



Tesis de Maestría

Maestría en Intervención Ambiental

Or. Ingeniería Ambiental

**“EMISIONES GASEOSAS DE LA ACTIVIDAD
HIDROCARBURÍFERA UPSTREAM”**

Autora: Ing. Flavia Estela Ruiz

Directora: Ph.D Eliana Aqueveque Reydet

Director de Tesis

Facultad de Ingeniería

Universidad Nacional del Comahue

Septiembre 2016



Resumen

La presente tesis pretende desarrollar una aplicación informática que permita computar emisiones de dióxido de carbono y metano, sin que sean producto de la combustión, y luego predecir dispersión del contaminante en función de parámetros climáticos de la región a analizar. La aplicación desarrollada pretende llenar el vacío en cuanto a herramientas de predicción de impactos posibles en cuanto a las emisiones en zonas urbanizadas en áreas de explotación hidrocarburífera previas a los asentamientos. Entre las utilidades en materia de diagnóstico que se pretenden está la versatilidad de simular la sinergia de emisiones de varios procesos instalados.

Para poder concluir que la herramienta desarrollada es adecuada, versátil e integral, se la validará con diferentes softwares reconocidos del mercado.



Abstract

This thesis aims to develop a software application that allows compute emissions of carbon dioxide and methane, without being the product of combustion, and then predict contaminant dispersion depending on climatic parameters of the region to be analyzed.

The application developed aims to fill the gap in terms of prediction tools as possible impacts on emissions in urbanized areas and hydrocarbon exploitation. Among the utilities in diagnosis which is intended to simulate the versatility of synergy emissions of several installed processes.

To conclude that the tool developed is suitable, versatile and comprehensive, it is the recognized validated with different software on the market.



Índice

| | | |
|-------|--|-----------|
| 1. | Capítulo 1: Introducción..... | 1 |
| 1.1 | Introducción | 1 |
| 1.2 | Generalidades | 3 |
| 1.3 | Descripción del problema y antecedentes..... | 4 |
| 1.4 | Hipótesis y Objetivos..... | 6 |
| 1.4.1 | Hipótesis:..... | 6 |
| 1.4.2 | Objetivo General: Tesis | 6 |
| 1.5 | Disparadores de la tesis | 7 |
| 1.6 | Red Conceptual | 8 |
| 2. | Capítulo 2: Caracterización de Fluidos..... | 9 |
| 2.1 | Generalidades | 9 |
| 2.2 | Propiedades de los Hidrocarburos..... | 9 |
| 2.3 | Envoltorio de fases..... | 10 |
| 2.4 | Casos de Aplicación..... | 11 |
| 2.5 | Fluidos emitidos..... | 13 |
| 2.6 | Propiedades de los hidrocarburos..... | 15 |
| 2.6.1 | Tensión de Vapor | 15 |
| 2.6.2 | Presión de Vapor Reid | 16 |
| 2.6.3 | Densidad..... | 16 |
| 2.6.4 | Termodinámica..... | 18 |
| 3. | Capítulo 3: Contaminación por emisiones..... | 20 |
| 3.1 | Generalidades | 20 |
| 3.2 | Calidad del aire y emisiones | 21 |
| 3.3 | Regulaciones legales | 21 |
| 3.3.1 | Ley Nacional 20.284 | 21 |
| 3.3.2 | Parámetros OMS..... | 22 |
| 3.4 | Emisiones | 23 |
| 3.5 | Efectos de la contaminación sobre la salud..... | 25 |



Ing. Flavia Ruiz

| | | |
|-------|--|----|
| 3.5.1 | Riesgos asociados al ingreso por vía respiratoria..... | 25 |
| 3.5.2 | Dióxido de Carbono-Efectos sobre la Salud..... | 25 |
| 3.5.3 | Metano -Efectos sobre la Salud..... | 26 |
| 3.6 | Efectos fisiológicos sobre las personas..... | 26 |
| 4. | Capítulo 4: Cómputo de emisiones..... | 28 |
| 4.1 | Procesos que generan emisiones directas | 28 |
| 4.1.1 | Deshidratación con glicol..... | 28 |
| 4.1.2 | Bombas de glicol..... | 29 |
| 4.1.3 | Almacenamiento de gas y petróleo: Pérdidas por flasheo de crudo | 29 |
| 4.1.4 | Pérdidas evaporativas en tanques con techos fijos..... | 32 |
| 4.1.5 | Pérdidas evaporativas operativas | 34 |
| 4.2 | Procesos en los que se generan Emisiones fugitivas | 35 |
| 4.2.1 | Gas de Servicio | 36 |
| 4.2.2 | Gas combustible para accionamiento de bombas de inyección de químicos..... | 37 |
| 4.3 | Emisiones no rutinarias | 37 |
| 4.3.1 | Venteo frío..... | 38 |
| 4.3.2 | Shut down - Situaciones de emergencias..... | 38 |
| 4.4 | Esquemas de procesos de gas y petróleo | 39 |
| 5 | Capítulo 5: Modelos de dispersión..... | 41 |
| 5.1 | Generalidades..... | 41 |
| 5.2 | Variables que afectan la dispersión | 41 |
| 5.3 | Modelos matemáticos..... | 42 |
| 5.3.1 | Modelos Gaussianos | 45 |
| 5.4 | Software para modelización | 49 |
| 5.5 | Situaciones de fuga y dispersión | 50 |
| 5.5.1 | Fuente puntual de emisión continua | 50 |
| 5.6 | Aplicación de metodología para la resolución | 54 |
| 5.7 | Perfil de Velocidades del Viento..... | 56 |
| 5.7.1 | Factores que influyen en la dispersión del penacho | 56 |



Ing. Flavia Ruiz

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.7.2 | Estimación de la elevación del penacho..... | 57 |
| 5.8 | Parámetros de dispersión de Fuentes Puntuales | 62 |
| 5.9 | Inversión térmica y contaminante. | 64 |
| 6 | Capítulo 6: Casos de Aplicación | 65 |
| 6.1 | Introducción..... | 65 |
| 6.1 | Caso A: Planta de tratamiento de Gas | 67 |
| 6.1.1 | Cómputo de emisiones | 68 |
| 6.2 | Dispersión de contaminantes..... | 69 |
| 6.3 | Resolución Caso A usando software Aloha | 72 |
| 6.4 | Caso B: Batería..... | 75 |
| 6.4.1 | Pérdidas en Tanques | 78 |
| 6.4.2 | Emisiones de tanques que utilizan gas de blanketing..... | 79 |
| 6.5 | Caso C: Tanque de almacenamiento con hidrocarburos volátiles..... | 84 |
| 6.6 | Caso D: Transporte de Gas | 88 |
| 6.7 | Cuadro comparativo | 90 |
| | Caso A: Planta de tratamiento de Gas..... | 90 |
| | Caso B: Batería | 90 |
| | Caso C: Tanque de almacenamiento con hidrocarburos volátiles..... | 90 |
| 7 | Capítulo 7: Discusión de los resultados | 92 |
| 7.1 | Caso A: Planta de tratamiento de Gas | 92 |
| 7.2 | Caso B: Batería..... | 92 |
| 7.3 | Caso C: Tanque de almacenamiento con hidrocarburos volátiles..... | 93 |
| 7.4 | Caso D: Transporte de Gas | 93 |
| 7.5 | Generalidades de la discusión de resultados..... | 94 |
| 8 | Capítulo 8: Conclusiones y Recomendaciones..... | 96 |
| 9 | Anexos | 98 |
| 9.1 | Anexo A: Listado de Figuras y Tablas | 98 |
| 9.2 | Anexo B: Cálculos Adicionales..... | 100 |



Glosario de palabras clave

Flasheo: Vaporización súbita.

GOR: Relación Gas-Petróleo.

Contaminación atmosférica: Se entiende por contaminación atmosférica la presencia en la atmósfera de cualquier agente físico, químico o biológico, o de combinaciones de los mismos en lugares, formas y concentraciones tales que sean o puedan ser nocivos para la salud, seguridad o bienestar de la población, o perjudiciales para la vida animal y vegetal, o impidan el uso y goce de las propiedades y lugares de recreación.

