la tierra, el 50 % de la masa de la atmósfera se encuentra en los primeros 5 Km de altura y a los 15 Km, se encuentra el 95 % de la masa total de la atmósfera, por lo que la presión atmosférica disminuye drásticamente con la altura. Se ha convenido que la presión a nivel del mar sea de 1 (una) atmósfera, que equivale al peso de una columna de mercurio de 760 mm de altura y un cm² de base.

2.2.5 Movimiento horizontal de la atmosfera.

El aire se mueve⁹ para equilibrar los desbalances de presión causado por la diferencia de temperatura en la superficie terrestre (calentamiento diferencial), el viento por lo tanto es ocasionado porque el aire se traslada de zonas de alta presión a zonas de baja presión y no por la rotación de la tierra, la rotación sólo modifica la circulación. La importancia del movimiento del aire, radica en impedir que las concentraciones de los contaminantes liberados a la atmosfera alcancen niveles peligrosos. Las fuerzas principales que afectan al viento son la fuerza de Coriolis, la fuerza del gradiente de presión y la fricción.

La fuerza de Coriolis es una fuerza aparente causada por la rotación de la tierra y provoca una desviación del aire al este en el hemisferio norte y al oeste en el hemisferio sur. La fuerza de Coriolis aumenta a medida que se incrementa la velocidad del viento, es mayor en los polos y cero en el ecuador.

La presión que equilibra la fuerza que tiende a mover el aire de puntos de presión alta a puntos de presión baja, se llama fuerza de gradiente de presión. El viento no fluye paralelamente con el gradiente de presión debido a la fuerza de Coriolis, la dirección del viento superficial es diferente a la dirección del viento superior debido a la fuerza de fricción, aun cuando tienen el mismo gradiente de presión.

La fricción, es una fuerza que actúa cerca de la superficie terrestre hasta altitudes comprendidas entre 500 y 1000 metros, a esta sección de la atmósfera se le

⁸ *Ibíd.*, p. 23.

⁹ *Ibíd.*, p. 24.

llama capa límite atmosférica, por encima de esta capa la fricción ya no influye en el viento y la fuerza de Coriolis y el gradiente de presión se encuentran balanceadas entre sí. Dentro de la capa de fricción, la fuerza de Coriolis, la fuerza de gradiente de presión y la fuerza de fricción, ejercen una fuerza resultante sobre el viento. El efecto de la fricción sobre el viento aumenta a medida que este se acerca a la superficie terrestre, la influencia de la fricción es mayor mientras más accidentado sea el terreno, la fricción ocasiona que disminuya la velocidad del viento e influye en su dirección. Debido a la fricción, la fuerza de Coriolis decrece en relación con la fuerza de gradiente de presión lo que ocasiona que el viento se desplace a zonas de presión bajas hasta que la fuerza de fricción y la fuerza de Coriolis equilibran la fuerza de gradiente de presión.

El efecto de la fricción en el viento influye de manera significativa en el transporte de los contaminantes del aire, cuando una pluma de contaminantes emerge de una chimenea, es probable que ascienda a través de la capa límite atmosférica donde la fricción cambia la dirección del viento con la altura, fenómeno que dispersará horizontalmente los contaminantes en direcciones distintas, además de que conforme los contaminantes ascienden a diferentes alturas pueden moverse en distintas direcciones.

2.2.6 Influencias topográficas en la circulación del aire.

Las características topográficas¹⁰ influyen en el calentamiento de la tierra y del aire, afectando sobre todo el flujo del aire cercano a la superficie terrestre, estas características pueden agruparse en cuatro categorías: plano, montaña/valle, tierra/agua y áreas urbanas.

Solo una pequeña parte de la superficie terrestre es completamente plana, para propósitos topográficos, algunas áreas se consideran como planas. La turbulencia mecánica del viento y la turbulencia térmica en un terreno plano, se limita a la cantidad de accidentes de la superficie, sean naturales o contruidos por el hombre.

¹⁰ *Ibíd.*, 39.

A un terreno compuesto por montañas y valles, se le denomina terreno complejo, la dispersión de los contaminantes en este tipo de terreno es mucho más complicada que en el terreno plano. La turbulencia mecánica en un terreno complejo depende de la forma, tamaño y orientación de las características topográficas, por lo que una parte del aire tiende a elevarse sobre los obstáculos que se presentan en su camino, mientras la otra se abre paso por los lados, esto es, la turbulencia térmica depende de las mismas características topográficas que afectan la turbulencia mecánica.

Por comodidad muchas ciudades se ubican cerca de grandes cuerpos de agua, formando una interfaz tierra/agua. Las propiedades térmicas del agua y de la tierra son radicalmente diferentes, la tierra y los objetos que se encuentran sobre ella se calientan y enfrían rápidamente, mientras que el proceso de calentamiento y enfriamiento del agua es más lento. Durante el día el aire sobre la superficie de la tierra se calienta y se eleva, mientras el aire más frío sobre el agua es atraído tierra adentro (brisa marina), durante la noche la temperatura del aire es menor en la tierra que en el agua, creando un flujo de aire de retorno de la tierra hacia el agua (brisa terrestre), la velocidad del viento en una brisa terrestre es más lenta, mientras que en una brisa marina es más rápida.

En las ciudades, los materiales de construcción como el ladrillo y el concreto absorben y retienen el calor de manera más eficiente que el suelo o la vegetación de las áreas rurales, durante la noche el área urbana continua irradiando el calor absorbido, como resultado el aire se calienta y asciende, creando un domo sobre la ciudad (efecto de la isla calórica), al amanecer el área urbana empieza a enfriarse, sale el sol y se calienta de nuevo el complejo urbano, por lo que las áreas urbanas nunca recuperan condiciones estables. La turbulencia mecánica en áreas urbanas es parecida a la del terreno complejo.

2.2.7 Flotabilidad del aire.

La temperatura y la presión atmosférica influyen en la flotabilidad¹¹ de las porciones de aire, la temperatura de este se eleva conforme la presión atmosférica aumenta y decrece a medida que esta disminuye. Cuando una porción de aire de la superficie terrestre se calienta más que el aire que lo rodea, esta porción asciende y en su trayectoria disminuye su presión y su temperatura, al mismo tiempo el aire frío desciende incrementando la presión y la temperatura del aire circundante. Si la temperatura de la porción de aire y la del aire que lo rodea es la misma, la porción no se elevará ni descenderá a menos que sea por la influencia del flujo del aire.

2.2.8 Gradiente vertical de temperatura.

El gradiente vertical de temperatura,¹² representa la proporción en que la temperatura del aire cambia con la altura, en la troposfera, el gradiente vertical de temperatura es aproximadamente $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}/1000\text{ m}$, sin embargo llega a tener variaciones dependiendo del lugar y la hora del día. Un gradiente vertical se considera negativo cuando hay un decremento de la temperatura con la altura y se considera positivo cuando hay un aumento de la temperatura con la misma.

La presión atmosférica provoca el movimiento vertical en una porción de aire seco (el agua que contiene permanece como vapor), en un proceso de tipo adiabático, en donde la compresión da lugar al calentamiento y la expansión al enfriamiento. En estas condiciones la porción de aire seco que se eleva en la atmósfera se enfría con un gradiente llamado adiabático seco (figura 2.3), a razón de $9.8\text{ }^{\circ}\text{C}/1000\text{ m}$,

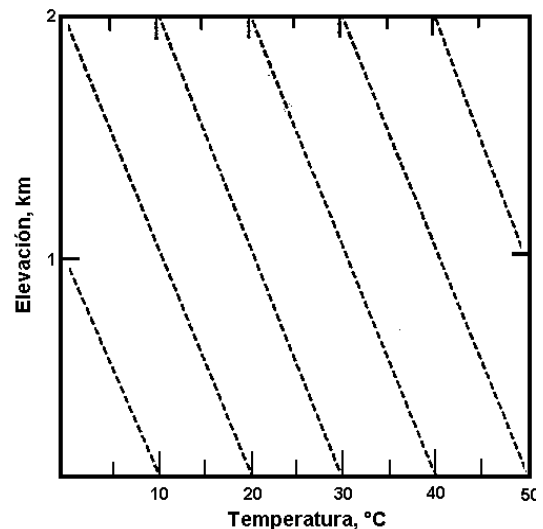


Figura 2.3. Representación del gradiente vertical adiabático seco.

¹¹ *Ibíd.*, p. 56.

¹² *Ibíd.*, p. 58.

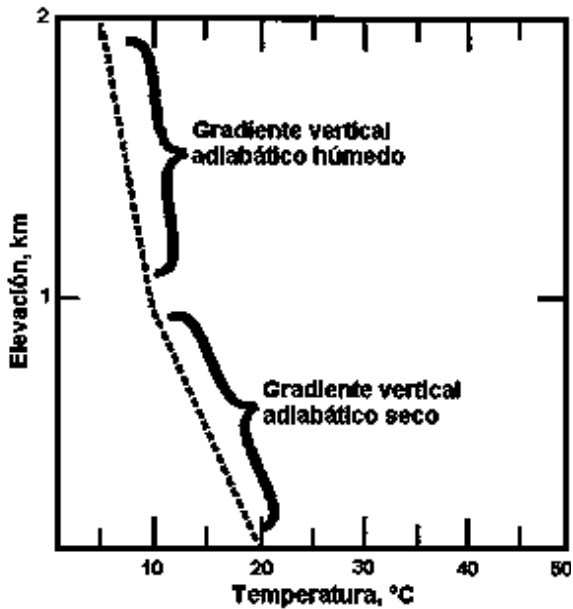


Figura 2.4. Representación de los gradientes vertical adiabático seco y adiabático húmedo.

este valor es fijo, independientemente de la temperatura ambiental.

Cuando el aire seco se eleva, se sigue enfriando en el gradiente adiabático seco hasta que alcanza su temperatura de condensación o punto de rocío, la presión de vapor del agua alcanza la presión de saturación del aire y una parte del vapor de agua se comienza a condensar liberando calor latente en la porción del aire, ocasionando que el gradiente de temperatura disminuya, a este nuevo gradiente se le conoce como gradiente vertical adiabático húmedo

(figura 2.4), que no es constante y su valor depende de la temperatura y la presión.

Se estima que a mitad de la troposfera tiene un valor de 6 a 7 °C/1000.

El verdadero perfil de la temperatura del aire, da lugar al gradiente vertical ambiental (figura 2.5), que es una disminución de la temperatura con la altura, su valor varía considerablemente con la altitud y puede alcanzar valores mayores o menores que el gradiente adiabático seco. El gradiente vertical ambiental puede experimentar un aumento de la temperatura con la altitud (entre 200 y 350 m), este fenómeno se conoce como inversión de la temperatura.

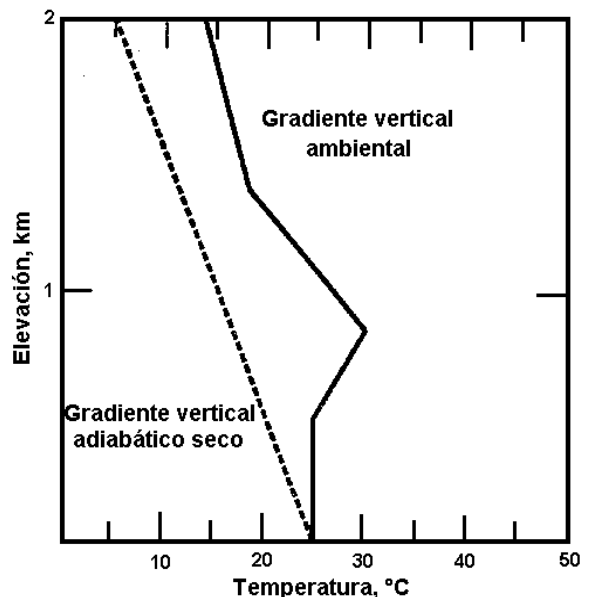


Figura 2.5. Representación de los gradientes vertical ambiental y vertical adiabático seco.

2.2.9 Altura de mezcla.

Cuando una porción de aire se calienta cerca de la superficie, se eleva y otra desciende para tomar su lugar, la relación entre el gradiente vertical adiabático y el gradiente vertical ambiental se hace visible y este último controla el grado en que una porción de aire puede elevarse o descender. La altura máxima a la que una porción de aire puede ascender se le llama altura de mezcla¹³ y se localiza en el punto en el que el gradiente vertical adiabático seco intercepta la línea del gradiente

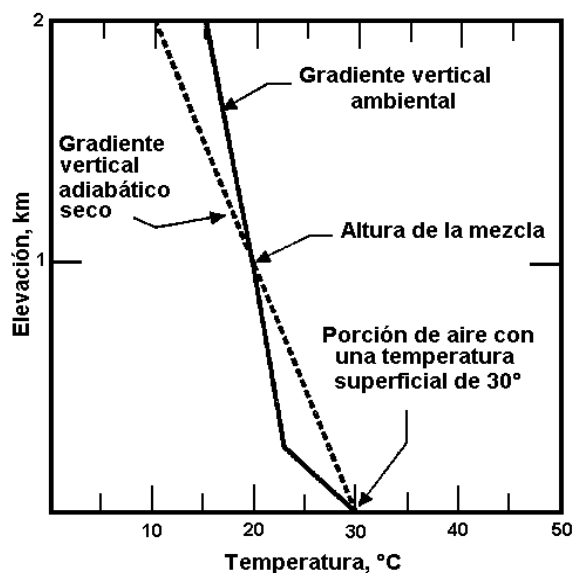


Figura 2.6. Representación de la altura de mezcla.

vertical ambiental (figura 2.6), si el gradiente vertical ambiental es mucho mayor que el adiabático seco la altura de mezcla se localiza a mayores alturas de la atmósfera. Al aire localizado debajo de la altura de mezcla, se ha dado en llamar capa de mezclado y siempre conviene que ésta sea profunda para que el volumen de aire disponible sea mayor para la dispersión de los contaminantes.

2.2.10 Estabilidad atmosférica.

El grado de estabilidad de la atmósfera,¹⁴ se determina por la diferencia de temperaturas de una porción del aire y de la que lo circunda, esta diferencia puede ocasionar el movimiento vertical de la porción, permitiendo que el aire se eleve o descienda. Dependiendo de la diferencia de temperaturas, se pueden predecir diferentes niveles de estabilidad, por lo que la atmósfera puede ser estable, condicionalmente estable, neutra, condicionalmente inestable o inestable.

Si el gradiente vertical ambiental es menor que el gradiente vertical adiabático, la porción de aire se enfría a menos de $9.8\text{ }^{\circ}\text{C}/1000\text{ m}$, se dice entonces que la

¹³ *Ibíd.*, p. 61.

¹⁴ *Ibíd.*, p. 62.

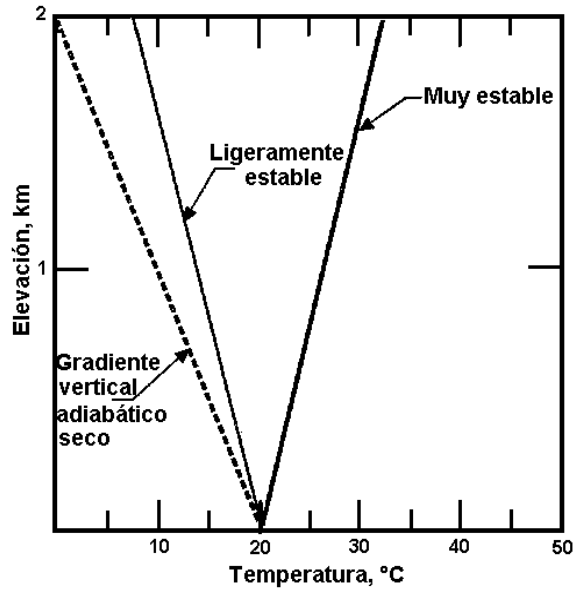


Figura 2.7. Representación de las condiciones de una atmósfera estable.

atmósfera es estable (figura 2.7) y se inhibe la circulación vertical. El aire que se eleva verticalmente permanece más frío y denso que el circundante, una vez que se retira la fuerza de elevación éste regresa a su posición original. Las condiciones estables se presentan por las noches cuando el viento es escaso o nulo.

La inestabilidad en la atmósfera (figura 2.8) ocurre, cuando la diferencia de temperaturas entre el gradiente vertical de la atmósfera y el gradiente vertical adiabático seco aumenta con la altura, estas condiciones favorecen la circulación vertical en ambas direcciones provocando que la porción de aire caliente se eleve y el circundante más frío se mueva por debajo. Las condiciones inestables más comunes se presentan en días soleados con vientos de baja velocidad y fuerte insolación.

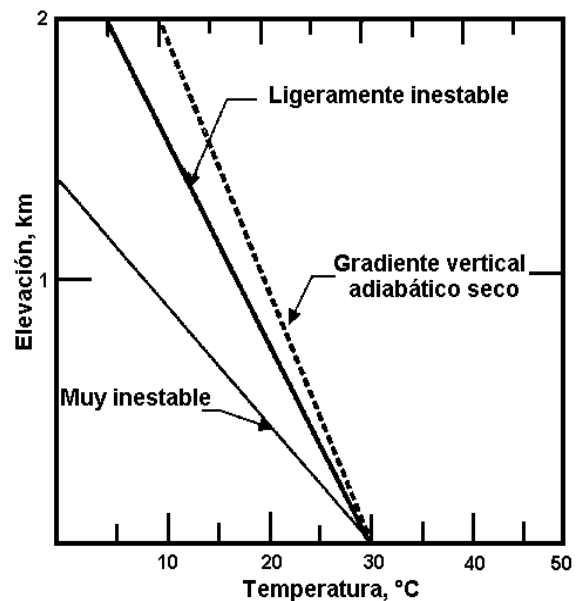


Figura 2.8. Representación de las condiciones de una atmósfera inestable.

La atmósfera presenta una estabilidad neutra (figura 2.9), cuando el gradiente vertical ambiental es el mismo que el gradiente vertical adiabático seco, estas condiciones no estimulan y tampoco inhiben el movimiento vertical del aire, las condiciones neutras son pues, la frontera entre las condiciones estables y las inestables y se presentan durante los días de viento o cuando las nubes impiden el calentamiento o enfriamiento de la superficie de la tierra.

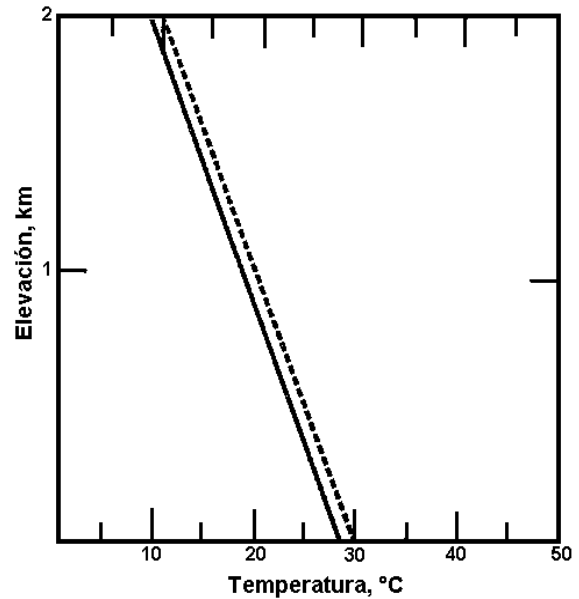


Figura 2.9. Representación de las condiciones de una atmósfera neutra.

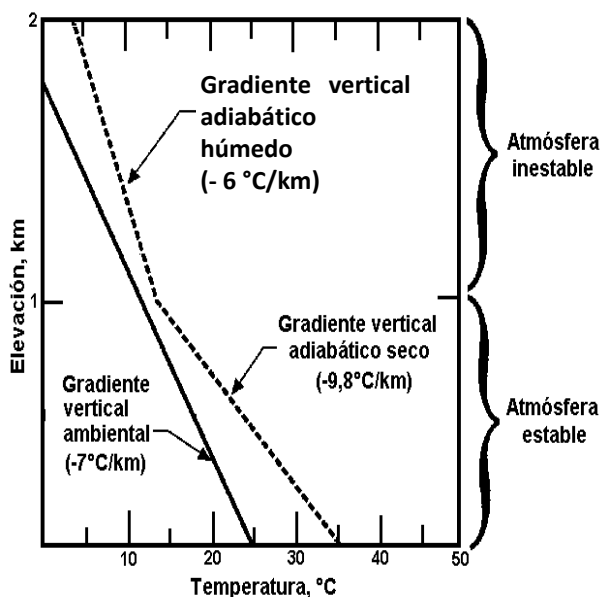


Figura 2.10. Representación de la estabilidad condicional de la atmósfera.

Cuando la porción de aire se satura, éste se enfría más lentamente en el gradiente vertical adiabático húmedo, esta situación modifica las condiciones de estabilidad y da lugar a la inestabilidad condicional de la atmósfera (figura 2.10), esta condición se presenta cuando el gradiente vertical ambiental es mayor que el gradiente vertical adiabático húmedo, pero menor que el gradiente vertical adiabático seco. Las condiciones inestables se favorecen hasta el nivel de condensación y las inestables por encima de éste.

2.2.11 Inversión térmica.

Una inversión térmica¹⁵ se presenta cuando la temperatura del aire aumenta con la altura (figura 2.11), las plumas de los contaminantes que se emiten en una capa de inversión, no se dispersan mucho al ser transportadas por el viento, las inversiones están directamente relacionadas con las altas concentraciones de contaminantes en el aire. Hay cuatro tipos de inversiones principales; por radiación, por subsidencia, frontal y por advección.

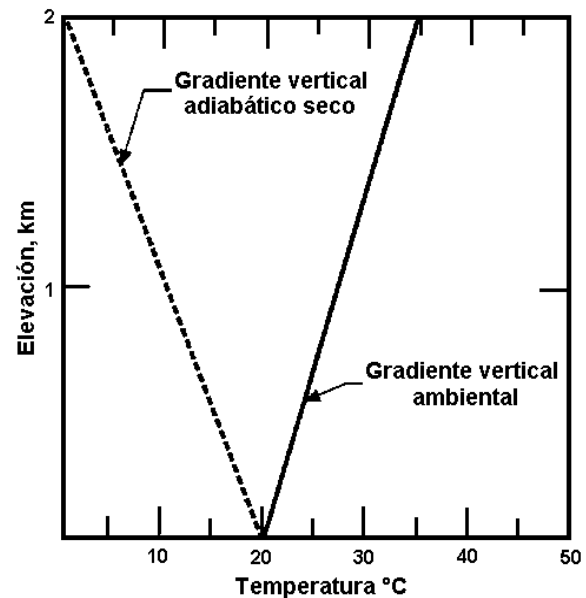


Figura 2.11. Representación de una inversión en el gradiente vertical ambiental.

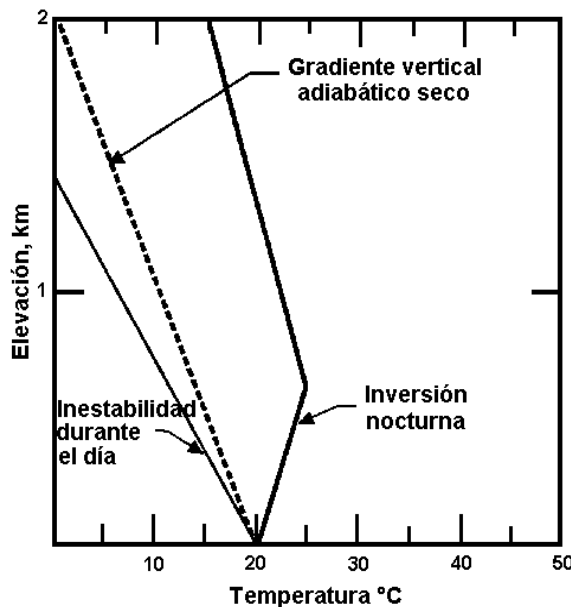


Figura 2.12. Inversión térmica por radiación generada por el enfriamiento acelerado de la superficie terrestre.

La inversión por radiación (figura 2.12), es la más común de las inversiones, se genera por el enfriamiento acelerado de la superficie terrestre, que a su vez provoca una capa de aire frío cercana a la superficie y encima de ésta una capa de aire más caliente, impidiendo el movimiento vertical. Este tipo de inversión se presenta desde las horas finales de la tarde hasta las primeras horas de la mañana, con cielos despejados y vientos calmados, estas condiciones determinan la

¹⁵ Ibíd., p. 68.

inestabilidad atmosférica durante el día. La inversión por radiación es de corta duración y los contaminantes que quedan atrapados durante la noche son dispersados por el fuerte movimiento vertical de las primeras horas de la mañana, sin embargo, en lugares como los valles cerrados, es común que el movimiento descendente de aire frío pueda reforzar una inversión por radiación.

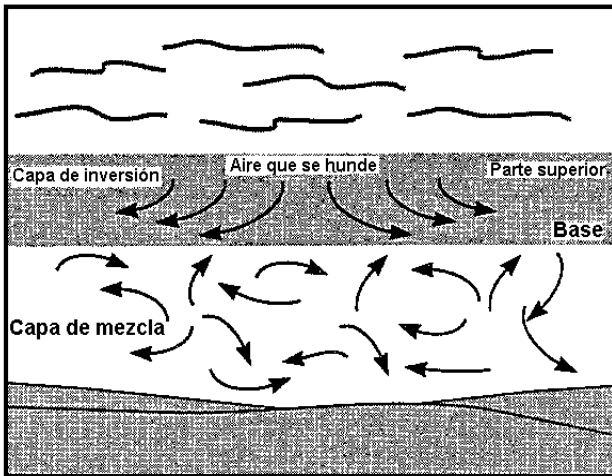


Figura 2.13. Inversión térmica por subsidencia generada por sistemas de alta presión.

La inversión por subsidencia (figura 2.13), está relacionada con sistemas de alta presión, debido a que cerca de la superficie, la presión comprime y calienta al aire. Durante el día la capa de inversión resultante se eleva a varios cientos de metros y en la noche puede descender hasta el suelo por el enfriamiento del aire superficial, este tipo de inversión suele tener una duración relativamente larga, debido al posible estancamiento del

sistema de alta presión. Este tipo de inversión se puede presentar en días despejados y sin nubes

La inversión frontal (figura 2.14), está relacionada tanto con los frentes fríos como con los calientes, el aire frío desplaza al aire cálido, lo que provoca un movimiento vertical mínimo en la capa de aire frío más cercano a la superficie. Los efectos de este tipo de inversión son de corta duración debido a que los frentes presentan un movimiento horizontal y sólo se

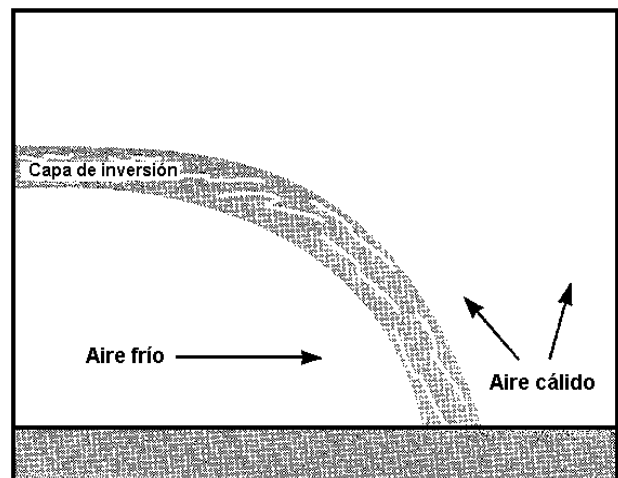


Figura 2.14. Inversión térmica frontal generada por frentes fríos y cálidos.

prolongan si se estacionan.

Por último, la inversión por advección (figura 2.15), se relaciona con el flujo horizontal de aire caliente, cuando éste se mueve sobre una superficie cubierta de nieve o extremadamente fría, este tipo de inversión es muy común en el invierno.

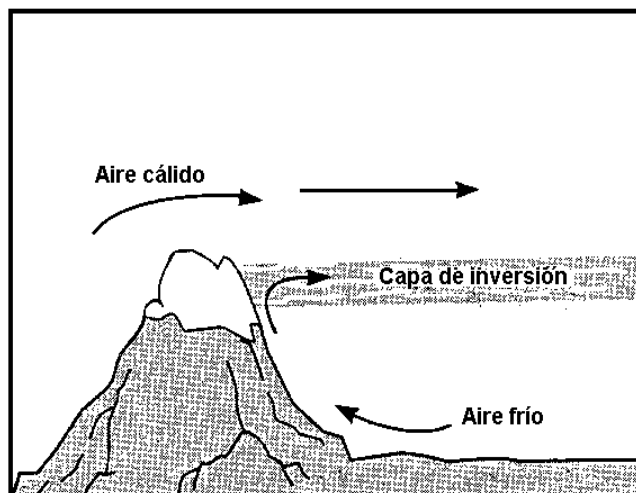


Figura 2.15. Convección por advección provocada por el terreno.

2.3 Métodos de estimación de las emisiones de los contaminantes.

Se pueden citar tres métodos¹⁶ básicos para estimar las emisiones de contaminantes peligrosos del aire: el de los factores de emisión, por balance de masa y el de cálculos de ingeniería.

2.3.1 Método de los factores de emisión.

Este expresa las emisiones al aire como una razón del contaminante liberado con respecto a un parámetro relacionado al proceso, a menudo expresado como la cantidad de contaminante emitido por entrada al proceso, o pieza de equipo o por cantidad producida o procesada, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q = P_R EF \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde: Q = tasa de emisión.

P_R = actividad del proceso.

EF = factor de emisión.

¹⁶ Instituto Nacional de Ecología. Análisis de Riesgos Ambientales. México. 2004., p. 28.

2.3.2 Método del balance de masa.

Este método se emplea para estimar las emisiones cuando los factores de emisión no se encuentran disponibles, consiste en igualar las entradas de material al consumo, acumulación y pérdida del mismo. En este método se deben considerar todas las rutas de entrada, de salida, así como la acumulación o pérdida de las sustancias en el equipo, incluyendo los equipos de control y/o cualquier reacción química, la ecuación general de balance de materia para emisiones es:

$$Q_{emisión} = Q_{entrada} + Q_{producción} + Q_{Sumideros} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde: $Q_{emisión}$ = rapidez de masa emitida de una sustancia química.

$Q_{entrada}$ = flujo másico de una sustancia al sistema.

$Q_{producción}$ = fuente interna de la sustancia, como la producción del mismo.

$Q_{Sumideros}$ = almacenamiento interno o remoción de la sustancia química.