Fuente de contaminación: Entiéndase por fuente de contaminación, los automotores, maquinarias, equipos, instalaciones de procesos, fijas o móviles, cualquiera sea su campo de aplicación u objeto a que se los destine, que desprendan a la atmósfera sustancias que produzcan o tiendan a producir contaminación atmosférica.

Emisión: Se entiende por emisión cualquier contaminante que pase a la atmósfera como consecuencia de procesos físicos, químicos o biológicos. Cuando los contaminantes pasen a un recinto no diseñado específicamente como parte de un equipo de control de contaminación del aire, serán considerados como una emisión a la atmósfera.

Fuentes fijas: Son todas las fuentes diseñadas para operar en lugar fijo. No pierden su condición de tales aunque se hallen montadas sobre un vehículo transportador a efectos de facilitar sus desplazamientos.

Fuentes móviles: Son todas aquellas fuentes capaces de desplazarse entre distintos puntos, mediante un elemento propulsor (motor) que genera y emite contaminantes.

Dispersión: Se refiere a la mera dispersión física de materia en un medio. Tanto en la hidrosfera como en la atmósfera o el aerosol, las corrientes, vientos, diferencias de presión y



temperatura, provocan el movimiento de las partículas, también de los contaminantes, en la extensión del compartimento.

Fuente: Fábrica, hogar, instalación química, etc. que emite contaminantes al aire. Puede ser una fuente estática o una fuente móvil, como es el caso de los vehículos de transporte.

Emisión Fugitiva: Emisión no controlada al aire, al agua o al suelo.

Riesgo Toxicológico: El peligro es la capacidad de un agente químico para ocasionar daño en una situación o circunstancia en particular.

Sinergia: Incremento de la acción de diversas sustancias debido a que actúan conjuntamente.

Upstream: Este sector incluye las tareas de búsqueda de potenciales yacimientos de petróleo crudo y de gas natural, tanto subterráneos como submarinos, la perforación de pozos exploratorios, y posteriormente la perforación y explotación de los pozos que llevan el petróleo crudo o el gas natural hasta la superficie.

Midstream: La industria petrolera se encuentra dividida en tres grandes sectores: Upstream, midstream y downstream. El sector midstream incluye el transporte, ya sea por tuberías, ferrocarril, barco, o camión, el almacenamiento y la comercialización al por mayor de productos crudos o refinados derivados del petróleo.

Shut Downs: Cese de operación a causa de un problema operativo.

Stripping: Despojadora (Gas de Stripping aplica al gas utilizado en procesos de despojamiento de contaminantes).

Blanketing: Inertización (Gas de desplazamiento de oxígeno para evitar mezcla explosiva o proliferación de bacterias en caso de equipos que contienen agua).



1. Capítulo 1: Introducción

1.1 Introducción

La industria hidrocarburífera, es una de las economías regionales más importantes en la región neuquina. La producción de petróleo y gas tiene asociada una serie de Instalaciones para recibir los fluidos y tratarlos hasta lograr especificación para su venta.

Durante la producción y tratamiento de hidrocarburos (petróleo y gas) se producen emisiones gaseosas, fugas ó pérdidas. También se producen otras emisiones, llamadas fugitivas, en forma crónica e inevitable que pudieran constituir un riesgo potencial a la salud y al medioambiente.

El aumento de la actividad industrial ha ido incrementando considerablemente la contaminación del aire. Las características del aire están menos popularizadas en la comunidad como para detectar posibles escapes en forma inmediata y visible.

La legislación argentina contempla características y cantidades de emisiones de algunos contaminantes, pero deja muchos vacíos en cuanto a enfoque, sinergia, descripción de muestreo en el peor escenario posible¹, entre otros. La legislación provincial si bien establece máximo de emisiones gaseosas para los pozos, tampoco se ocupa del muestreo.

En los últimos años la creciente concientización acerca del cuidado medioambiental ha ido incorporando conceptos clave en las normativas de aplicación en función de la experiencia y entendiendo al ambiente como un todo, incluyendo nuevas propuestas de tecnologías para monitoreo de calidad de aire.

Las emisiones gaseosas de más inquietud a la hora de control son aquellas que generan gases de efecto invernadero, aunque no son menos preocupantes aquellas que impliquen riesgo toxicológico, como NOx y SOx. En la presente tesis el cómputo de emisiones y la predicción de

¹ La ley 1875 establece (verp71).



dispersión de las mismas tendrá un enfoque a la incidencia toxicológica de dos gases de efecto invernadero, metano y dióxido de carbono, uno más pesado que el aire y el otro no. Partiendo de la premisa que no existe actividad con impacto cero, la industria petrolera ha tratado de identificar a través del conocimiento de su actividad, todos los posibles escenarios de contaminación. En el desarrollo diario de la actividad, pequeñas mejoras en la operación, pueden disminuir sustancialmente los impactos en el tiempo y en el ambiente.

Con la caracterización de los fluidos procesados se puede prever la peligrosidad de una emisión producida en cualquier instancia, así luego clasificar las emisiones en función de su origen. Desde la mecánica de fluidos, dado el complejo comportamiento de los gases, la modelización matemática ha sido de gran utilidad para los pronósticos preventivos en cuanto a emisiones fugitivas, pérdidas por vaporización en tanques, etc. Enfocados en las posibles emisiones que pudieran producirse, los orígenes de los impactos ambientales de las emisiones gaseosas son trascendentes en varios aspectos:

- 1- El impacto “local”, en donde se ha liberado el mayor volumen en el entorno.
Posibles daños: Riesgo toxicológico, daños materiales. En función de las propiedades de los fluidos se evalúa la magnitud real.
- 2- El impacto "global"
Cualquier emisión producida tiene como destino final el ambiente, por ende la acumulación o incorporación de nuevas formas de contaminantes al ambiente, potencia el cuadro.
- 3- Impacto de utilización de energía: la utilización de combustibles fósiles - combustión.

Este último impacto, si bien mencionado, no formará parte del eje central del trabajo. La propuesta para el presente y el futuro es no sólo resolver la remediación de lo contaminado, sino predecir con la mayor certeza posible los impactos a la calidad del aire. Una forma de predecir la contaminación sería a partir de simulación de casos, teniendo así las bases para el cambio de prácticas en la actividad que permitan elaborar medidas preventivas en caso de contingencia. Para ello hay que tener en cuenta no sólo las fuentes y modos de emisión, sino los factores externos que modifican los modelos, por causa de su imprevisibilidad. Por ejemplo, las temperaturas y la velocidad de los vientos predominantes influyen ampliamente en la propagación de contaminantes.



Se pretende en el presente trabajo, plasmar mediante simulación con una herramienta desarrollada, las bases para establecer un plan de emergencias predictivo, capaz de cuantificar los posibles impactos en poblaciones cercanas, utilizando los datos obtenidos como indicadores de la mejora en las prácticas productivas a partir del historial de impactos que exista.

1.2 Generalidades

La industria hidrocarburífera ha ido trabajando en pos de la mejora de sus actividades con el objetivo de paliar un pasado de malas prácticas y contaminación severa. Sin embargo, es común aun hoy en día, escuchar acerca de derrames en etapas de operación offshore de magnitudes incontrolables. Lamentablemente, los derrames ó escapes no sólo ocurren *offshore*, sino en *onshore* también, debido a infinidad de situaciones, como por ejemplo malas maniobras, pérdidas de integridad, actos vandálicos, etc.

Debido a las variables propias de la producción de petróleo y gas, se producen impactos derivados de la actividad y otros debido a accidentes. Cada vez que un hecho no deseado ocurre, aparece una situación de impacto que supera en daño al impacto ponderado como propio de la actividad. Estas situaciones muchas veces no están previstas desde el punto de vista de la contingencia, ya que la concepción del medio ambiente está basada en registros tipo y situaciones tipo.

La contaminación de agua o tierra es aparentemente más visible, mientras que la contaminación del aire es más lenta de identificar e incluso mucho menos controlable, y dependiente en demasía de variables meteorológicas. Un punto crítico en el diseño y monitoreo de Instalaciones de Superficie son las propiedades de los fluidos a manipular, almacenar y transportar, es por eso que en la presente tesis se tratará de la contaminación atmosférica que tiene lugar durante la producción de hidrocarburos.

La cuenca neuquina de petróleo y gas es una de las más importantes de nuestro país. La producción de petróleo y gas tiene asociada una serie de instalaciones *Upstream* para recibir los fluidos y ponerlos en especificación para su venta. Es común que en la industria se generen emisiones durante el proceso e incluso en situación de emergencia. También se originan *emisiones fugitivas*, ya sea por fluctuaciones de variables operativas en el proceso como por falta de mantenimiento o fallas en el material del equipamiento.



Si a las prácticas asociadas a la producción petrolífera y gasífera se suma un mal manejo de los recursos y la responsabilidad fuera de lo técnico con respecto al medio ambiente, se podrían ocasionar fugas y/o pérdidas, que pudieran propagarse hasta poblaciones cercanas o simplemente contribuir a la contaminación del aire. La medición es una buena técnica, y necesaria, pero es una tarea difícil y, a los efectos de disminuir los impactos generados por la actividad, no aportan un valor agregado, dado que solamente cuantifican pero no previenen.

Dado el complejo comportamiento de los gases, la modelización matemática ha sido de gran utilidad para los pronósticos preventivos en cuanto a emisiones fugitivas, pérdidas por vaporización en tanques, etc.

1.3 Descripción del problema y antecedentes

En los últimos años se ha hablado mucho de los gases de efecto invernadero, y de los CFC que tienen incidencia en la degradación de la capa de ozono y los problemas asociados a este hecho. Sin embargo, poco se habla de los riesgos asociados a las fugas o emisiones fugitivas, sobre todo cuando hay comunidades cercanas, poblaciones, o incluso personas que trabajan en régimen y habitan en albergues de la empresa, y dada la cercanía y el contacto continuo con una atmósfera con diversos contaminantes no debe subestimarse su efecto, aunque el tamaño del perjuicio sea casi imperceptible.

Si bien algunos temas se tratarán como problemáticas generalizadas, el enfoque estará relacionado con la realidad regional de la Cuenca Neuquina, donde la cercanía de campos petroleros a poblaciones se ha acentuado, no por el desarrollo de campos sino por el establecimiento de asentamientos ilegales en zonas aledañas a los mismos ó por corrimiento de ejidos urbanos debido a la falta de planeamiento, lo que ha generado una convivencia entre actividad industrial y poblacional.

En cuanto a este enfoque de análisis preventivo de la pérdida de calidad del aire no hay demasiados antecedentes, salvo visiones fragmentadas orientadas a enfoques clásicos o uso de simuladores con el fin de estudios de impactos, pero no con el objeto de diagnosticar y analizar preventivamente.



En este trabajo se prestará especial atención a la contaminación atmosférica, mediante simulación de emisiones productos de no combustión, de CH₄ y CO₂ provenientes de operaciones de rutina y no rutinarias, en las actividades de producción y tratamiento de crudo y gas de acuerdo también a normativa vigente.

En la actualidad la demanda de energía de las sociedades es mayor a la necesaria para la subsistencia, por eso se han vuelto más contaminantes los núcleos urbanos ya que está directamente relacionado con la demografía. La extracción y el transporte de hidrocarburos, los distintos procesos de su transformación en productos derivados y su consumo masivo en forma de combustible requieren especial atención, dado que por los volúmenes procesados, los impactos pueden ser más que severos. Descontando la grave contaminación producida por la quema de combustibles en automotores, en zonas densamente pobladas, la etapa *Upstream* es la más crítica a la hora de la evaluación de impactos, debido a la exposición directa que puede provocar a la salud humana.

Como se ha establecido en la parte introductoria, si bien los impactos ambientales, en su concepto más amplio, en la actividad hidrocarburífera pueden ser muchos, en este trabajo se ahondará en las emisiones gaseosas en la etapa de transición entre *Upstream* y *Midstream* (Instalaciones de Superficie y Transporte).

Los parámetros a contemplar, que pesan en el tema propuesto, son:

- Tipo de instalaciones
- Caudales de proceso
- Antigüedad de la instalación
- Operación y Mantenimiento
- Población expuesta en general
- Tipo de población en riesgo (niños, adultos y ancianos)
- Frecuencia



En la presente tesis se pretende ver la incidencia de la actividad hidrocarburífera en zonas cercanas a asentamientos o poblaciones en cuanto a riesgo toxicológico en las personas a partir de simulaciones de eventos.

1.4 Hipótesis y Objetivos

1.4.1 Hipótesis:

El efecto sobre la calidad del aire de emisiones fugitivas junto con las posibles emisiones de emergencia de las instalaciones *Upstream* de procesamiento de gas y petróleo, constituyen un riesgo en la calidad del aire no visible al corto plazo, pero sí en el posible aumento de las enfermedades asociadas a las vías respiratorias.

El desafío para el presente y el futuro es no sólo resolver la remediación de lo contaminado, sino predecir con la mayor certeza posible los impactos potenciales para elaborar mejores planes de medidas preventivas.

De la indagación bibliográfica para la elaboración de la propuesta de tesis se ha encontrado que si bien hay trabajos que plantean la simulación como herramienta en determinadas emergencias medioambientales, los enfoques propuestos presentan visiones fragmentadas, abocándose a estudios de impactos ambientales ó aplicaciones puntuales.

No se cuenta con herramientas predictivas en materia de diagnóstico para la evaluación de planes preventivos para protección a la comunidad y al medio ambiente, asegurando calidad ambiental para las generaciones futuras.

1.4.2 Objetivo General: Tesis

Del estado de situación que se refleja en los puntos de la hipótesis, surge el objetivo de esta tesis, que es, mediante simulación **cuantificar emisiones y predecir dispersión de contaminantes** para sentar **las bases para elaborar un plan de emergencias predictivo, capaz de cuantificar los posibles impactos en poblaciones cercanas,** utilizando la simulación como indicador de la mejora



en las prácticas productivas a partir del historial de impactos que exista. Como sólo se pretende dar lineamientos, no se expresa que con esta herramienta se tendrán todas las variables para realizar el estudio de impacto ambiental. Para ello se computarán las pérdidas de gases CH₄ y CO₂ de Instalaciones de Superficie, en situaciones de operación normales y de emergencias, cercanas a poblaciones y se analizará mediante modelización matemática de la dispersión de dichas pérdidas (emisiones) si las mismas pueden ser un factor determinante para un efecto sobre la salud de las personas y el ambiente que circunda el área de tratamiento.