2.3.3 Método de los cálculos de ingeniería.

Los cálculos de ingeniería involucran los principios de química y física para estimar las emisiones, por ejemplo el empleo de la ley general de los gases, la ley de Raoult, sólo por citar algunos ejemplos, este método es recomendable cuando las emisiones no se pueden estimar directamente, como por ejemplo en los componentes de una mezcla.

2.4 Transporte y dispersión de los contaminantes en la atmósfera.

2.4.1 Dispersión de los contaminantes en fuentes puntuales.

La dispersión de los contaminantes de una fuente, depende de la magnitud de la turbulencia en la atmósfera cercana, ésta se genera por el movimiento horizontal y vertical de la atmósfera además de otros factores meteorológicos como la radiación

solar, la precipitación pluvial y la humedad, que afectan la concentración de los contaminantes en el aire.

Sabiendo que poco se puede hacer por controlar las fuerzas naturales sobre el transporte y dispersión de los contaminantes, la mejor estrategia disponible es prevenir la producción de éstos en la fuente. Existen técnicas para ayudar a dispersar los contaminantes en la atmósfera, entre las más comunes están las chimeneas, estructuras con las que cuentan la mayoría de las industrias para dispersar sus contaminantes, mientras más alta sea la chimenea, mayor será la probabilidad de que los contaminantes se dispersen y diluyan antes de afectar a las poblaciones vecinas. A la emanación visible de una chimenea se le llama pluma, mientras más corta sea la chimenea habrá mayor probabilidad de que la pluma sea afectada por la cavidad formada por el mismo edificio o de algún otro próximo a la chimenea. Los contaminantes emitidos por la chimenea pueden transportarse a grandes distancias y por lo general sus concentraciones disminuyen a medida que se alejan del punto de descarga y puedan ser dispersados por el viento.

2.4.2 Comportamientos de la pluma.

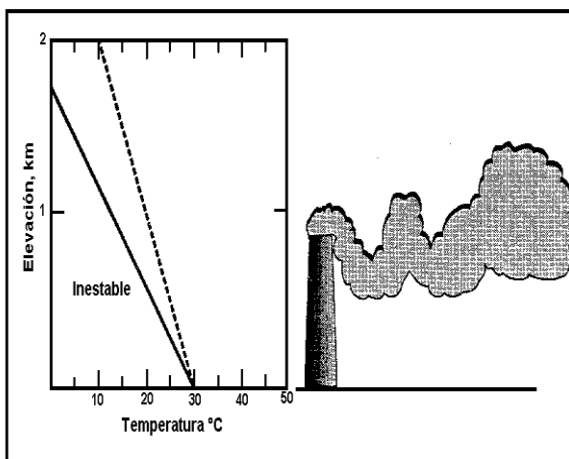


Figura 2.16. Pluma de espiral generada en condiciones de inestabilidad.

Los diversos tipos de pluma¹⁷ dependen en gran medida de las condiciones de la estabilidad atmosférica, siendo los más comunes la pluma de espiral, de abanico, de cono, flotación y de fumigación.

La pluma de espiral (figura 2.16), se produce en condiciones muy inestables, situación que favorece la dispersión de los contaminantes debido a la turbulencia causada por el giro del aire.

¹⁷ Air Pollution Training Institute (2005). Op., cit., p. 72.

La pluma de abanico (figura 2.17), se produce bajo condiciones estables, por lo que la inversión inhibe el movimiento vertical sin impedir el horizontal y ésta se puede extender a varios kilómetros a sotavento de la fuente, este tipo de pluma se puede presentar por las mañanas en la inversión por radiación.

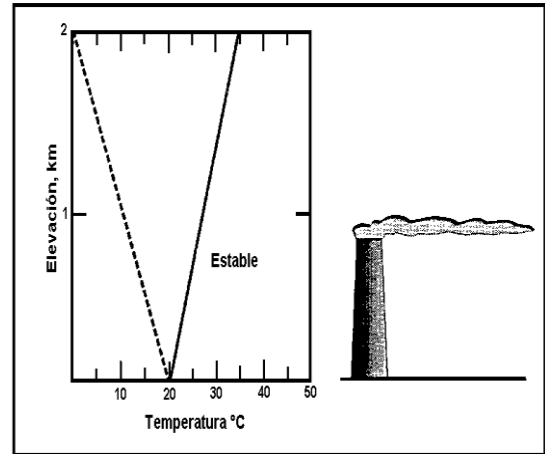


Figura 2.17. Pluma de abanico generada por condiciones estables.

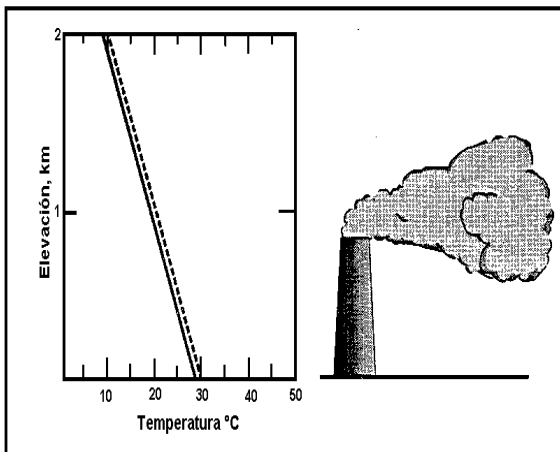


Figura 2.18. Pluma de cono generada en condiciones neutras o ligeramente estables.

La pluma de cono (figura 2.18), se produce bajo condiciones neutras o ligeramente estables, es probable que se produzcan en días nublados o soleados entre la interrupción de una inversión por radiación y las condiciones diurnas inestables.

Una pluma de flotación (figura 2.19), se puede presentar cuando las condiciones son inestables y ésta se descarga en la capa de mezclado por encima de una inversión térmica, por lo que ocurre una dispersión efectiva sin concentraciones importantes alrededor de la fuente y a nivel del piso.

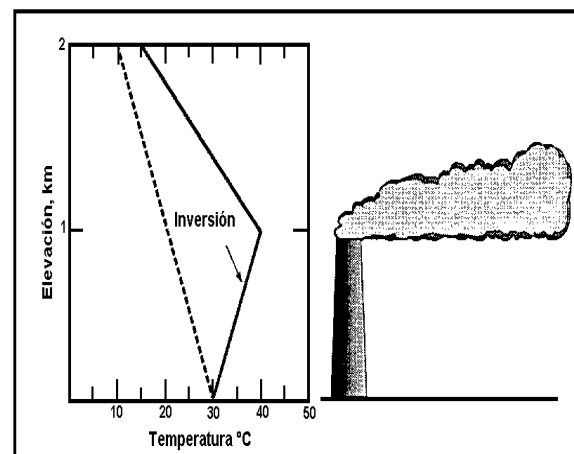


Figura 2.19. Pluma de flotación generada en condiciones inestables y sobre una inversión.

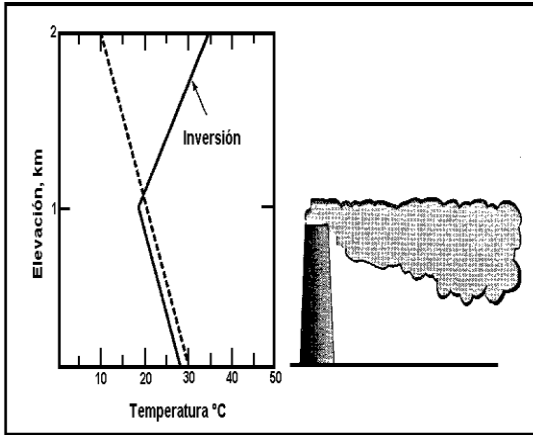


Figura 2.20. Fenómeno de fumigación, se produce bajo una capa de inversión.

La fumigación (figura 2.20), ocurre cuando la pluma se libera debajo de una capa de inversión, esta condición puede provocar que la pluma quede entrampada dentro de la capa de inversión, de tal modo que los contaminantes se pueden transportar rápidamente hasta el nivel de piso, en donde las concentraciones llegan a ser muy altas.

2.4.3 Elevación de la pluma.

A medida que los gases de la pluma se mezclan con el aire ambiental (arrastre), la pluma aumenta su diámetro y se eleva, a este fenómeno se le llama elevación de la pluma (figura 2.21) y permite que los contaminantes se eleven a una altura mayor en la atmósfera, ocasionando que se dispersen de manera más adecuada antes de llegar a nivel del piso. A la altura final de la pluma se le conoce como altura efectiva de la chimenea (H) y está constituida por la altura física de la chimenea (h_s) y la elevación de la pluma (Δh), la elevación de la pluma depende de las condiciones ambientales y de las características físicas de la chimenea y del efluente del gas.

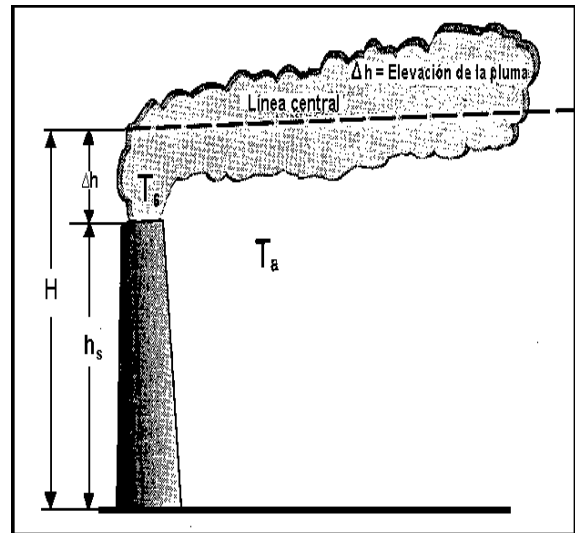


Figura 2.21. Elevación de la pluma

Entre las condiciones atmosféricas que más influyen en la elevación de la pluma se encuentran: el momentum y la flotabilidad. La velocidad inicial de la pluma disminuye rápidamente debido al arrastre cuando adquiere un momentum horizontal,

esto hace que la pluma se incline, hasta que parezca horizontal al suelo, entre mayor sea la velocidad del viento, más horizontal será el momentum que adquiere la pluma.

En una atmósfera inestable, la flotabilidad de la pluma aumenta a medida que se eleva, lo que hace que la altura final de la pluma se incremente. En una atmósfera estable, la flotabilidad de la pluma disminuye a medida que se eleva, por último, en una atmósfera neutral la flotabilidad de la pluma permanece constante. La pluma también pierde flotabilidad por la acción del viento, pues la mezcla dentro de la pluma arrastra al aire atmosférico hacia su interior, por lo que en días con mucho viento la pluma no se eleva muy alto sobre la chimenea.

Como consecuencia del diseño de la chimenea o los edificios laterales, es posible que la pluma no se eleve libremente en la atmósfera, debido al movimiento del viento entre los edificios, dando lugar a dos fenómenos; el flujo descendente de la chimenea y el flujo descendente aerodinámico, que provocan concentraciones elevadas de contaminantes inmediatamente a sotavento de la fuente. El flujo descendente de la chimenea se genera cuando la razón entre la velocidad de la salida de la chimenea y la del viento es mínima. El flujo descendente aerodinámico se genera por el movimiento del aire, sobre y entre los edificios que provocan un arrastre turbulento.

2.4.4 Determinación de la elevación de la pluma.

Las fórmulas más usadas para determinar la elevación de las plumas, son las desarrolladas por Gary A. Briggs, se aplican a las plumas dominadas por la flotabilidad con temperaturas mayores que la del aire ambiental.

$$\Delta h = \frac{1.6F^{\frac{1}{3}}x^{\frac{2}{3}}}{v} \quad \text{Ec. 2.3}$$

$$F = \frac{g}{\pi} V \left[\frac{T_s - T_a}{T_s} \right] \quad \text{Ec. 2.4}$$

Dónde: Δh = elevación de la pluma sobre la chimenea

F = flujo de flotabilidad

v = velocidad promedio del viento

x = distancia a sotavento de la chimenea

g = aceleración debido a la gravedad (9.8 m/s²)

V = tasa volumétrica del flujo de gas de la chimenea

T_s = temperatura del gas de la chimenea

T_a = temperatura promedio del ambiente

La fórmula de elevación de la pluma sirve para calcular la línea central imaginaria de ésta, que es donde se producen las mayores concentraciones de contaminantes.

2.5 Modelos de dispersión de la calidad del aire.

2.5.1 Estimación de la concentración de los contaminantes.

Las ecuaciones 2.3 y 2.4 solo permite saber cuál es la concentración dentro de la línea central de la pluma, por lo tanto el estimado de la concentración de los contaminantes en cualquier punto, incluso a nivel de piso, se puede determinar mediante ecuaciones de distribución y/o modelos de la calidad del aire, estos modelos generalmente son válidos para la capa de la atmósfera más cercana al suelo, donde se producen cambios frecuentes en la temperatura y en la distribución de los vientos.

2.5.2 Tipos de modelos de la calidad del aire.

Los modelos de la calidad del aire¹⁸ están constituidos por un grupo de ecuaciones empleadas para calcular las concentraciones de los contaminantes, generados por la dispersión e impacto de las plumas bajo diferentes condiciones meteorológicas y topográficas. Existen cuatro tipos genéricos de modelos; gaussiano, numérico, estadístico y físico.

¹⁸Air Pollution Training Institute. Introduction to Dispersion Modeling. USA. 1997, p.2-12.

Los modelos gaussianos emplean la ecuación de distribución gaussiana y se usan para determinar el impacto de contaminantes no reactivos. Los modelos numéricos son más apropiados que los gaussianos, pero requieren información detallada sobre las fuentes y los contaminantes, situación que limita su empleo. Los modelos estadísticos, se emplean cuando la información sobre los procesos físicos y químicos de una fuente está incompleta o es poco confiable. Finalmente, los modelos físicos requieren de estudios de simulación de fluidos a escala, son modelos complejos que requieren la supervisión de expertos y se aconseja su aplicación en terrenos complejos o condiciones de flujo complejas.

La selección del modelo de la calidad del aire depende del tipo de contaminante emitido, de la complejidad de la fuente y del tipo de topografía que rodea las instalaciones,

2.5.3 Modelo de distribución gaussiano.

Éste tipo de modelo, asume que las concentraciones del contaminante en la pluma, puede representarse por una función estadística de distribución estándar normal, tanto vertical como horizontalmente, las formas de las curvas de gauss en ambas direcciones se vuelven más planas cuanto más se desplaza la pluma a favor del viento (figura 2.22).

Para la aplicación del modelo se asume que el flujo se mantiene estable, es decir, está a régimen estacionario, lo cual supone:

- La magnitud y la dirección del flujo permanece constante en el periodo de interés.

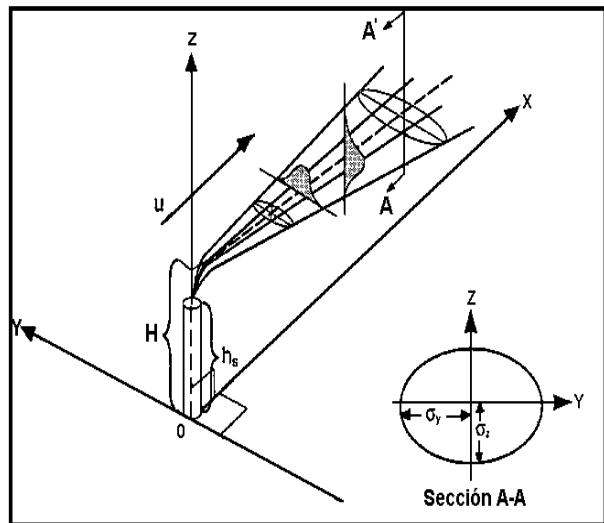


Figura 2.22. Representación esquemática del modelo gaussiano de dispersión de pluma.