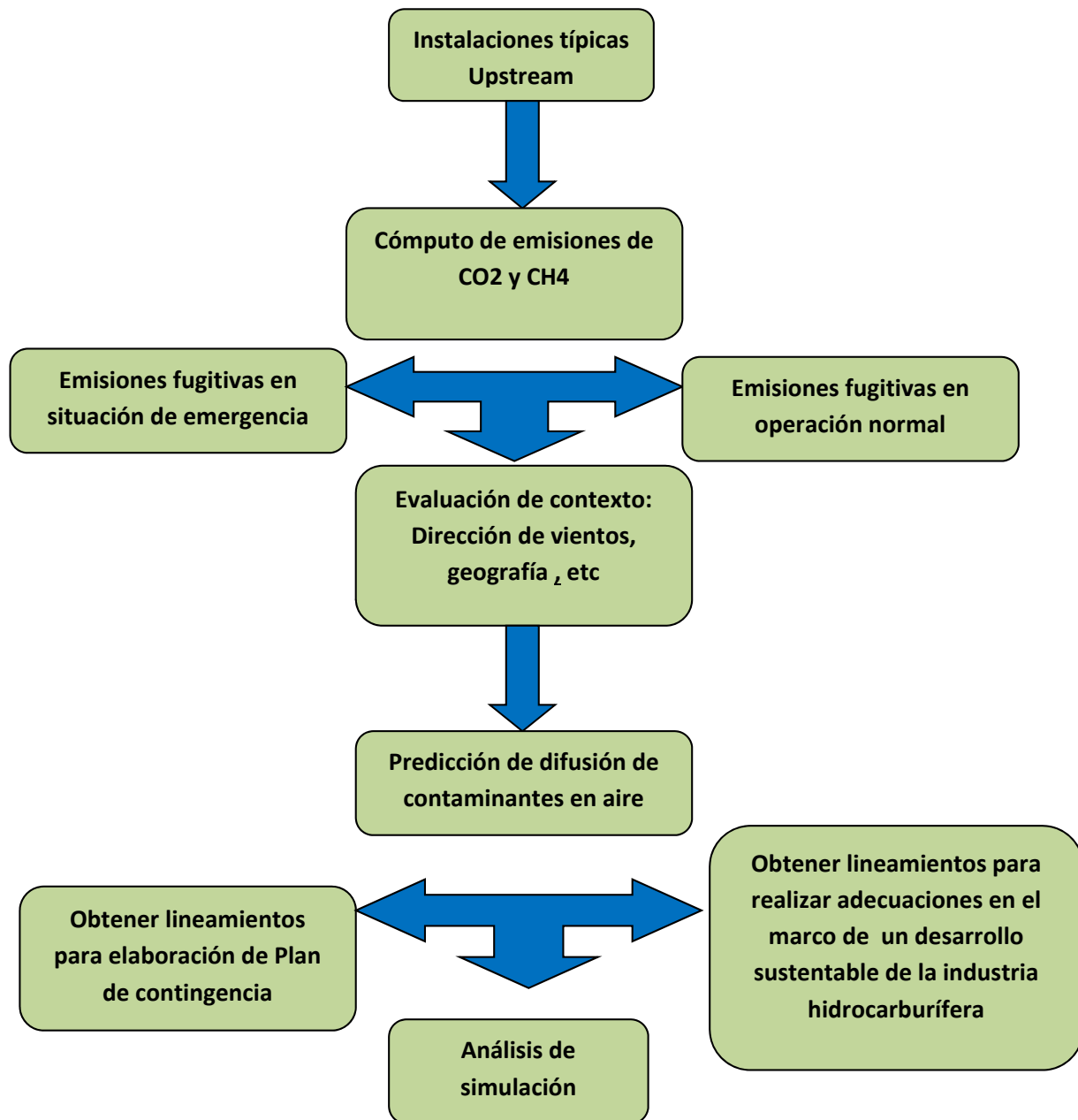
1.5 Disparadores de la tesis

De la indagación bibliográfica², fue detectado que no se han aplicado modelos de cómputos de emisiones y dispersión de las mismas como herramienta predictiva en materia de diagnóstico para la evaluación de planes preventivos en materia medioambiental-toxicológica.

Para el objetivo general se enfatizará en campos petroleros linderos a poblaciones en el país con no más de 5 años de antigüedad, y no en campos petroleros preexistentes a la ubicación de asentamientos poblacionales.

Bibliografía: Compendios API de Emisiones Gaseosas, Estudios de Impactos ambientales presentados en la provincia, publicaciones IPIECA, potencialidad de cálculo de los software de aplocacion en cuanto a emisiones (Aloha, Hysis, etc).

1.6 Red Conceptual





2. Capítulo 2: Caracterización de Fluidos

2.1 Generalidades

Los fluidos en la industria del petróleo y el gas, contienen diferentes contaminantes, algunos propios de la formación y otros adicionados en el proceso de producción. Los constituyentes más comunes del petróleo y del gas son hidrocarburos, incluyendo contaminantes tales como sulfuros, nitrógeno, oxígeno y metales, dióxido de carbono, etc. El petróleo en general consiste en partículas coloidales, sedimentos y agua (BS&W). Uno de los componentes más tóxicos que presenta el petróleo y el gas en yacimientos es el sulfuro de hidrogeno, generando graves riesgos a la salud en situación de fugas. Algunos yacimientos contienen mercurio (Hg), por lo que también representaría un riesgo el hecho de las fugas a raíz de deterioros por causa de no haber seleccionado materiales adecuados.

| | Formula empírica | Fórmula desarrollada | Peso Molecular | Temperatura ebullición °C (1 atm) |
|-------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------|---|
| Metano | CH ₄ | C | 16 | -161.5 |
| Etano | C ₂ H ₆ | C-C | 30.1 | -88.6 |
| Propano | C ₃ H ₈ | C-C-C | 44.1 | -42.1 |
| n-butano | C ₄ H ₁₀ | C-C-C-C | 58.1 | -0.5 |
| Iso-butano | C ₄ H ₁₀ | C-C-C-C | 58.1 | -11.7 |
| n-pentano | C ₅ H ₁₂ | C-C-C-C-C | 72.1 | 36.1 |
| n-hexano | C ₆ H ₁₄ | C-C-C-C-C-C | 100.2 | 98.4 |

Fig.2.1: Constantes físicas de alcanos

2.2 Propiedades de los Hidrocarburos

Los hidrocarburos por sus propiedades combustibles, deben estar en su almacenamiento en forma estabilizada, esto implica que algunas propiedades tengan ciertos valores que no impliquen riesgos.

Algunas de las principales propiedades a tener en cuenta son las siguientes:



- **Tensión de vapor** de los hidrocarburos puros, de las fracciones del petróleo y de sus mezclas.
- **Propiedades críticas.** Temperatura y presión críticas.
- **Densidad**
- **Propiedades térmicas:** calor específico; coeficiente de compresión adiabática; calor latente de vaporización; entalpía y conductividad térmica.
- **Viscosidad**
- Poder calorífico
- Puntos de congelación
- Límites de explosividad y punto de inflamación
- Tensión superficial
- Solubilidad de los hidrocarburos y de los hidrocarburos en el agua.
- Curvas de destilación

Caracterizar el fluido implica, entre otras cosas, identificar los contaminantes gaseosos de naturaleza tóxica significativos, determinar su concentración y utilizando factores de emisión tipo, evaluar las emisiones anuales en tanques, juntas, torres, etc.

Describir el comportamiento de los fluidos a través de sus respectivos diagramas de fase es de suma importancia para computar las emisiones, así como la clasificación de los yacimientos de acuerdo al tipo de fluido.

2.3 Envoltente de fases

Una forma de caracterizar un fluido multicomponente es conociendo su envoltente de fase. Una envoltente de fase es una representación gráfica del comportamiento de un fluido multicomponente en función de la presión, la temperatura y la composición del mismo. La envoltente de fase se forma al unir las curvas de punto de rocío y punto de burbuja. La curva de puntos de rocío es el lugar geométrico donde una gota infimesimal de líquido coexiste con el vapor, mientras que la curva de puntos de burbuja es aquel lugar geométrico donde una burbuja de vapor infimesimal coexiste con el líquido. Las curvas de 100% del punto de burbuja y la de 0% de punto de rocío convergen en el punto crítico. En el punto crítico las propiedades intensivas del gas y líquido son idénticas. La temperatura cricondértica es la máxima temperatura donde existe un

equilibrio entre el vapor y el líquido, a una temperatura superior a ésta el sistema se encuentra en fase gaseosa. La presión criconderbárica, es la máxima presión donde existen en equilibrio el vapor y el líquido. La posición relativa de los puntos criconderbáricos y cricondertérmicos va a depender de la composición del sistema.

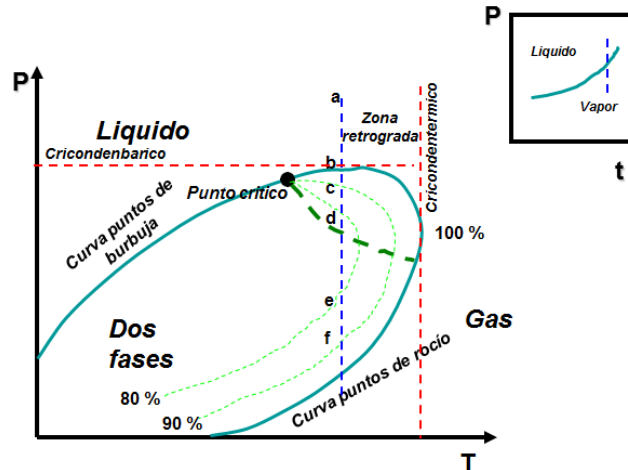


Fig 2.2: Envoltente de Fase de un hidrocarburo

2.4 Casos de Aplicación

A continuación se muestran diferentes diagramas de fases simulados en software hysis a partir de su composición, mostrando la forma de las envoltentes en presencia de algunos componentes que pudieran estar presentes en las mezclas.

- **Fluido 1**

| Worksheet | |
|--------------------|-------------------|
| Conditions | |
| Properties | |
| Composition | |
| K Value | |
| User Variables | |
| Notes | |
| Cost Parameters | |
| | Mole Fractions |
| | Ethane 0.100000 |
| | Propane 0.500000 |
| | i-Butane 0.150000 |
| | n-Butane 0.250000 |
| | Total 1.00000 |

Buttons: Edit..., Edit Properties..., Basis...

Fig 2.3: Pantalla de componentes Fluido 1 Hysis

Es un gas en condiciones de superficie. La zona líquido - gas es estrecha por lo que puede concluirse que la composición del fluido no está compuesta por una gama extensa de hidrocarburos. Al ser aplanada puede observarse que no tiene gases ácidos ni metano.

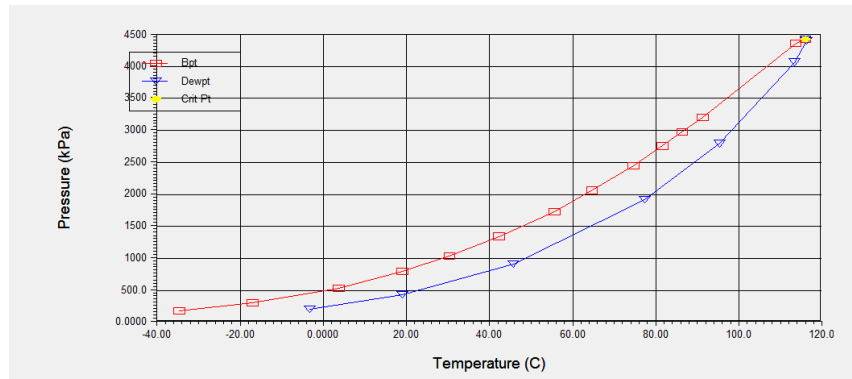


Fig 2.4: Envoltorio de Fase fluido 1 - Hysis

- **Fluido 2**

| Worksheet | Mass Fractions | Liquid Phase |
|--------------------|----------------|--------------|
| Conditions | | |
| Properties | | |
| Composition | | |
| K Value | | |
| User Variables | | |
| Notes | | |
| Cost Parameters | | |
| | Methane | 0.000000 |
| | Ethane | 0.000000 |
| | Propane | 0.009004 |
| | i-Butane | 0.005602 |
| | n-Butane | 0.016006 |
| | i-Pentane | 0.016006 |
| | n-Pentane | 0.019008 |
| | n-Hexane | 0.032013 |
| | n-Heptane | 0.072029 |
| | n-Octane | 0.083033 |
| | n-Nonane | 0.075030 |
| | n-Decane | 0.063025 |
| | n-C11 | 0.046018 |
| | n-C12 | 0.096038 |
| | n-C13 | 0.120048 |
| | n-C14 | 0.079032 |
| | n-C15 | 0.047019 |
| | n-C16 | 0.070028 |
| | n-C17 | 0.040016 |
| | n-C18 | 0.026010 |
| | n-C19 | 0.024010 |
| | n-C20 | 0.061024 |

Fig 2.5: Pantalla de componentes Fluido 2 Hysis

| Worksheet | Stream Name | 1 | Liquid Phase |
|-----------------|-------------------------------|----------------|--------------|
| Conditions | Vapour / Phase Fraction | 0.0000 | 1.0000 |
| | Temperature [C] | 15.00 | 15.00 |
| Properties | Pressure [kPa] | 100.0 | 100.0 |
| Composition | Molar Flow [kgmole/h] | 63.26 | 63.26 |
| | Mass Flow [kg/h] | 9143 | 9143 |
| K Value | Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 12.50 | 12.50 |
| User Variables | Molar Enthalpy [kJ/kgmole] | -3.065e+005 | -3.065e+005 |
| Notes | Molar Entropy [kJ/kgmole-C] | 213.9 | 213.9 |
| | Heat Flow [kJ/h] | -1.939e+007 | -1.939e+007 |
| Cost Parameters | Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h] | 12.41 | 12.41 |
| | Fluid Package | Basis-1 | |

Fig 2.6: Pantalla de condiciones Fluido 2 Hysis

Al contar con una envolvente simulada, puede observarse la curva de puntos de burbuja comienza superados los 50°C, por lo tanto este fluido no es gas sino petróleo.

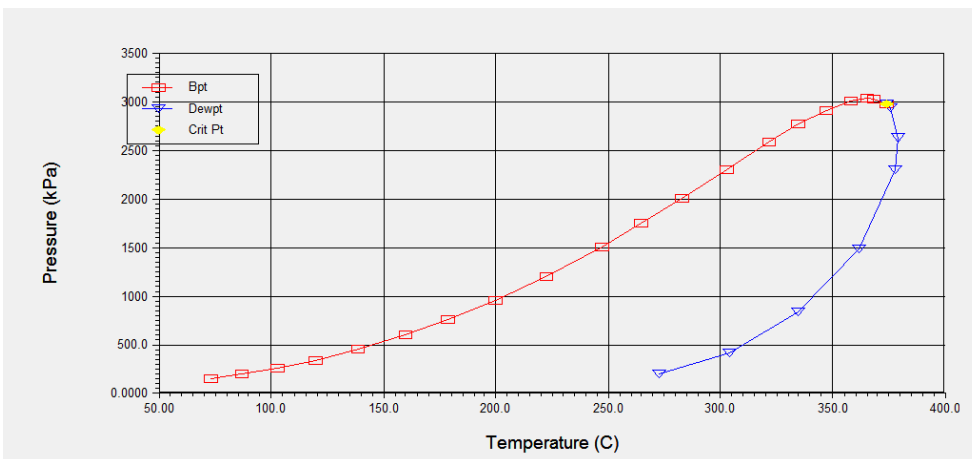


Fig 2.7: Envolverte de Fase fluido 2 - Hysis

2.5 Fluidos emitidos

Los hidrocarburos provenientes del petróleo poseen alta presión de vapor, por lo que las fugas en operación normal representan una gran parte de las pérdidas posibles dado la continuidad en el tiempo.

La contaminación atmosférica producto de la liberación de sustancias químicas y partículas en la atmósfera alterando su composición y suponiendo un riesgo para la salud de las personas y de los demás seres vivos, es inevitable en el contexto de desarrollo actual. En el presente trabajo, el



enfoque no estará centrado en contaminantes originados debido a combustión sino sólo en las emisiones gaseosas de hidrocarburos debido a emisiones fugitivas u operación pero sin reacción. El metano es encontrado siempre donde hay combustibles de origen fósil, dado que es el constituyente mayoritario del gas natural, y es uno de los gases causantes de efecto invernadero. Se emite durante operaciones normales de extracción de petróleo, gas natural o carbón mineral. También durante la manipulación, procesamiento y transporte (ya sea en camiones o a través de tuberías) del combustible fósil. Con simplemente comprar o usar combustible fósil del tipo carbono, gas natural o petróleo se está contribuyendo a las emisiones de metano. Por eso es fundamental desarrollar prácticas sustentables, no para extinguir estas emisiones sino para disminuirlas. El CO₂, otro de los gases de efecto invernadero, es el que ha tenido un crecimiento más acelerado, ya que se incrementa con las actividades antrópicas más que cualquier otro.