- No existen barreras para la dispersión por encima o por debajo de la fuente.
- El caudal de la fuente se emite de manera constante.
- Los contaminantes son inertes y tienen densidad igual a la del aire.

La fórmula normalizada para una fuente puntual del modelo de gauss es:

$$\chi = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z v} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{y}{\sigma_y}\right]^2} \left\{ e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{z-H}{\sigma_z}\right]^2} + e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{z+H}{\sigma_z}\right]^2} \right\} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde:

χ = concentración en un punto x, y, z. a nivel del piso.

Q = masa emitida en unidad de tiempo.

σ_y = desviación estándar de la concentración de contaminantes en dirección y (horizontal). Se le denomina coeficiente de dispersión en dirección horizontal.

σ_z = desviación estándar de la concentración de contaminantes en dirección z (vertical). Se le denomina coeficiente de dispersión en dirección vertical.

y = distancia en la dirección horizontal.

z = distancia en la dirección vertical.

v = velocidad del viento.

La distribución gaussiana determina el tamaño de la pluma a sotavento de la fuente, el tamaño de la pluma depende de la estabilidad atmosférica y de su propia dispersión vertical y horizontal. Los coeficientes de dispersión, son función de la velocidad del viento, de la cubierta de nubes y del calentamiento de la superficie por el sol.

2.5.4 Clasificación de la estabilidad atmosférica.

Para propósitos de los modelos de la calidad del aire y para estimar la dispersión de los contaminantes, la estabilidad atmosférica se clasifica en seis clases, que se basan en cinco categorías de estabilidad de viento superficial, tres tipos de insolación diurna y dos tipos de nubosidad nocturna, a estos tipos de estabilidad se les denomina clases de estabilidad Pasquill- Gifford.

Para condiciones atmosféricas inestables, las clases de estabilidad puede ser A, B o C, para condiciones neutras D y para condiciones estables puede ser E o F. para cielos totalmente cubiertos tanto de día como de noche, debe considerarse clase de estabilidad D (Cuadro 2.2).

Cuadro 2.2 categorías de estabilidad Pasquill-Gifford

Horario	Estabilidad atmosférica	Clase Pasquill-Gifford
Día	Muy inestable	A
	Inestable	B
	Ligeramente inestable	C
Día/Noche	Neutra	D
	Ligeramente estable	E
Noche	Estable	F

Como se puede ver en el cuadro 2.2, la estabilidad A, B y C representan las horas diurnas con condiciones inestables, la estabilidad D representa los días o noches con cielos cubiertos y con condiciones neutras y las estabilidades E y F, las horas nocturnas y gran estabilidad. La nubosidad se mide en octavos, siendo 0/8 cielo totalmente despejado y 8/8 cielo totalmente cubierto (cuadro 2.3).

Cuadro 2.3 Clases de estabilidad Pasquill-Gifford para condiciones diurnas y nocturnas, según la radiación solar incidente, para todos los rangos de velocidad del viento.

Velocidad del viento (m/s) a 10 m de altura sobre piso	Insolación			Noche	
	Radiación solar incidente			Cobertura de nubes	
	Fuerte Mayor de 50 cal/cm ² h	Moderada 25 a 50 cal/cm ² h	Débil Menos de 25 cal/cm ² h	4/8 a 8/8	0/8 a 3/8
Menos de 2	A	A a B	B	F	F
2 a 3	A a B	B	C	E	F
3 a 5	B	B a C	C	D	E
5 a 6	C	C a D	D	D	D
Más de 6	C	D	D	D	D

En los modelos gaussianos, los coeficientes de dispersión representan la dispersión de la pluma lejos de la línea central. La figura 2.23, muestra los valores de los coeficientes de dispersión que estos modelos emplean, según la clasificación de la estabilidad y la distancia a sotavento de la chimenea.

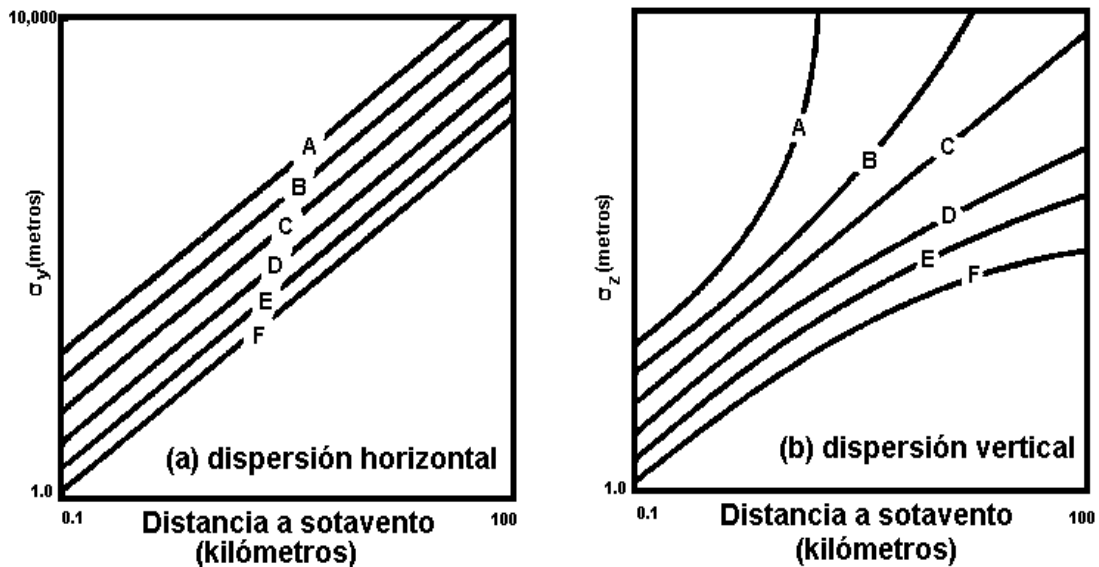


Figura 2.23. Coeficientes de dispersión horizontal y vertical de acuerdo a la estabilidad y a la distancias a sotavento de la chimenea.

2.5.5 Modelos computarizados para estimar la dispersión atmosférica.

El empleo de modelos computarizados para estimar la dispersión atmosférica, simplifica mucho los cálculos de la concentración de contaminantes y permite aplicarlos en escenarios más complejos. Los modelos se pueden clasificar en dos tipos¹⁹, sondeo y refinados.

Es recomendable que un modelo de sondeo se emplee antes que un refinado, para hacer un diagnóstico de la concentración de los contaminantes emitidos por una fuente. Los modelos de sondeo emplean técnicas y suposiciones relativamente sencillas, generando por tanto resultados conservadores. Este tipo de modelos se emplea para detectar las fuentes que pueden implicar un problema para la calidad del aire.

¹⁹Ibidem.

Los modelos refinados, presentan cálculos más analíticos y complejos, requieren información más detallada de la fuente, de las condiciones meteorológicas y del terreno, por tanto, se obtienen estimados más exactos y descriptivos sobre la concentración de los contaminantes para las áreas que rodean a la fuente.

La EPA, establece una serie de modelos recomendados²⁰ para abordar el problema de la calidad del aire, el proceso de selección de éstos es muy riguroso, pues son sometidos a pruebas exhaustivas para verificar su capacidad de reproducir los procesos atmosféricos en campo y su validez ante otros. En muchos casos, estos modelos no son los más actuales y por tanto quizás sean superados por otros más recientes, sin embargo se puede afirmar que tienen una fiabilidad contrastada. Entre los modelos para estimar la concentración de contaminantes de la calidad del aire recomendados por EPA se encuentran: Residue Analytical Methods (RAM), Industrial Source Complex as the Short Term (ISCST3), Industrial Source Complex as the Long Term (ISCLT3), Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for Unstable Situations (CTDMPLUS), Screening Procedures for Estimating the Air Quality Impact of Stationary Sources (SCREEN3), Gaussian Plume Model (SHORTZ), Rough Terrain Diffusion Model (RTDM), modelo de sondeo del Complex Terrain Dispersion Model (CTSCREEN), Terrain Screening Model (VALLEYSCRN) y Rough Terrain Diffusion Model (RTDM). La aplicación de estos modelos, depende del nivel de estudio a realizar (sondeo o refinado), del tipo de terreno (complejo o simple), del tipo de fuente (simple o múltiple), la población alrededor de la fuente (rural o urbana) y el periodo de tiempo de análisis de la distribución de los contaminantes (corto o largo plazo).

2.6 Toxicología de la contaminación del aire.

2.6.1 Mecanismos naturales de defensa del cuerpo.

El ingreso de sustancias al cuerpo ocurre a través de: pulmones, intestinos, boca y piel principalmente, para impedir que las sustancias nocivas ingresen, éste emplea mecanismos de defensas, las barreras: físicas, mecánicas y químicas.

²⁰Secretary for Environmental Protection California Environmental Protection Agency. The Air Toxics Hot Spots Program Guidance Manual for Preparation of Health Risk Assessments. USA. 2003. p. 4.24.

Las barreras físicas son: la piel y vías respiratorias, la primera impide el paso de sustancias a través de ella y la segunda intercepta las partículas inhaladas. Cuando las barreras físicas son insuficientes, se accionan los medios mecánicos del cuerpo que se especializan en la remoción de elementos irritantes en las vías respiratorias, los medios mecánicos son el estornudo, la tos, el movimiento mucociliar y los macrófagos alveolares. Si las barreras mecánicas del cuerpo son superadas, entra en acción el último frente de defensa, las defensas químicas que comienzan a operar en la piel y el aparato digestivo y si los invasores son absorbidos al torrente sanguíneo, éstos son atacados por el sistema inmunológico.

El proceso y transformación de una sustancia tóxica en el cuerpo se lleva cabo en cuatro etapas²¹: absorción, distribución, metabolismo y excreción (figura 2.24).

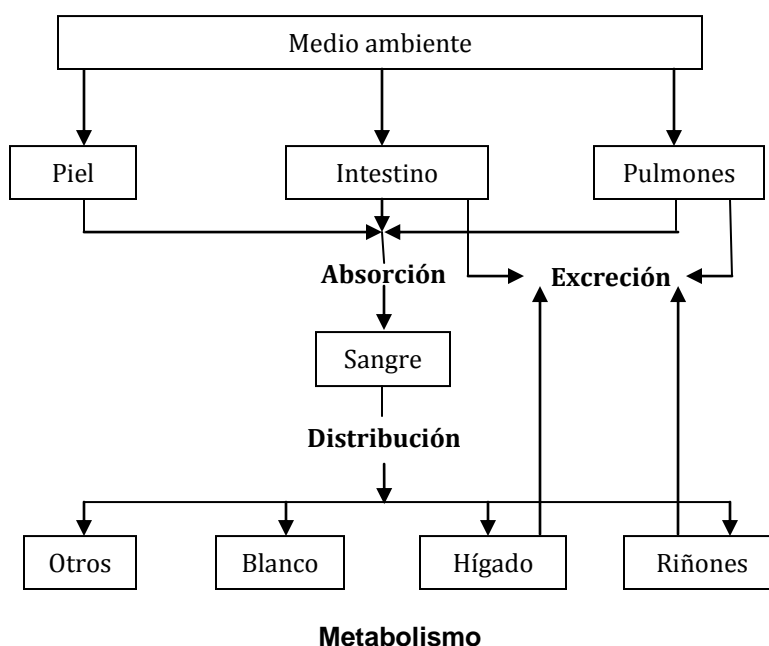


Figura 2.24. Proceso de transporte y transformación de las sustancias tóxicas en el cuerpo.

La absorción, es el proceso en el que el compuesto tóxico atraviesa las membranas y células hasta llegar al torrente sanguíneo, las principales vías de exposición son la ingestión, la inhalación y la absorción cutánea.

²¹ Universidad de Arizona. Evaluación de riesgos y restauración ambiental. USA. 2001.

La distribución, implica la localización y concentración de los compuestos tóxicos en los diferentes tejidos del cuerpo.

El metabolismo, es el mecanismo mediante el cual se reduce la posibilidad de que una sustancia tóxica cause daño en los órganos del cuerpo. Mediante la biotransformación y la desintoxicación se incrementa la solubilidad del tóxico en agua y se facilita su excreción.

El proceso de excreción, se lleva a cabo por los mecanismos que utiliza el organismo para excretar los desechos metabólicos endógenos, las principales vías de excreción son la orina, las heces, y el aire exhalado.

2.6.2 Valoración de los efectos adversos a la salud

Para establecer el nivel de concentración en el cual una sustancia se considera tóxica en los seres humanos, se llevan a cabo estudios que permiten calcular los niveles tóxicos críticos de las sustancias químicas, estos estudios se llevan a cabo en humanos o en animales.

Los estudios en humanos, constituyen el valor de comparación ideal para identificar los niveles tóxicos, pero no es ético exponerlos a sustancias que se sabe o se cree que son nocivas, por lo que la mayoría de los datos en humanos se recogen después de los hechos y los conforman estudio clínicos, o informes de casos de personas expuestas o investigaciones epidemiológicas controladas de poblaciones expuestas.

Los estudios con animales, se basan en diseños experimentales y posteriormente en diseños de observación, situación que permite a los investigadores tener un control sobre las condiciones de exposición de la población expuesta y la población empleada como grupo de control. Los estudios con animales implican tres extrapolaciones problemáticas: del animal al ser humano, del laboratorio a la vida real y de una dosis alta a una dosis baja, situación que no garantiza que los datos obtenidos sean válidos para humanos en el mundo real. Los estudios con animales se pueden clasificar en cuatro categorías²², cada una de ellas con usos específicos:

²²Air Pollution Training Institute (2003). Op., cit., p. 4.8.

1. *Estudios de corto plazo.* También se les llama estudios de toxicidad aguda, porque se basan en los efectos tóxicos producidos por una sola exposición a determinadas sustancias, con este tipo de estudios se calcula la dosis letal media (LD50) de sustancias no cancerígenas, siendo esta concentración, letal para la mitad de la población expuesta.
2. *Estudios subcrónicos.* Implican la dosificación diaria durante varios días, semanas o meses y con este tipo de estudios se estima el valor umbral de los agentes no cancerígenos.
3. *Estudios crónicos.* Implican una dosificación diaria durante un periodo de vida, alrededor de dos años, este tipo de estudios se emplea para investigar el potencial cancerígeno de una sustancia.
4. *Estudios especiales.* Son pruebas que se realizan in vitro (fuera del organismo), son estudios más rápidos y menos costosos que los realizados con animales, pero tienen la desventaja que sus resultados son sólo indiciarios y no concluyentes.

2.6.3 Niveles críticos de las sustancias tóxicas.

Entre las dosis críticas²³ de sustancias químicas para los no cancerígenos se encuentran las siguientes:

1. *Valor umbral.* Es la dosis mínima efectiva de cualquier producto químico que provoca una respuesta.
2. Dosis letal media, DL_{50} .
3. Nivel de efectos no observables, NOEL (No observable effect level).
4. Nivel de efectos Adversos no observables, NOAEL (No Observed Adverse Effect Level).
5. Nivel Mínimo de efectos observables, LOEL (Lowest Observable Effect Level).
6. Nivel mínimo de efectos adversos observables, LOAEL (Lowest Observed Adverse Effect Level).

²³ Ibid. p.4.10.

Por precaución y seguridad se emplea el NOEL como una aproximación conservadora al umbral y así determinar los niveles seguros de exposición. Para el caso de los cancerígenos se ha establecido que no existe valor umbral seguro incluso a niveles moleculares de dosificación.

2.6.4 Índices de riesgo cancerígeno

Los índices de riesgo cancerígeno²⁴ son sistemas para clasificar los contaminantes tóxicos del aire según los niveles de riesgo, entre los más comunes se encuentran los siguientes:

El grupo de evaluación cancerígena (Carcinogenic Assessment Group), emplea lo que llaman factor de riesgo unitario, que es el riesgo asociado a 70 años de exposición a un microgramo de una sustancia por metro cúbico de aire, se dice que en general, si una o menos de una muerte en un millón de personas ocurre, esta medición se considera no preocupante.

La Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (International Agency of Research and Cancer, IARC) creó el siguiente esquema para clasificar los cancerígenos.

1. Categoría 1: cancerígenos para humanos con suficiente evidencia epidemiológica.
2. Categoría 2A: probablemente cancerígenos con evidencia limitada para humanos.
3. Categoría 2B: probablemente cancerígenos sin evidencia para humanos.
4. Categoría 3: evidencia suficiente de cáncer obtenida de animales de laboratorio.

La EPA, clasifica el potencial cancerígeno de las sustancias de la manera siguiente:

²⁴ Ibid., p. 4.11

1. Grupo A: cancerígenos en humanos, con evidencia suficiente de estudios epidemiológicos.
2. Grupo B1: probables cancerígenos en humanos con evidencia limitada de estudios epidemiológicos.
3. Probables cancerígenos en humanos con evidencia de estudios en animales.
4. Grupo C: probables cancerígenos en humanos evidencia limitada en animales.
5. Grupo D: no clasificados por los datos imprecisos en humanos y animales.
6. Grupo E: sin evidencia cancerígena, obtenida de estudios en animales de diferente especie, o por la exposición en humanos.

2.7 Análisis de riesgos.

2.7.1 Riesgo.

El riesgo²⁵ define la probabilidad de que en una situación dada, una sustancia peligrosa produzca un daño. Para que exista un riesgo, es necesario que se esté expuesto a una sustancia y que esta exposición represente un peligro para la salud, si alguna de estas dos condiciones no existe, entonces no hay riesgo.

$$Riesgo = f(Exposición, Peligro)$$

En el campo de la salud y el medio ambiente, el riesgo se define como la probabilidad de que un individuo o una población presente mayor incidencia de efectos adversos por la exposición a un peligro. El riesgo se acostumbra expresar en términos cuantitativos de probabilidad, de este modo, existe riesgo, si se presenta un caso o más de cáncer en un millón de personas (10^6), el significado de un valor menor de un caso en un millón (10^6), se considera como no preocupante.

²⁵ Instituto Nacional de Ecología. Introducción al Análisis de Riesgos Ambientales. México. 2003, p. 13.

2.7.2 Evaluación del riesgo.

La evaluación del riesgo emplea datos y observaciones científicas con el fin de investigar los efectos a la salud o a los ecosistemas por la exposición a un peligro. En esta parte del análisis se intenta verificar; si existe un riesgo por la exposición a una sustancia peligrosa, investigar lo que se sabe de este riesgo y quiénes se pueden ver más afectados por la exposición al mismo. Para realizar la evaluación, se debe recurrir a la recolección de datos que relacionan una respuesta a una dosis, estos pueden combinarse con estimaciones de la exposición probable en humanos u otros organismos con lo que se obtiene una evaluación más completa del riesgo.

La evaluación de riesgos, es un trabajo multidisciplinario, que puede llegar a ser muy complejo, dependiendo del propósito final, puede ir desde un análisis muy simple efectuado mediante proyecciones generales, hasta evaluaciones detalladas que pueden durar años.

Los impactos por la exposición al riesgo, se pueden jerarquizar de acuerdo a su importancia, desde aspectos ecológicos negativos hasta efectos adversos a la salud, como puede ser el incremento en la morbilidad, daños reproductivos o neurológicos y el desarrollo de algún tipo de cáncer.

A pesar de las dificultades que implica la evaluación de riesgos, ésta se puede considerar un instrumento de gran valía en la toma de decisiones, pues está basada en los mejores métodos disponibles, logrando que los peligros más significativos sean atendidos mediante la aplicación de programas y acciones encaminadas a reducir los riesgos a costos razonables.

La evaluación de riesgos está conformada de las siguientes etapas²⁶: identificación del peligro, evaluación de la exposición, evaluación de la dosis-respuesta y la caracterización del riesgo, etapas que se relacionan entre sí como se muestra en la figura 2.25.

²⁶Ibíd., p. 17.

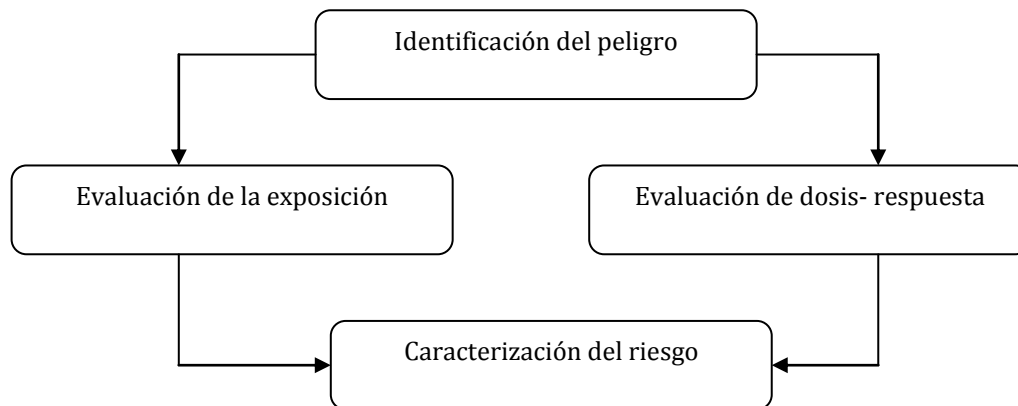


Figura 2.25 Etapas de una evaluación de riesgos.

2.7.2.1 Identificación del peligro.

La identificación del peligro²⁷ es el proceso mediante el cual se determina si un compuesto químico está vinculado con ciertos efectos a la salud, como pueden ser cáncer o defectos al desarrollo biológico en humanos. La identificación del peligro no contempla su cuantificación, sólo la revisión de los datos epidemiológicos y/o toxicológicos disponibles para determinar si la exposición a una sustancia química puede provocar efectos adversos a la salud.

2.7.2.2 Evaluación de la exposición.

La exposición²⁸ es el contacto de una sustancia con la piel, boca, fosas nasales o lesiones; mediante la evaluación de la exposición se puede medir o estimar la intensidad, frecuencia, ruta y duración de la exposición.

La evaluación de la exposición puede involucrar métodos indirectos y métodos directos. Los métodos directos, utilizan dispositivos de monitoreo personal que miden la exposición a la sustancia tóxica. Los métodos indirectos, combinan la información de las concentraciones ambientales del tóxico sobre los patrones de actividad de los grupos humanos de interés expuestos, esta combinación permite hacer una estimación de la exposición con la ayuda de un modelo matemático.

²⁷ *Ibíd.*, p. 21.

²⁸ *Ibíd.*, p. 32

La exposición es una función del tiempo y dependiendo de que el efecto a la salud sea crónico o agudo, se puede estimar la exposición promedio. Para estimar la exposición, se utilizan datos como la dosis diaria promedio, ADD (Average Daily Dose), la dosis diaria promedio durante el tiempo de vida, LADD (Lifetime Average Daily Dose) o bien la ingestión crónica diaria, CDI (Chronic Daily Intake).

2.7.2.3 Evaluación de la dosis-respuesta

El objetivo fundamental de una evaluación dosis-respuesta²⁹ es obtener una relación matemática entre la cantidad de sustancia tóxica a la cual un humano está expuesto y el riesgo de desarrollar una respuesta negativa a esa dosis.

Para los compuestos no cancerígenos, la evaluación del riesgo consiste en determinar el nivel seguro de exposición para una población. Este umbral debe representar a los individuos más sensibles y con esto garantizar que toda la población esté adecuadamente protegida. Actualmente en Estados Unidos se han establecido niveles para la dosis más baja que puede causar efectos detectables. El LOAEL y el NOAEL, son los umbrales de referencia a nivel internacional para establecer diferentes estándares de seguridad como los niveles de exposición de referencia agudos y crónicos. Los estudios de dosis-respuesta para no cancerígenos, se orientan a buscar puntos finales de toxicidad, tales como: daño al hígado, riñones, sistemas: respiratorio, nervioso, reproductivo e inmunológico.

La evaluación de riesgo para cáncer, asume que los efectos de los posibles cancerígenos no presentan umbrales de seguridad, debido a que a cualquier nivel de exposición existe la probabilidad de desarrollar cáncer, razón por la que la evaluación de riesgo de cáncer, se orienta a determinar el riesgo de desarrollar éste debido a la exposición de un cierto contaminante durante el lapso de vida.

La evidencia de riesgo por cáncer derivada por la exposición a sustancias químicas incluye: evidencia epidemiológica, experimentos toxicológicos, estudios de mutagenicidad y análisis de actividad estructural, que por ahora, es la información con la que se cuenta, aun cuando en muchas ocasiones está limitada.

²⁹ *Ibíd.*, p.41.

2.7.2.4. Caracterización del riesgo

En esta última etapa, se suele integrar la información sobre la toxicidad obtenida de la evaluación de la dosis-respuesta y los datos resultantes de la exposición a la sustancia tóxica.

La función de la caracterización del riesgo³⁰ es determinar si la exposición a un contaminante cruza el límite de un umbral en el que hay un impacto y determinar si este riesgo representa una preocupación ambiental. Un método común para caracterizar el riesgo no cancerígeno es calcular los índices de riesgo.

Un método común para verificar si el umbral límite por la exposición de un contaminante ha sido rebasado, es mediante la estimación del riesgo de cáncer, que calcula el número de casos por millón que se pueden presentar por la exposición al contaminante.

³⁰ *Ibíd.*, p. 56.

3. METODOLOGÍA.

La metodología empleada en el presente trabajo es la propuesta por el Departamento de Evaluación de Riesgos a la Salud Ambiental, OEHHA³⁶ (Office of Environmental Health Hazard Assessment), de la Agencia de Protección Ambiental de California CEPA (California Environmental Protection Agency). Actualmente en México no existe procedimiento similar.

El estudio se aplicó a la central termoeléctrica de ciclo combinado El Sauz. La termoeléctrica se encuentra ubicada en las coordenadas geográficas 20° 27' 33" Latitud Norte y 100° 7' 16" Longitud Oeste en el Municipio de Pedro Escobedo (figura 2.1). La topografía de la zona se caracteriza por ser un valle alargado en dirección noroeste y sureste respecto de la central, situado entre estribaciones de la Sierra Madre Oriental y prominencias de la Sierra Madre Occidental. Hacia el lado este de la central se ubica el cerro de la Laja y de su lado oeste se encuentran cerros como La machorra, Cerro Gordo y Cerro de en Medio.

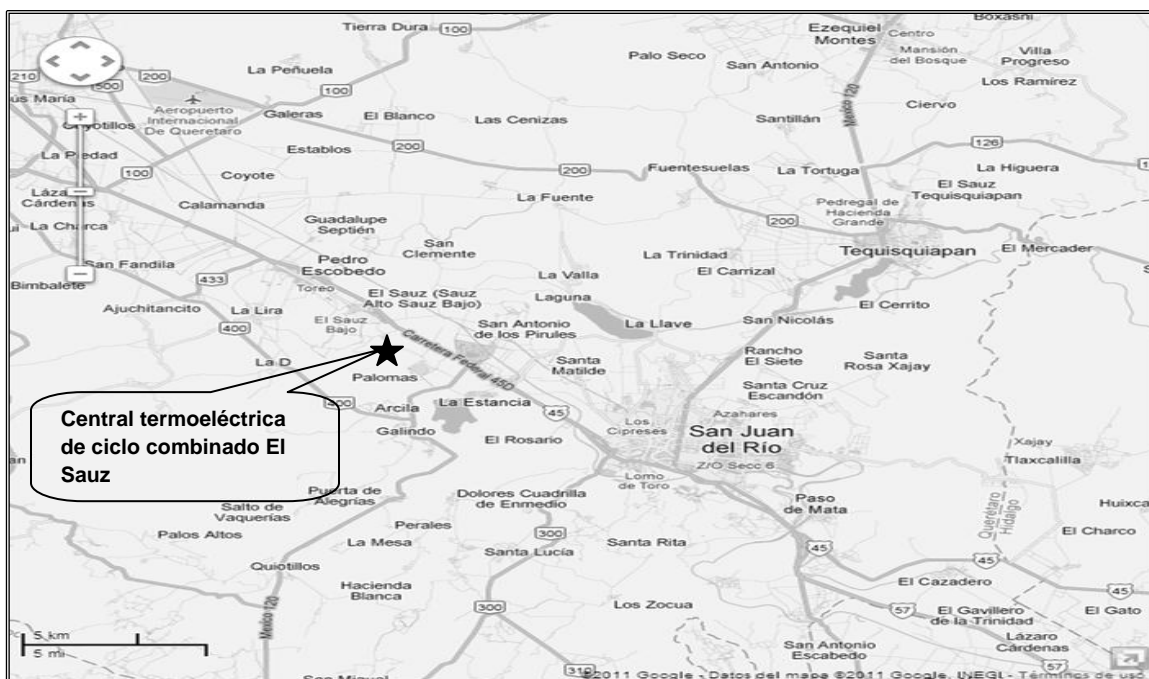


Figura 3.1 Ubicación de la central termoeléctrica de ciclo combinado El Sauz, Pedro Escobedo, Querétaro.

³⁶ California Environmental Protection Agency (2003). Op., cit.

La termoeléctrica opera desde hace 30 años y la conforman siete unidades generadoras de energía eléctrica. Las unidades 1, 2, 3, 5 y 6 en ciclo combinado (anexo 1), operan con los gases producto de la combustión del gas natural, la unidad 4 trabaja con el vapor de agua recuperado de las unidades 1, 2 y 3, por último la unidad 7 trabaja con el vapor de agua que se recupera de las unidades 5 y 6.

3.1 Identificación del peligro.

La identificación de los contaminantes peligrosos del aire generados por la termoeléctrica, se llevó a cabo mediante el empleo de las bases del documento: “Recopilación de los Factores de Emisión de Contaminantes” (AP-42; *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*³⁷), del capítulo referido a “Fuentes fijas de combustión interna”, que incluye las turbinas de gas estacionarias para producir energía eléctrica; por lo tanto los contaminantes peligrosos del aire para la termoeléctrica de ciclo combinado el Sauz se presentan en el cuadro 3.1. La termoeléctrica no cuenta con un control de este tipo de contaminantes. Los PAH’S incluyen al grupo de los hidrocarburos policíclicos aromáticos y el término xilenos incluye a los isómeros de este compuesto.

Cuadro 3.1. Contaminantes peligrosos del aire para una termoeléctrica de ciclo combinado.