En Argentina, en cuanto a emisiones gaseosas, se tiene el agravante de no haber avanzado en leyes nacionales sobre el clima, ya que como se dice “lo urgente supera a lo necesario”, y el déficit energético lleva a paliar este último tema antes que nada.

Argentina tiene una matriz energética altamente dependiente de combustibles fósiles. Sin embargo, en cuanto a regulaciones de calidad del aire la actividad no está enmarcada en la ley de Provincia de Buenos Aires de calidad del aire, dado que la actividad hidrocarburífera no se desarrolla en polos industriales.

2.5.1 Fluidos emitidos sin combustión

Los gases como el CO₂ y el CH₄, incluso los compuestos sulfurados y nitrogenados, son compuestos constituyentes del gas natural, que pueden ser emitidos sin necesidad de combustión.

El gas natural posee como principales impurezas en su composición los siguientes compuestos:

- a) Sulfuro de hidrógeno
- b) Dióxido de carbono
- c) Vapor de agua
- d) Dióxido de azufre
- e) Óxidos de nitrógeno
- f) Compuestos orgánicos volátiles (VOCs)
- g) Compuestos clorados volátiles (ej: HCl,)



- h) Compuestos fluorados volátiles (HF, SiF)
- i) Compuestos básicos nitrogenados
- j) Monóxido de carbono
- k) Sulfuro de carbonilo
- l) Compuestos sulfurados orgánicos
- m) Cianuro de hidrógeno

En general, a medida que los yacimientos envejecen, la calidad de la producción disminuye y se incrementa la cantidad de compuestos sulfurados.

Para cumplir con las regulaciones medioambientales y especificaciones de venta, se deberán prever modificaciones de carácter preventivo en función de la antigüedad del reservorio.

Las emisiones de esta fuente incluyen el metano, el sulfuro de hidrógeno (H₂S), el dióxido de carbono (CO₂), etc.

2.6 Propiedades de los hidrocarburos

2.6.1 Tensión de Vapor

La tensión de vapor mide la tendencia de las moléculas a dispersarse de una fase líquida para generar una fase vapor en equilibrio termodinámico. Es una función creciente de la temperatura y específica de cada cuerpo puro. Esta característica es muy significativa ya que de una manera indirecta indica el contenido en productos livianos que determinan la seguridad durante el transporte; las pérdidas en el almacenamiento, en el transporte y la volatilidad de las naftas.

Representa el factor clave en la emisión de compuestos Volátiles, COV, lo cual es de suma importancia tener presente en tanques de almacenamiento de hidrocarburos.

Las especificaciones de las naftas ubican la presión de vapor en un rango entre 800 g/cm²a en invierno y 650 g/cm²a en verano.

Una forma teórica de la termodinámica para calcular la presión de vapor es la ecuación de Clapeyron aplicada a un gas perfecto se escribe:



$$d(\ln P) = -\frac{r}{R} \times d(1/T) \quad \text{Ecuación 2.6.1}$$

P= Presión del gas saturado o la tensión de calor del líquido

r= Calor de vaporización molecular

R= Constante de los gases perfectos

T=Temperatura absoluta °K

La integración de esta ecuación diferencial conduce a:

$$\ln P = -\frac{r}{R} \times \frac{1}{T} + C \quad \text{Ecuación 2.6.2}$$

Esta ecuación señala la posibilidad de obtener una representación lineal de la tensión de vapor utilizando una escala logarítmica de presión en ordenadas y una escala hiperbólica de temperatura en abscisas.

2.6.2 Presión de Vapor Reid

Es la presión que ejerce a una temperatura dada, la porción de líquido evaporado dentro de un recipiente cerrado. La presión de vapor indica de una forma indirecta, el contenido de compuestos volátiles que condicionan la seguridad durante el transporte, las pérdidas en almacenamiento y volatilidad de la gasolina.

Esta tendencia de las moléculas es medida al escaparse por un ensayo más sensible, que arroja la presión de vapor Reid o P.V.R. El valor de la P.V.R a 37.8°C (100°F) es la suma de la tensión de vapor parcial de los hidrocarburos y de la presión parcial del aire.

Dado que el volumen de la cámara de aire se encuentra normalizado, es factible establecer una correlación entre la presión de vapor Reid y la presión de vapor verdadera de la mezcla. Un valor de referencia de tensión de vapor para transporte 10 a 12 psi.

2.6.3 Densidad

La densidad es la relación entre el peso de un determinado volumen de muestra a una temperatura T y el peso del mismo volumen de agua a una temperatura determinada.



En EEUU para medir la densidad utilizan el grado A.P.I., definido como una función hiperbólica de la densidad.

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{S.G} - 131.5 \quad \text{Ecuación 2.6.3}$$

Cuanto más ligero es un crudo, mayor es su número de °API. Los valores del peso específico relativo en °API para los crudos normales oscilan entre 5 a 60 °API.

En general, los crudos ligeros poseen un peso específico elevado en °API, pequeña viscosidad, escasa tendencia aditiva y alta tendencia a emulsificarse. Lo inverso ocurre para los crudos pesados.

Al agua (en donde se inicia la escala de valores de la densidad expresada en grados API), le pertenece un valor de 10 °API.

Los grados API se utilizan asimismo para determinar el precio de un crudo determinado, dado que cuanto mayor sea el valor en °API, mayor es la proporción de crudo utilizable, principalmente en fracciones ligeras (nafta, nafta ligera, etc).

Según la densidad, los crudos pueden ser clasificados en:

| Tipo de crudo | °API | Densidad (kg/m3) |
|---------------|-----------|------------------|
| Liviano | >31.1 | <870 |
| Medio | 22.3-31.1 | 920-870 |
| Pesado | 10.0-22.3 | 1000-920 |
| Extra pesado | <10 | >1000 |

Tabla 2.6.3 Clasificación de crudos

Según la clasificación precedente³, los crudos argentinos (Centenario, Tierra del Fuego, Campo Durán Liviano, Campo Durán Pesado y Cerro Redondo), se ubican dentro del rango de los denominados “LIVIANOS” (°API>31,1), los restantes crudos usualmente procesados, pueden clasificarse como “MEDIOS” (°API 22,3-31,1).

³ Fuente: página secretaría de Energía de la provincia de Neuquén



Para los hidrocarburos, la densidad es función del peso molecular. Los crudos parafínicos poseen una densidad menor, los aromáticos una mayor densidad, mientras que los nafténicos poseen densidades intermedias. Para los líquidos, excepto para cálculos que requieran una gran precisión, podrá ser utilizado de forma indistinta, la “*specific gravity*” 60/60 o la densidad a 20 ó 15 °C.

Para los gases ó vapores la masa específica se expresa en kg/m^3 , o la densidad relativa al aire. Dado que la masa específica es muy sensible a la temperatura y a la presión, se ha elegido un estado de referencia para gases naturales determinado por $T = 15,5 \text{ °C}$ y $P = 1 \text{ atm}$.

Los métodos que se utilizan para el cálculo de la variación de la masa específica gaseosa en función de la presión y la temperatura son similares, sea que se trate de un hidrocarburo puro o de una mezcla.

Todos requieren tener en cuenta la ecuación de estado que relacione los tres parámetros: presión, volumen y temperatura; de aquí la utilización de la expresión: ecuación P.V.T.

La temperatura de los líquidos y la de los tanques de almacenamiento también influyen en la importancia de las pérdidas intermitentes o de emisiones de COV. Estas pérdidas intermitentes y emisiones o de emisiones de COV se descargan a la atmosfera a través de válvulas.

2.6.4 Termodinámica

El principio fundamental de la explotación hidrocarburífera está asociado con la propiedad de proporcionar energía a bajos volúmenes de comburente.

- **Calor específico**

Es la cantidad de calor que se requiere aplicar a la unidad de peso para aumentar su temperatura en un grado.

El calor específico en estado líquido es una función prácticamente lineal de la temperatura, excepto para los hidrocarburos ligeros (C_5), depende asimismo de la densidad y de la naturaleza química de los hidrocarburos existentes en las fracciones, lo que se tiene presente empleando una curva de corrección en función del factor de caracterización.



El calor específico a presión constante en estado vapor es función de las mismas variables; dependiendo además de manera muy sensible, de la presión.

Para evitar que el gas asociado al petróleo sea quemado la tendencia mundial es al recupero creando condiciones adecuadas de mercado o fomentando su reinyección a reservorio sea para *gas lift*, u otro uso. Estas técnicas de reutilización si bien son efectivas, no eliminan el problema de los venteos operativos como por ejemplo la emisión de COV de los tanques, o las válvulas de alivio térmico de las líneas de descarga de bombas, líquidos presurizados a depósitos no presurizados⁴.

⁴ Ver capítulo 1.



3. Capítulo 3: Contaminación por emisiones

3.1 Generalidades

La contaminación del aire viene azotando a las grandes ciudades en forma cada vez más significativa. Fuera de las zonas urbanas existen industrias que en mayor o menor medida constituyen un riesgo a la salud por incrementos de contaminantes en el medio sobre todo si los asentamientos se desplazan hacia las afueras.

La actividad petrolífera, así como cualquier actividad industrial genera contaminantes que pueden afectar la calidad del aire. En el caso de la industria de petróleo y gas, las emisiones pueden ser detectadas antes o después, según la cercanía de las instalaciones a las poblaciones, o la interacción con las comunidades que practiquen otras actividades en las áreas de desarrollo hidrocarburífero.

En el presente capítulo se expondrán los parámetros de calidad del aire para tener valores de referencia en la detección de desvíos y proponer la adecuación de los procesos para mantener los parámetros de emisión de los mismos en rangos admisibles para la salud ambiental y humana en todo momento. Se establece como calidad del aire a la composición de este fluido imprescindible para la vida, que no afecte a la salud ambiental, entendiéndose por salud ambiental, la salud de las personas y del ambiente, por lo que es de vital importancia, no sólo la evaluación de los gases que contribuyen al calentamiento global, generando un impacto en forma indirecta, sino la evaluación conjunta del riesgo toxicológico, por alteración de la composición de aire que esté dentro de los estándares para mantener las funciones biológicas de los ecosistemas. Las personas no tienen otra opción que respirar el aire que hay a su alrededor. Cuando el aire está contaminado, las personas respiran ozono, partículas y gases peligrosos que pueden dañar los pulmones, corazón, y atentar contra la salud en general.

El inconveniente de la evaluación del aire radica en los cambios meteorológicos de las regiones, en función de los desarrollos urbanos, industriales, lo que puede dificultar la inclusión del aire en la evaluación de un pasivo ambiental.



3.2 Calidad del aire y emisiones

La emisión atmosférica, es la descarga directa o indirecta de sustancias al aire, y se mide o estima, para cada fuente o actividad en particular, siendo atribuible a un responsable o un emisor. Cualquier actividad industrial genera emisiones, así como la vida cotidiana. Sin la urgencia del muestreo para la detección, disponer de una herramienta informática para predecir emisiones y difusión de contaminantes es sumamente útil para realizar estudios de impactos ambientales que incluyan la variable aire.

Como ya se dijo, las emisiones totales de una instalación, o unidad, vienen dadas no sólo por las emisiones normales que salen de las chimeneas y conductos, sino también por las emisiones difusas, fugitivas y excepcionales. Conforme se ha progresado en la reducción de las emisiones canalizadas la importancia relativa de las otras emisiones ha ido creciendo, por ejemplo ahora se le presta una mayor atención a la importancia relativa de las emisiones difusas y fugitivas.

Se ha reconocido que estas emisiones pueden provocar potencialmente daños a la salud o al medio ambiente, y que estas pérdidas de fluidos pueden, a veces, tener una importancia económica significativa para la planta. De forma similar, también ha aumentado la importancia relativa de las emisiones excepcionales. Éstas pueden clasificarse en aquellas que ocurren bajo condiciones previsibles y aquéllas que ocurren bajo condiciones imprevisibles.

3.3 Regulaciones legales

3.3.1 Ley Nacional 20.284

- **Contaminación Atmosférica.**

La ley establece estándares de calidad tabulando concentraciones máximas de contaminantes que no se podrán superar, como se ve en la Tabla 3.4.1: Anexo II:-Concentraciones máximas de contaminantes emitidos estipuladas en la ley 20284. Como puede observarse no se contemplan en la norma parámetros de CO₂ ni de CH₄. La ley 24051-Residuos peligrosos, también sienta bases en cuanto a proceder en caso de derrames incluyendo la geografía. La Ley 19587



sienta requisitos toxicológicos, tiempo de exposición, etc., pero clasifica al CH₄ como un asfixiante simple, que es la definición clásica, sin embargo en EEUU ya se han sentado nuevas ópticas de análisis considerando los efectos crónicos de la exposición constante.

3.3.2 Parámetros OMS

Según la OMS:

- La contaminación atmosférica constituye un riesgo medioambiental para la salud y se estima que causa alrededor de dos millones de muertes prematuras al año en todo el mundo.
- Cuanto menor sea la contaminación atmosférica de una ciudad, mejor será la salud respiratoria (a corto y largo plazo) y cardiovascular de su población.
- Se calcula que la contaminación del aire de interiores causa aproximadamente 2 millones de muertes prematuras, la mayoría en los países en desarrollo.

En general el enfoque sobre la calidad de aire se centra más en el gran aporte de polos industriales y las ciudades demográficamente más importantes, y no en los posibles aportes de actividades que se desarrollan de forma peregrina como lo es la actividad hidrocarburífera.

**Tabla 3.4.1: Anexo II :-
Concentraciones máximas de
contaminantes emitidos estipuladas
en la ley 20284.**

| ANEXO II | | | | | Contaminante | Método de muestreo | Método de análisis |
|--|---|---|--|--|--------------------------------|--|--|
| Contaminante (unidad) | Norma calidad de aire | Alerta | Alarma | Emergencia | | | |
| CO (1) (ppm) | 10 ppm - 8 hs. 50 ppm - 1 h. | 15 ppm - 8 hs. 100 ppm - 1 h. | 30 ppm - 8 hs. 120 ppm - 1 h. | 50 ppm - 8 hs. 150 ppm - 1 h. | CO | | Analizador infrarrojo modificado. Jacobs, M. B. y colaboradores: "Determinación continua de CO en aire mediante un analizador infrarrojo modificado. (Air Pollution Control Association Journal, 9:110, 1959). |
| NO x (2) (ppm) | 0,45 ppm - 1 h. | 0,6 ppm - 1 h. 0,15 ppm - 24 hs. | 1,2 ppm - 1 h. 0,3 ppm - 24 hs. | 0,4 ppm - 24 hs. | NOx | Absorción en medio líquido. | Griess-Saltzman. Saltzman, B. E.: "Determinación colorimétrica del NOx en la atmósfera", Anal. Chem. 26:1949 (1954). |
| SO2 (3) (ppm) | 0,03 ppm (70 ug/m3) (promedio mensual) | 1 ppm - 1 h. 0,3 ppm - 8 hs. | 5 ppm - 1 h. | 10 ppm - 1 h. | SO2 | Absorción del gas en medio líquido. | Modificación de Pate del método West-Gaeke. West, P. E. y Gaeke, G. C.: "Fijación del SO2 como disulfitomercurate y posterior evaluación colorimétrica", Anal. Chem. 28:1816 (1956). Pate, J. B.: "Interferencia de nitrilos en la determinación espectrofotométrica del SO2 atmosférico", Anal. Chem. 37:942 (1965). |
| O3 (y oxidantes en general) (4) (ppm) | 0,10 ppm - 1 h. | 0,15 ppm - 1 h. | 0,25 ppm - 1 h. | 0,40 ppm - 1 h. | O3 y oxidantes | Absorción del gas en medio líquido. | Buffer neutro, ioduro de potasio. ".Selección de métodos para medición de contaminantes atmosféricos", Interbranch Chemical Advisory Committee. PHS, publicación número 999, AP 11 Cincinnati, Ohio, 1965 PD-1. |
| Partículas en suspensión (mg/m3) (5) | 150 ug/m3 (promedio mensual) | No aplicable | No aplicable | Idem | Partículas en suspensión | Filtración con bombas de alto volumen. | Gravimetría. "Análisis de partículas en suspensión", Network 1957-61, PHS, publicación número 978, Washington D.C. |
| Partículas sedimentables (6) (mg/cm2 30 días) | 1,0 mg/cm2 30 días | Idem | Idem | Idem | Partículas sedimentables | Captación en cilindros abiertos. | Gravimetría. "Método normalizado para el análisis continuo de polvo sedimentable" (APM-1 Revisión 1). Air Pollution Measurement, Committee Air Pollutions Control Association, 16:372 (1966). |