- 1,3-Butadieno
- Acetaldehído
- Acroleína
- Benceno
- Etilbenceno
- Formaldehído
- Naftaleno
- PAH’s
- Oxipropileno
- Tolueno
- Xilenos

3.2 Modelo de dispersión del aire.

3.2.1 Inventario de emisiones.

En el inventario de emisiones se especifica la cantidad de contaminantes peligrosos del aire que son emitidos a la atmósfera, para estimarlos, se utilizó la ecuación 3.1.

³⁷ <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch03/index.html>.

$$T = P_E EF$$

Ec. 3.1

Donde: T = tasa de emisión.
 P_R = producción de energía eléctrica.
 EF = factor de emisión.

La termoeléctrica nos proporcionó los datos de producción de energía del año 2005 (cuadro 3.2), que corresponde a la producción de las unidades 1, 2, 3, 5 y 6, que son las que generan los gases de combustión que se vierten a la atmósfera.

Cuadro 3.2. Producción en MWh de energía eléctrica para el año 2005 de la central termoeléctrica de ciclo combinado el sauz.

Unidades	Producción
Unidad 1	161,557.1
Unidad 2	171,943.8
Unidad 3	189,761.8
Unidad 5	773,647.0
Unidad 6	711,061.4

Cuadro 3.3. Factores de emisión para una turbina que emplea gas natural como combustible.

CPA	Factor de emisión en lb/MMBTU
1,3-Butadieno	4.29 E-07
Acetaldehído	4.45 E-05
Acroleína	8.31 E-06
Benceno	1.03 E-04
Etilbenceno	2.58 E-05
Formaldehído	3.12 E-03
Naftaleno	1.37 E-06
PAH's	2.25 E-06
Oxipropileno	2.86 E-05
Tolueno	9.37 E-05
Xilenos	5.48 E-05

Los factores de emisión de los contaminantes peligrosos del aire³⁸ (cuadro 3.3) se consultaron en el capítulo para fuentes fijas de combustión interna del AP-42, para turbinas de gas estacionarias empleadas en la generación de energía eléctrica.

³⁸ Ibídem.

Los valores calculados de la tasa de emisión de cada unidad y por cada contaminante, se presentan en el cuadro 3.4.

Cuadro 3.4. Tasa de emisión en g/s por unidad generadora y para cada contaminante peligroso del aire.

	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 5	Unidad 6
Benceno (E-05)	9.5	10	11	46	42
Acroleína (E-05)	5.1	5.4	6.0	24	22
Acetaldehído (E-04)	3.2	3.4	3.7	15	14
Formaldehido (E-03)	5.6	6.0	6.6	27	25
Butadieno (E-06)	3.4	3.6	4.0	16	15
Etilbenceno (E-04)	2.5	2.7	3.0	12	11
Naftaleno (E-05)	1.0	1.1	1.2	4.9	4.5
PAH's (E-05)	1.7	1.9	2.0	8.4	7.7
Oxipropileno (E-04)	2.3	2.4	2.7	11	10
Tolueno (E-03)	1.0	1.1	1.2	4.9	4.5
Xileno (E-04)	5.1	5.4	6.0	24	22

3.2.2 Caracterización de la fuente.

La caracterización de la fuente tiene por finalidad determinar el tipo de fuente, delimitar la cantidad de ellas y tomar la decisión si se analizan como una sola representativa o cada una por separado. La termoeléctrica es una fuente puntual, cuenta con cinco chimeneas (una para cada unidad de ciclo combinado), las cuales se analizaron por separado para estimar la rapidez de emisión de los contaminantes peligrosos del aire.

3.2.3 Caracterización del terreno.

La caracterización se emplea para definir el tipo de terreno en el que se encuentra la fuente de emisión, éste puede ser rural o urbano, para definirlo se empleó el criterio de Auer³⁹, quien establece que si el porcentaje de terreno

³⁹ California Environmental Protection Agency (2003). Op., cit. p. 4.10.

empleado para uso urbano es mayor del 50% alrededor de 3 km de la fuente, el terreno se considera urbano y en sentido contrario rural. Aquí también se define la topografía del terreno en el que se encuentra la fuente, se contemplan dos tipos de terreno, simple (predominantemente plano) y terreno complejo (incluye valles y montañas). Las características anteriores permitieron definir el terreno en el que se encuentra la termoeléctrica como rural y predominantemente plano.

3.2.4 Exposición de la población.

Para determinar el total de la población expuesta a los contaminantes peligrosos del aire se requiere delimitar la zona de impacto, definida ésta como el área afectada por la emisiones alrededor de la fuente, donde los receptores son susceptibles a un potencial de riesgo de cáncer mayor a uno en un millón de casos, así como un índice de riesgo agudo o crónico por inhalación mayor de uno. La OEHHA⁴⁰ recomienda que la zona de impacto no sea mayor de 25 km alrededor de la fuente, por lo que dentro de esta zona se ubicó solo a las poblaciones más importantes como: El Sauz y La Estancia por su cercanía a la termoeléctrica, así como las ciudades de Pedro Escobedo, San Juan del Río y Tequisquiapan por la cantidad de habitantes.

3.2.5 Nivel de detalle del estudio.

El nivel de detalle se utiliza para definir el tipo de modelo a emplear en el estudio de dispersión de los contaminantes, éste puede ser de dos tipos; de sondeo y refinado, la EPA recomienda que se efectúe en primer lugar un estudio de sondeo y si la fuente presenta riesgos significativos entonces cambiar el nivel de estudio a un refinado, por lo que se siguió ésta última recomendación como criterio de elección de nivel de estudio.

El modelo de dispersión del aire permite conocer las concentraciones a nivel de piso de los contaminantes en estudio, el criterio de elección se sujeta a los modelos de dispersión recomendados por EPA, que se encuentran en el cuadro 3.5.

⁴⁰ Ibid., p. 4.14.

Cuadro 3.5 Modelos de dispersión del aire recomendados por EPA.

	Periodo promedio	Tipo de terreno	Fuente simple		Fuente múltiple	
			Rural	Urbano	Rural	Urbano
Refinado	Corto plazo (1 a 24 horas promedio)	Simple Simple	ISCST3	RAM ISCST3	ISCST3	RAM ISCST3
		Complejo	CTDMPLUS	CTDMPLUS	CTDMPLUS	CTDMPLUS
	Largo plazo (anual – mensual)	Simple Simple Simple	ISCST3 ISCLT3	ISCST3 ISCLT3 RAM	ISCST3 ISCLT3	ISCST3 ISCLT3 CDM20/RAM
		Complejo	CTDMPLUS	CTDMPLUS	CTDMPLUS	CTDMPLUS
Sondeo	Corto plazo (1 a 24 horas promedio)	Simple	SCREEN3	SCREEN3	SCREEN3	SCREEN3
		Complejo	ISCST3 RTDM STSCREEN VALLEY SCR N	SHORTZ STSCREEN VALLEY SCR N	ISCST3 STSCREEN VALLEY SCR N	SHORTZ STSCREEN VALLEY SCR N
		Complejo				
		Complejo				
	Complejo					
Largo plazo (anual – mensual)	Simple	SCREEN3	SCREEN3	SCREEN3	SCREEN3	
	Complejo Complejo	SCST3 RTDM	LONGZ	ISCST3	LONZ	

Los modelos de dispersión de sondeo se utilizan para determinar las concentraciones máximas que tienden a sobreestimar la exposición de la población, éste tipo de modelos se emplean cuando no se cuenta con los datos meteorológicos o éstos no son representativos; o bien, para generar un estimado preliminar y así determinar si es necesaria una evaluación más detallada. Entre los modelos de sondeo el SCREEN3 es el más utilizado debido a que es actualizado periódicamente, presenta un buen balance entre capacidad y facilidad de uso así como la flexibilidad de sus algoritmos, éste modelo asume las peores condiciones meteorológicas, lo que genera datos más conservadores (concentraciones más altas), se diseñó para simular una fuente simple y puede ser usado en fuentes puntuales, quemadores, fuentes de área y de volumen.

Los modelos refinados se diseñaron para determinar concentraciones más representativas comparadas con las de sondeo, éstos son más robustos y tienen la capacidad para alimentar en ellos condiciones meteorológicas específicas. El más empleado es el ISCST3 que es un modelo de pluma gaussiano en estado estacionario que se utiliza para encontrar concentraciones de contaminantes asociadas a una fuente industrial compleja, éste se puede usar para fuentes múltiples en terreno urbano o rural.

De acuerdo con el cuadro 3.5 el modelo de sondeo seleccionado fue SCREEN3, debido a que se realizó un estudio de las chimeneas por separado y el terreno en el que se encuentra la termoeléctrica es predominantemente plano, la versión utilizada del programa fue la 96043, utiliza un modelo de pluma gaussiano que incorpora factores relacionados a la fuente (termodinámicos, geométricos y topográficos) y factores meteorológicos (temperatura ambiental y velocidad del viento), para calcular la concentración de contaminantes de fuentes continuas. El modelo asume que el contaminante no experimenta ninguna reacción química y que ningún otro proceso de remoción (deposición húmeda o seca) actúa sobre la pluma durante su transportación. Emplea un algoritmo de integración numérica para examinar un rango de clases de estabilidad y velocidades del viento y así identificar el escenario más adverso de condiciones meteorológicas, la combinación de velocidad del viento y estabilidad da como resultado concentraciones máximas a nivel de piso.

En la ejecución del programa se alimentó la siguiente información:

- Tasa de emisión del contaminante peligroso del aire (g/s).
- Altura de la chimenea (m).
- Diámetro interior de la chimenea (m).
- Velocidad de salida de los gases de la chimenea (m/s).
- Temperatura de los gases de la chimenea (°K).
- Una temperatura ambiente (291.15 °K).
- La altura de receptor sobre el nivel del piso, 0 (m).
- Terreno rural.

- Se eligió la opción de meteorología completa por no contar con datos meteorológicos de la zona de estudio.
- La opción de caída de flujos no se consideró debido a que no existen construcciones alrededor de la fuente.
- Se eligió la opción de terreno simple plano.
- Se eligió opción de distancias automáticas hasta los 30 Km y posteriormente a distancias discretas de la termoeléctrica a cada una de las localidades de la zona de impacto.
- No se eligió la opción de fumigación, pues no hay grandes cuerpos de agua a 3 Km alrededor de la Termoeléctrica.

La termoeléctrica nos proporcionó las características geométricas de las chimeneas y las propiedades termodinámicas de los gases de salida de cada una de ellas (cuadro 3.6).

Cuadro 3.6. Características geométricas de las chimeneas y propiedades termodinámicas de los gases de salida.

	Diámetro de la chimenea (m)	Altura de la chimenea (m)	Velocidad de los gases de salida (m/s)	Temperatura de los gases de salida (°C)
Unidad 1	4	22	11.438	177.95
Unidad 2	4	22	10.406	179.47
Unidad 3	4	22	10.363	174.26
Unidad 5	6.24	55	9.396	291.55
Unidad 6	6.24	55	10.594	214.12

Los datos de salida proporcionaron la concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) máxima a nivel de piso en las localidades de El Sauz, Pedro Escobedo, La Estancia, San Juan del Rio y Tequisquiapan. Las distancias de la fuente a las localidades de interés se estimaron con ayuda del mapa digital de México versión 5.0 de INEGI⁴¹. Para cuantificar el impacto de las emisiones de las cinco chimeneas en un punto en

⁴¹ <http://gaia.inegi.org.mx/mdm5/viewer.html>

particular, se supuso que éstas se encuentran a la misma distancia del mismo y por tanto el impacto global es la suma de la contribución de cada una de ellas (cuadro 3.7).

Cuadro 3.7. Concentraciones máximas a nivel de piso en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en cinco puntos distintos a partir de la fuente de emisión.

Localidad (Distancia m)	El Sauz (2,500)	Pedro Escobedo (5,000)	La Estancia (7,000)	San Juan del Rio (15000)	Tequisquiapan (22000)
Benceno (E-02)	3.12	2.36	2.26	2.20	2.09
Acetaldehído (E-03)	10.4	7.86	7.56	7.36	6.97
1,3- Butadieno (E-03)	6.68	5.04	4.84	4.72	4.47
Formaldehído (E-01)	3.89	2.94	2.82	2.75	2.60
Oxipropileno (E-03)	9.95	7.52	7.25	7.07	6.68
Acroleína (E-04)	4.28	3.23	3.11	3.03	2.87
Tolueno (E-03)	8.66	6.54	6.28	6.11	5.79
Xilenos (E-03)	4.28	3.23	3.11	3.03	2.87
Etilbenceno (E-03)	2.13	1.61	1.55	1.51	1.43
Naftaleno (E-05)	8.66	6.54	6.28	6.11	5.79
PAH's (E-04)	1.48	1.12	1,07	1.04	0.99

3.3 Evaluación de la exposición.

3.3.1 Estimación de la dosis.

La evaluación de la exposición consiste en estimar la dosis diaria promedio durante el periodo de vida, LADD (Lifetime Average Daily Dose) y se emplea para evaluar la dosis respuesta para efectos cancerígenos. De acuerdo con información publicada por la OEHHA, los contaminantes peligrosos del aire de la termoeléctrica que pueden contribuir a un efecto cancerígeno a la salud⁴² son: el benceno, acetaldehído, 1,3-butadieno, formaldehído y el oxipropileno, que se encuentran en

⁴² California Environmental Protection Agency (2003). Op., cit., Appendix L Table 1.

estado gaseoso, por lo que la estimación del LADD solo contempla la dosis por inhalación y se calculó con la ecuación 3.2.

$$LADD = \frac{\{(C_{Aire})(DBR)(A)(EF)(ED)(10^6)\}}{AT} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde: LADD = la dosis por inhalación (mg/kg/d)
 10^6 = factor de conversión de microgramos a miligramos y la conversión de litros a metros cúbicos.
 C_{Aire} = concentración del aire a nivel de piso en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (cuadro 3.7).
 DBR = velocidad de respiración diaria, para 70 años 393 L/peso del cuerpo kg-d).
 A = factor de absorción por inhalación, 1.
 EF = frecuencia de exposición 360 d/año.
 ED = tiempo de exposición 70 años.
 AT = promedio del periodo de tiempo durante el cual se promedia la exposición, 25550 días.

Los valores recomendados por OEHHA para algunos de los parámetros⁴³ anteriores son: EF= 360 d/año, ED= 9, 30 o 70 años, AT= 25, 550 días, A = 1, para el DBR a 9, 30 y 70 años así como para trabajadores en planta se consulta el cuadro 3.8.

Cuadro 3.8. Valores recomendados de velocidad de respiración diaria en L/peso del cuerpo kg-d.

Duración de la exposición	Promedio	Valor más alto
9 años	452	581
30 y 70 años	271	393
Trabajadores en planta	149	149

Los resultados de la dosis diaria promedio durante el periodo de vida (Dosis por inhalación), se presentan en el cuadro 3.9.

⁴³ Ibid., p.5-16

Cuadro 3.9. Dosis por inhalación en mg/kg/día de los cinco contaminantes peligrosos del aire que pueden causar efectos cancerígenos a la salud en las localidades dentro de la zona de impacto.

	Benceno (E-07)	Acetaldehído (E-07)	1,3-Butadieno (E-09)	Formaldehído (E-05)	Oxipropileno (E-07)
El Sauz	3.12	10.40	11.10	1.85	7.65
Pedro Escobedo	2.36	7.86	8.40	1.40	5.78
La Estancia	2.26	7.56	8.07	1.34	5.58
San Juan del Rio	2.20	7.36	7.86	1.31	5.44
Tequisquiapan	2.09	6.97	7.45	1.24	5.14

3.4 Evaluación de la dosis-respuesta para efectos cancerígenos.

La evaluación de ésta dosis, describe para efectos cancerígenos la relación cuantitativa entre la cantidad de exposición a una sustancia (dosis) y la aparición de lesiones (respuesta). El riesgo potencial de cáncer por inhalación, RC (Risk of Cancer), expresa el número de casos por millón de habitantes y para cada localidad se estimó mediante la siguiente ecuación:

$$RC = \sum_{I=1}^n [(LADD)(CPF)][10^6] \quad \text{Ec. 3.3}$$

Donde: LADD = dosis por inhalación (mg/kg/d)

CPF = factor potencial de cáncer (mg/kg/d)⁻¹

Cuadro 3.10. Factores potenciales de cáncer en (mg/kg/día)⁻¹ de los CPA que pueden causar efectos cancerígenos a la salud identificados para la termoeléctrica.

	Factor potencial de cáncer
Benceno	1.0E-01
Acetaldehído	1.0E-02
1,3-Butadieno	6.0E-01
Formaldehído	2.1E-02
Oxipropileno	1.3E-02

Así mismo, la tabla 3.11 presenta los riesgos de cáncer por inhalación estimados para los habitantes de las poblaciones analizadas dentro de la zona de impacto.

El factor potencial de cáncer, CPF (Cancer Potency Factor), describe el riesgo potencial de desarrollar cáncer por unidad de dosis media diaria durante el tiempo de vida a (70 años), sus valores han sido determinados por la OEHHA⁴⁴ y para los contaminantes peligrosos del aire de la termoeléctrica se presentan en la tabla 3.10.

Cuadro 3.11 Riesgo de cáncer en casos por millón de habitantes en localidades ubicadas dentro de la zona de impacto de la termoeléctrica.

Población	Riesgo de cáncer por inhalación
El Sauz	0.45
Pedro Escobedo	0.34
La Estancia	0.32
San Juan del Rio	0.32
Tequisquiapan	0.30

3.5 Evaluación de la dosis-respuesta para efectos no cancerígenos.

La evaluación de la dosis-respuesta para no cancerígenos, describe la relación cuantitativa entre la cantidad de exposición a la sustancia (dosis) y la ocurrencia de un impacto adverso a la salud (respuesta). Para efectos no cancerígenos, se cuantifica con los índices de riesgo agudo y crónico.

⁴⁴ Ibid., Appendix L Table 1.

3.5.1 Índice de riesgo agudo.

Con el empleo de la información publicada por la OEHHA⁴⁵: el benceno, formaldehído, oxipropileno, acroleína, toluenos y los xilenos pueden causar efectos agudos a la salud sobre los sistemas: hematológico, inmunológico, reproductivo, nervioso, respiratorio, ojos y efectos al crecimiento, como se muestra el cuadro 3.12.

Cuadro 3.12. Sistemas del organismo que pueden sufrir daño agudo por la exposición de los contaminantes peligrosos del aire.

CPA	Efectos al crecimiento	Sistema hematológico	Sistema inmunológico	Sistema reproductivo	Sistema Nervioso	Sistema respiratorio	Ojos
Benceno	X	X	X	X			
Formaldehído			X			X	X
Oxipropileno	X			X		X	X
Acroleína						X	X
Tolueno	X			X	X	X	X
Xilenos						X	X

El índice de riesgo agudo, HI_{agudo} (Acute Hazard Index) se calculó a partir de los coeficientes de riesgo agudos, HQ_{agudo} (Acute Hazard Quotient), de cada uno de los contaminantes peligrosos del aire, mediante la siguiente expresión:

$$HI_{agudo} = \sum_{i=1}^n HQ_{agudo} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Si este índice es mayor a uno, hay indicio de un impacto potencial adverso agudo para la salud de los receptores en ese punto de localización.

⁴⁵ Ibid., Appendix L. Table 2.

Los coeficientes de riesgo agudo cuantifican el peligro a que son expuestos los órganos del cuerpo cuando éstos son alcanzados por uno o más contaminantes peligrosos del aire se calcularon mediante la siguiente expresión:

$$HQ_{\text{agudo}} = \frac{C_{\text{max}}}{REL_{\text{agudo}}} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Donde:

C_{max} = concentración máxima de cada CPA en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

REL_{agudo} = nivel de referencia agudo de cada CPA en $\text{m}^3/\mu\text{g}$.

La OEHHA, desarrolló los valores de los niveles de referencia agudos⁴⁶, REL_{agudo} (Referense Exposure Level Acute) para evaluar los impactos potenciales no cancerígenos a la salud de los contaminantes peligrosos del aire. El REL_{agudo} se refiere a una exposición que probablemente no causa efectos adversos a la salud en una población humana, muchos de ellos están basados en ligeros efectos adversos, tales como irritación en ojos, nariz y garganta, efectos que desaparecen después de la exposición.

El cuadro 3.13 presenta los niveles de referencia agudos de los contaminantes peligrosos del aire de la termoeléctrica susceptibles de causar efectos a la salud en humanos.

Cuadro 3.13. Niveles de referencia agudos en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para los contaminantes peligrosos del aire de la termoeléctrica El Sauz.

Benceno	Formaldehído	Oxipropileno	Acroleína	Tolueno	Xilenos
1,300	94	3,100	0.19	37,000	22,000

⁴⁶ Ibídem.

El cuadro 3.14 presenta los coeficientes de riesgo agudo de cada uno de los sistemas del organismo en las localidades ubicadas dentro de la zona de impacto.

Cuadro 3.14. Coeficientes de riesgo agudos para los distintos sistemas del organismo en cada una de las localidades de la zona de impacto.

Población	Efectos al Crecimiento (E-05)	Sistema hematológico (E-05)	Sistema inmunológico (E-03)	Sistema reproductivo (E-05)	Sistema Nervioso (E-07)	Sistema respiratorio (E-03)	Ojos (E-03)
El Sauz	2.7	2.4	4.2	2.7	2.3	6.4	6.4
Pedro Escobedo	2.1	1.8	3.2	2.1	1.8	4.8	4.8
La Estancia	2.0	1.7	3.0	2.0	1.7	4.6	4.6
San Juan del Rio	1.9	1.7	2.9	1.9	1.7	4.5	4.5
Tequisquiapan	1.8	1.6	2.8	1.8	1.6	4.3	4.3

Así mismo el cuadro 3.15 presenta los resultados de los índices de riesgo agudo para los habitantes de las localidades analizadas dentro de la zona de impacto.

Cuadro 3.15. Índices de riesgo agudos en las cinco localidades elegidas dentro de la zona de impacto.

Población	HI _{Agudos}
El Sauz	0.029
Pedro Escobedo	0.017
La Estancia	0.013
San Juan del Rio	0.013
Tequisquiapan	0.012

3.5.2 Índice de riesgo crónico.

Con el empleo de la información publicada por la OEHHA⁴⁷: con excepción de los hidrocarburos policíclicos aromáticos, todos los contaminantes peligrosos del aire de la termoeléctrica, son susceptibles de causar efectos crónicos a la salud, como se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 3.16. Sistemas del organismo que pueden sufrir daño crónico por la exposición de los contaminantes peligrosos del aire.

	Sistema digestivo	Efectos al crecimiento	Sistema endocrino	Ojos	Sistema hematológico	Riñones	Sistema nervioso	Sistema reproductor	Sistema respiratorio
Benceno		x			x		x		
Acetaldehído									x
1,3- Butadieno								x	
Formaldehído				x					x
Oxipropileno									x
Acroleína				x					x
Tolueno		x					x		x
Xilenos							x		x
Etilbenceno	x	x	x			x			x
Naftaleno									x

El índice de riesgo crónico, $HI_{crónico}$ (Chronic Hazard Index), se calculó a partir de los coeficientes de riesgo crónicos, $HQ_{crónicos}$ (Chronic Hazard Quotient), de cada uno de los contaminantes del aire, mediante la siguiente expresión:

$$HI_{cronico} = \sum_{i=1}^n HQ_{cronico} \quad \text{Ec. 3.6}$$

⁴⁷ Ibid., Appendix L. Table 3.

Un índice de riesgo crónico mayor a uno (1), indica que hay un impacto potencial adverso crónico para la salud del receptor en ese punto de localización.

Los coeficientes de riesgo crónico cuantifican el peligro a que son expuestos los órganos del cuerpo cuando éstos son alcanzados por uno o más contaminantes peligrosos del aire y se calcularon mediante la siguiente ecuación:

$$HQ_{\text{crónico}} = \frac{C_{\text{max}}}{REL_{\text{crónico}}} \quad \text{Ec. 3.7}$$

Donde:

C_{max} = concentración máxima de cada CPA en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

$REL_{\text{crónico}}$ = es el nivel de referencia crónico de cada CPA en $\text{m}^3/\mu\text{g}$.

La OEHHA también ha desarrollado los niveles de referencia crónicos⁴⁸, $REL_{\text{crónico}}$ (Referense Exposure Level Chronic), para evaluar los impactos no cancerígenos a la salud debido a una exposición prolongada. El $REL_{\text{crónico}}$ representa una concentración bajo la cual no se presentan efectos adversos a la salud. El término prolongado se refiere a un periodo de exposición del 12% del tiempo de vida (70 años), aproximadamente 8 años para humanos.

El cuadro 3.17 presenta los niveles de referencia crónicos de los contaminantes peligrosos del aire de la termoeléctrica susceptibles de causar efectos a la salud en humanos.

Cuadro 3.17. Niveles de referencia crónico en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para los contaminantes peligrosos del aire de la termoeléctrica el Sauz.

Benceno	Acetaldehído	1,3-Butadieno	Formaldehído	Oxipropileno
60	9	20	3	30
Acroleína	Tolueno	Xilenos	Etilbenceno	Naftaleno
600	300	700	2000	9

⁴⁸ Ibidem.

El cuadro 3.18 presenta los coeficientes de riesgo crónico de cada uno de los sistemas del organismo en las localidades ubicadas dentro de la zona de impacto.

Cuadro 3.18. Coeficientes de riesgo crónicos para los sistemas del organismo en cada una de las localidades elegidas de la zona de impacto.

	El Sauz	Pedro Escobedo	La Estancia	San Juan del Rio	Tequisquiapan
Sistema Digestivo (E-07)	11.0	8.1	7.8	7.6	7.2
Efectos al Crecimiento (E-04)	5.5	4.2	4.0	3.9	3.7
Sistema endocrino (E-07)	11	8.1	7.8	7.6	7.2
Ojos (E-02)	13	9.8	9.4	9.2	8.7
Sistema Hematológico (E-04)	5.2	3.9	3.8	3.7	3.5
Riñones (E-07)	11	8.1	7.8	7.6	7.2
Sistema nerviosos (E-04)	5.6	4.2	4.0	3.9	3.7
Sistema reproductor (E-04)	3.3	2.5	2.4	2.4	2.2
Sistema respiratorio (E-02)	13	9.9	9.5	9.3	8.8

El cuadro 3.19, presenta los índices de riesgo crónico para los habitantes en la zona de impacto.

Cuadro 3.19. Índices de riesgo agudos en las cinco localidades elegidas dentro de la zona de impacto.

	HI _{crónico}
El Sauz	0.26
Pedro Escobedo	0.20
La Estancia	0.19
San Juan del Rio	0.19
Tequisquiapan	0.18

3.6 Caracterización del riesgo.

En esta etapa, la información generada en la evaluación de la exposición se combina con la evaluación de la dosis-respuesta para cuantificar el riesgo de cáncer y los impactos no cancerígenos a la salud, esta información debe presentarse en textos, tablas, gráficas y/o mapas.

4. RESULTADOS.

La evaluación de riesgos a la salud por exposición a los contaminantes producidos por la combustión de gas natural en la termoeléctrica El Sauz, a los habitantes de las poblaciones de Pedro Escobedo, La Estancia, San Juan del Rio y Tequisquiapan, arrojó los siguientes resultados:

Se encontró, que el benceno, acetaldehído, 1,3-butadieno, formaldehído y el oxipropileno son los contaminantes capaces de favorecer el desarrollo de cáncer por inhalación en la población de esas localidades. La posibilidad de desarrollar cáncer por inhalación se cuantificó mediante el cálculo del riesgo de cáncer unitario y los resultados se muestran en la figura 4.1.

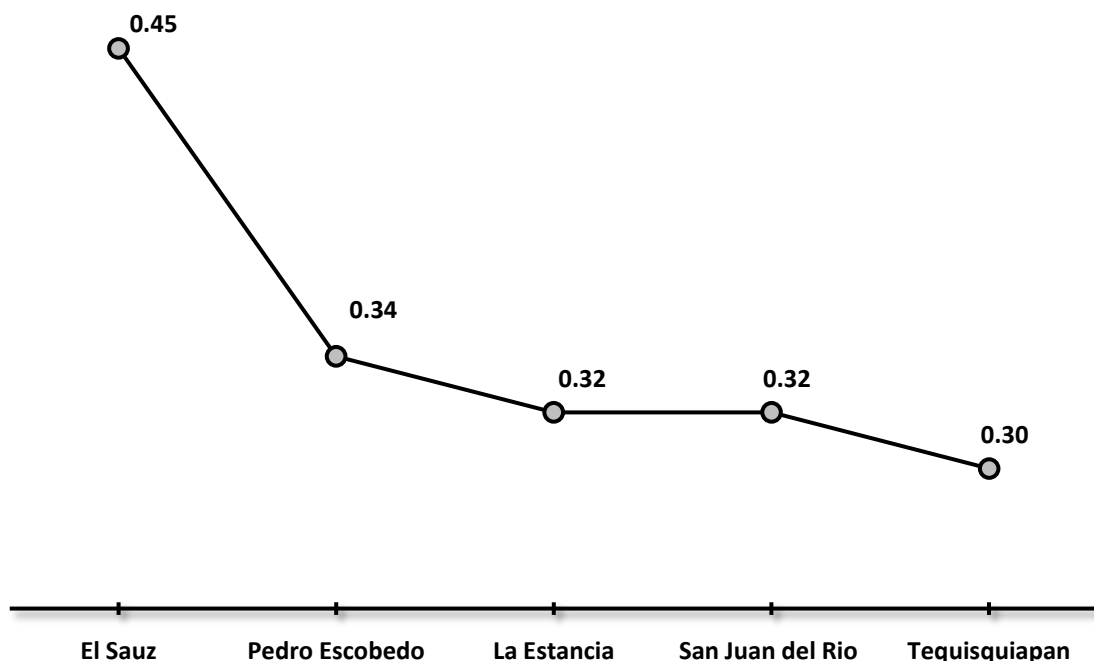


Figura 4.1 Casos de cáncer por millón de habitantes en localidades ubicadas dentro la zona de impacto de la termoeléctrica.

Así mismo, se encontró que el benceno, formaldehído, oxipropileno, acroleína, tolueno y los xilenos, son capaces de causar efectos agudos a la salud de los sistemas respiratorio, reproductivo, nervioso, inmunológico, hematológico, ojos y efectos al crecimiento. Los índices de riesgo agudo que cuantifican dichos efectos, se presentan en la figura 4.2.

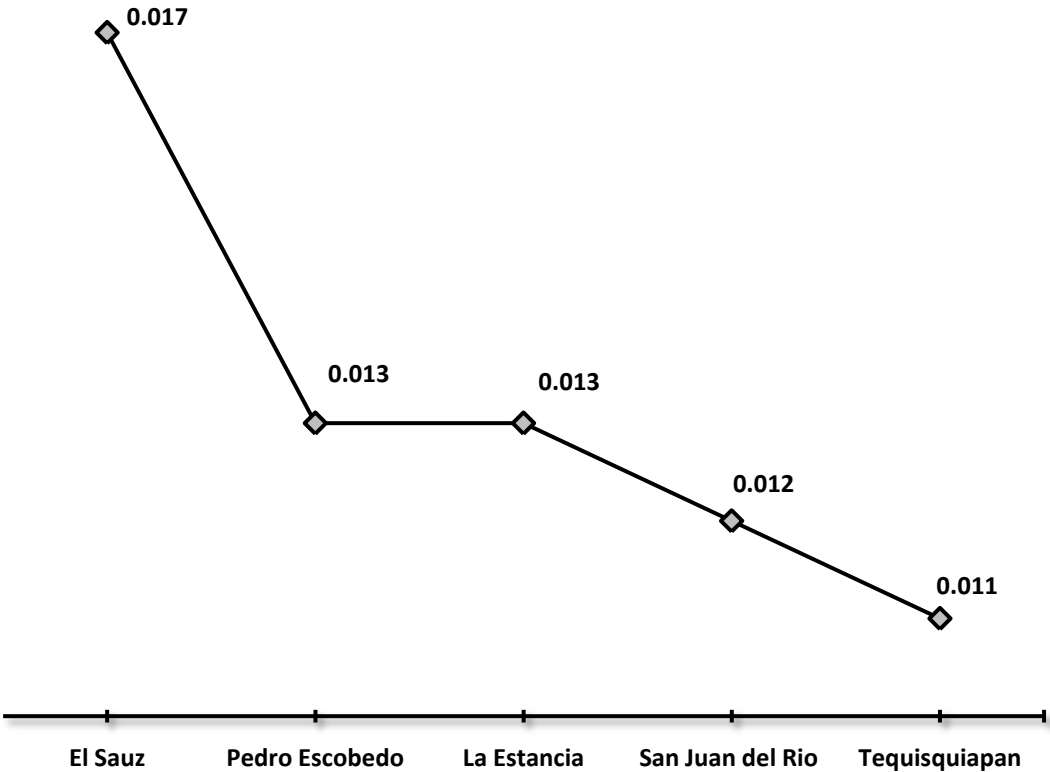


Figura 4.2 Índices de riesgo agudo en localidades ubicadas dentro del área de impacto de la termoeléctrica.

También se encontró que el benceno, acetaldehído, 1,3- butadieno, formaldehído, oxipropileno, acroleína, tolueno, etilbenceno, naftaleno y los xilenos, son los contaminantes capaces de causar efectos crónicos a la salud de los sistemas digestivo, endocrino, hematológico, nervioso, reproductivo, y respiratorio, así como

efectos al crecimiento, ojos y riñones. Los índices de riesgo crónico que cuantifican dichos efectos, se presentan en la figura 4.3.

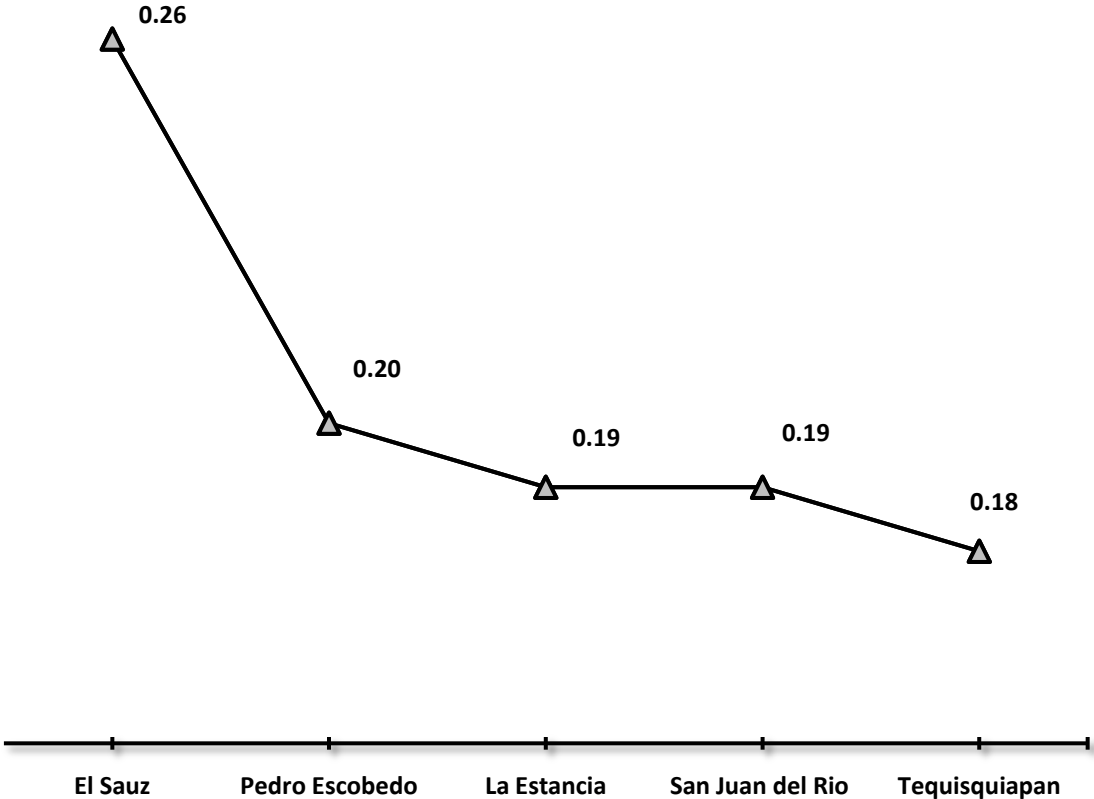


Figura 4.3 Índices de riesgo crónico en localidades ubicadas dentro del área de impacto de la termoeléctrica.

Por último, se identificó al grupo de los hidrocarburos policíclicos aromáticos como uno de los once contaminantes peligrosos del aire de la termoeléctrica, sin embargo su efecto en los indicadores arriba citados no se cuantificó debido a que la OEHHA no reporta para este grupo los niveles de referencia agudo y crónico así como tampoco el factor potencial de cáncer.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Una vez finalizada la evaluación de riesgos a la salud humana por la exposición de la población a los contaminantes peligrosos del aire generados por la central termoeléctrica de ciclo combinado El Sauz, se pueden hacer las siguientes conclusiones:

1. El riesgo de cáncer de mayor valor encontrado se localizó en la comunidad del Sauz y se estimó en 0.45 casos por millón de habitantes, EPA establece que un riesgo de cáncer es significativo cuando se estima en un valor igual o mayor a un caso en un millón de habitantes; el riesgo de cáncer para este estudio en particular está por debajo del límite establecido, por lo que se puede considerar no significativo.
2. El índice de riesgo agudo más alto encontrado se ubicó en la comunidad de El Sauz, su valor se estimó en 0.017, EPA establece que los índices de riesgo agudos menores a la unidad se pueden considerar seguros para la salud en humanos, por tanto, para este caso en particular se puede afirmar que los efectos agudos a la salud de la población no son significativos.
3. El índice de riesgo crónico de mayor valor se encontró también en la comunidad El Sauz y se estimó en 0.26, la recomendación de EPA igualmente establece que los índices de riesgo crónico con valor menor a uno se pueden considerar seguros para la salud humana, por lo que los efectos crónicos a la salud de la población en estudio no son significativos.
4. A partir de los tres indicadores de riesgo anteriores, cuyos valores se determinaron por debajo de límite establecido, se puede concluir que el riesgo a la salud de los habitantes de la zona en estudio por la exposición a los contaminantes peligrosos del aire provenientes de la termoeléctrica, no es significativo.
5. Así mismo se puede afirmar que con base en los resultados obtenidos, no es necesario emplear un modelo refinado para estimar las concentraciones

máximas a nivel de piso, toda vez que los tres indicadores citados en los resultados están por debajo del límite permitido.

Por último es importante también establecer las siguientes recomendaciones como resultado de este trabajo:

1. Los valores de los tres indicadores encontrados de ninguna manera se deben considerar absolutos ni definitivos, debido a que el cuerpo humano responde de distintas maneras en cada individuo.
2. Es importante tomar en cuenta que solo se evaluó los riesgos a la salud por los contaminantes peligrosos del aire que provienen de la termoeléctrica, por lo que es recomendable que en dado caso que se requiera saber cuáles son los riesgos a la salud por contaminantes peligrosos del aire en cualquiera de las comunidades citadas en este documento, se debe tomar en cuenta además la aportación de riesgos a la salud de otras fuentes emisoras como: los vehículos que circulan por la carretera México-Querétaro, empresas, hogares, talleres y negocios que emplean solventes o combustibles en su operación y la contaminación de fondo de la zona.
3. Es recomendable que en México se desarrolle una metodología propia para evaluar los riesgos a la salud, por exposición a los contaminantes peligrosos del aire que incluya entre otras cosas un listado de sustancias peligrosas, la generación y la obtención de los factores de emisión locales y una metodología para evaluar la incertidumbre de este tipo de estudios.

6. BIBLIOGRAFÍA.

1. California Environmental Protection Agency. The Air Toxics Hot Spots Program Guidance Manual for Preparation of Health Risk Assessments. United States of America. 2003.
2. California Environmental Protection Agency. Technical Support Document for Describing Available Cancer Potency Factors. United States of America. 2005.
3. Instituto Nacional de Ecología. Introducción al Análisis de Riesgos Ambientales. México. 2003.
4. Instituto Nacional de Ecología. Análisis de Riesgos Ambientales. México. 2004.
5. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología. Introducción al Análisis de Riesgos Ambientales. México. 2010.
6. Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. Inventario de Contaminantes Tóxicos del Aire en la ZMVM. México. 2006.
7. Asociación de Gobernadores del Oeste y el Comité Asesor Binacional. Técnicas Básicas de Estimación de Emisiones. Estados Unidos de América. 1996.
8. Air Pollution Training Institute. Basic Air Pollution Meteorology. United States of America. 2005.

9. Air Pollution Training Institute. Introduction to Air Pollution Toxicology. United States of America. 1993.
10. Air Pollution Training Institute. Introduction to Dispersion Modeling. United States of America. 1997.
11. U. S. Environmental Protection Agency. SCREEN3 Model User's Guide. United States of America. 1995.
12. Air Pollution Training Institute. Introduction to Risk Assessment/Risk Management for Hazardous Air Pollutants. United States of America. 1993.
13. Universidad de Arizona, Southwest Hazardous Waste Program. Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental. United States of America. 2001.
14. United States Environmental Protection Agency. Technology Transfer Network Clearinghouse for Inventories & Emissions Factors. United States of America. 11 de enero de 2012. <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>
15. United States Environmental Protection Agency. Air Pollution Control Orientation Course. United States of America. 16 de noviembre de 2011. <http://www.epa.gov/apti/course422/index.html>
16. Organización Mundial de la Salud. Curso de Autoinstrucción en Evaluación de Riesgos. Perú. 26 de Julio de 2011. <http://www.bvsde.paho.org/tutorial/>
17. Organización Mundial de la Salud. Curso de Autoinstrucción Evaluación del Riesgo Asociado a Contaminantes del Aire. Perú. 5 de agosto de 2011. http://www.bvsde.paho.org/cursoa_riesgoaire/

ANEXO 1.

Unidad en ciclo combinado de una termoeléctrica

Una unidad de ciclo combinado en una termoeléctrica, consiste básicamente en un grupo turbina a gas-generador, una caldera recuperadora de calor y un grupo turbina a vapor-generador, formando un sistema que permite producir electricidad.

El proceso de generación de energía eléctrica en una central de ciclo combinado es como a continuación se describe:

1. Comienza con la aspiración del aire exterior, siendo conducido al compresor de la turbina a gas a través de un filtro.
2. El aire es comprimido y combinado con el combustible atomizado (gas natural) en una cámara donde se realiza la combustión, el resultado es un flujo de gases calientes que al expandirse hacen girar la turbina a gas proporcionando el trabajo.

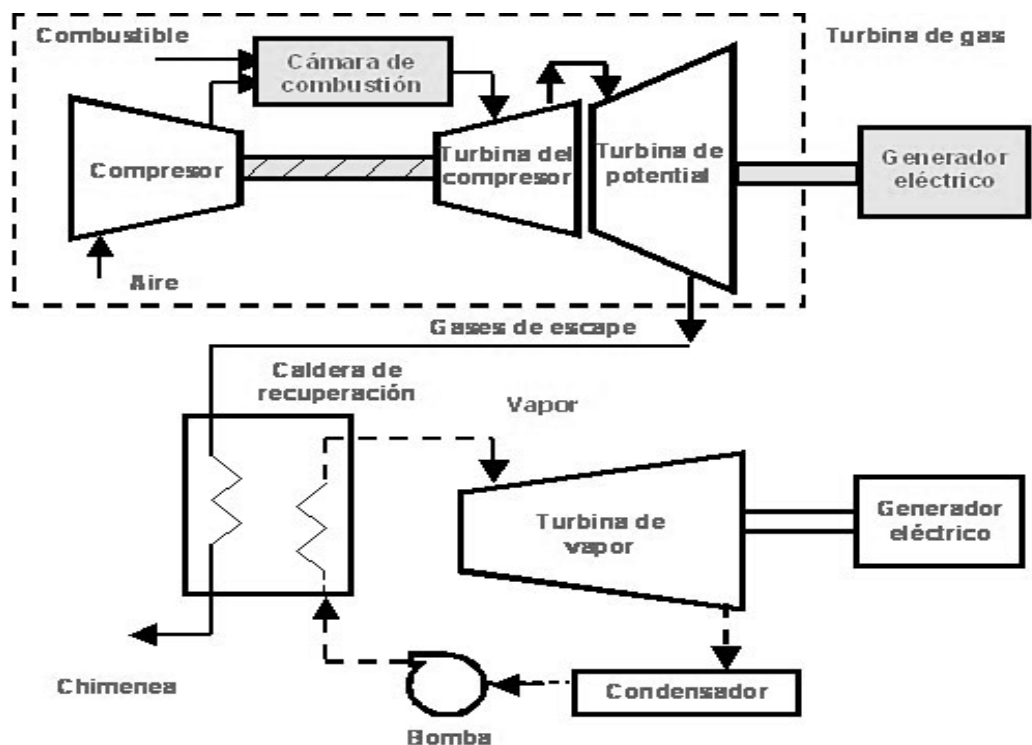


Figura A1. Unidad de ciclo combinado en una termoeléctrica

3. El generador acoplado a la turbina a gas transforma este trabajo en energía eléctrica.
4. Los gases de escape salen de la turbina a gas a través de un recuperador de calor, de donde se extrae la mayor parte de calor disponible en los gases de escape y se transmiten al ciclo agua-vapor antes de pasar a la atmósfera.
5. El vapor generado se hace llegar a las turbinas de vapor, donde su expansión mueve los alabes de la misma, generando trabajo y por el acoplamiento con un generador transforma este trabajo en energía eléctrica.