El elemento que aumenta considerablemente el riesgo de esta actividad, es que las condiciones climáticas varían, y el riesgo que pueda proporcionar una emisión puede ser más que peligroso, dado la imprevisibilidad del comportamiento climático.

3.4 Emisiones

Hasta el momento se ha venido hablando de emisiones, pero cabe aclarar que en la bibliografía del tema a tratar aparecen definiciones de lo que se considera o no una emisión.

Las emisiones generadas durante la operación normal en las instalaciones provienen de:



- Venteo y combustión en los diferentes quemadores (elevados, de emergencia, en piso-fuera del alcance).
- Las emisiones generadas en las actividades de mantenimiento.
- Las emisiones que ocurren por accidentes y por perturbaciones del sistema.

En la industria *Upstream* se puede encontrar diversidad de emisiones; este estudio se abocará a las emisiones ocurridas en situación de emergencias y a aquellas que ocurren en forma constante como parte del proceso.

En este trabajo, se presentarán dos frentes de interés, por un lado, la intención de computar las pérdidas por vaporización de hidrocarburos y por otro las emisiones fugitivas o accidentales, con el objetivo de maximizar la recuperación de hidrocarburos y de disminuir las emisiones al ambiente.

Para realizar el cómputo de emisiones se deberá identificar las instalaciones, la distribución y equipos de las instalaciones de superficie. Una vez clasificadas el tipo de instalaciones, se deben computar las pérdidas intermitentes de COV⁵.

La tendencia en cuanto a cuidados medioambientales es la de reducir emisiones más que remediar. Por ese motivo, se tiende a cuantificar las pérdidas. Además, en la ley provincial 1875 se pide un sistema de captación. La forma de cuantificar hidrocarburos volátiles en forma teórica es a través de normativas, que pueden aplicarse aún sin haber hecho mediciones.

La Norma API 19 establece parámetros para el cálculo de emisiones, estableciendo parámetros que junto a los compendios API serán incorporados a la herramienta informática a desarrollar.

Existen en el mercado programas computacionales (software) para este tipo de prestación, que servirán para la validación de la herramienta que se ha desarrollado para este trabajo. Si bien hay *softwares* disponibles, el error de ponderación varía mucho de un programa a otro.

⁵ Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 19-Evaporative Loss Measurement Section I-Evaporative Loss from Fixed-Roof Tanks THIRD EDITION, MARCH 2002



3.5 Efectos de la contaminación sobre la salud

3.5.1 Riesgos asociados al ingreso por vía respiratoria

Como se ha mencionado en los objetivos, los contaminantes analizados fueron el CO₂ emitido sin combustión, dado que el gas sin tratar contiene CO₂ en diferentes proporciones según el yacimiento, y el CH₄, componente principal del gas natural en altos porcentajes, y si bien el gas natural no es un gas considerado como tóxico, sino que por desplazamiento de oxígeno podía generar asfixia, algunos estudios indican que la exposición crónica puede generar anomalías a nivel respiratorio, disminuyendo por ende la calidad de vida.

3.5.2 Dióxido de Carbono-Efectos sobre la Salud

El dióxido de Carbono (CO₂) está presente naturalmente en la atmósfera a niveles de aproximadamente 0.035%. La exposición a corto plazo de CO₂ a niveles por debajo del 2% (20000 partes por millón o ppm) no ha reportado provocar efectos nocivos. Concentraciones más altas pueden afectar la función respiratoria y provocar excitación seguida por depresión del sistema nervioso central. Altas concentraciones de CO₂ pueden desplazar oxígeno en el aire, resultando en concentraciones de oxígeno menores para la respiración. Por lo tanto, los efectos de la deficiencia de oxígeno pueden combinarse con efectos de toxicidad de CO₂.

Los umbrales de tolerancia se determinaron con exposición de voluntarios al contaminante, a continuación se muestran conclusiones de trabajos publicados en internet. Tomando como referencia datos de investigación: “En líneas generales de ensayos tipo se determina que voluntarios expuestos a 3.3% ó 5.4 % de CO₂ durante 15 minutos experimentaron profundidad aumentada de respiración. A 7.5%, una sensación de inhabilidad para respirar (disnea), ritmo aumentado del pulso, jaqueca, mareos, sudor, fatiga, desorientación y distorsión visual desarrollada. Veinte minutos de exposición a 6.5 ó 7.5% disminuyen el rendimiento mental. Se reportó irritabilidad y malestar con exposiciones a 6.5% por aproximadamente 70 minutos. Exposición a 6% por varios minutos, o 30% por 20-30 segundos, afectaron el corazón, según lo prueban los electrocardiogramas alterados. Las personas expuestas brevemente a concentraciones muy altas mostraron daño en la retina, sensibilidad a la luz (fotofobia), movimientos oculares anormales, constricción de los campos visuales, y agrandamiento de puntos ciegos. Exposiciones hasta 3.0% por más de 15 horas,



por seis días, resultaron en visión nocturna disminuida y sensibilidad al color. Exposición a 10% por 1.5 minutos provocó parpadeo ocular, excitación y actividad muscular aumentada y contracción. Concentraciones superiores al 10% provocaron dificultad para respirar, audición deficiente, náuseas, vómitos, sensación de estrangulamiento, sudor, estupor por varios minutos con pérdida de conciencia a los 15 minutos. Exposiciones al 30% rápidamente resulta en inconsciencia y convulsiones. Varias muertes se atribuyeron a la exposición a concentraciones superiores del 20%. Los efectos del CO₂ pueden ser más pronunciados con esfuerzo físico, tal como trabajo pesado”.

El gas CO₂ no es irritante para la piel. El contacto con CO₂ líquido puede provocar congelamiento. Los síntomas de congelamiento incluyen entumecimiento, ardor y picazón en el área afectada. Los síntomas de congelamiento más severos, incluyen sensación de quemazón y rigidez del área afectada. La piel puede volverse amarilla o blanca serosa. Ampollas, muerte tisular y gangrena pueden también desarrollarse en casos severos. La exposición a muy altas concentraciones de gas puede provocar una sensación punzante. Inhalación de altas concentraciones de CO₂ ha reportado producir efectos en la visión.

3.5.3 Metano -Efectos sobre la Salud

El gas CH₄ es asfíxiante en concentraciones altas. La vía de acceso es por inhalación. No se conocen actualmente efectos crónicos sobre la salud con respecto al metano, aunque en EEUU se están estudiando (Ej. de población expuesta: Personal que carga de GNC en las estaciones de servicio).

3.6 Efectos fisiológicos sobre las personas

Los datos epidemiológicos permiten cuantificar las respuestas y establecer la relación existente entre la contaminación del aire y la salud de la población, aunque por su naturaleza observacional generalmente resulta difícil evaluar la repercusión que sobre las afectaciones de la salud pueden tener diversos factores y características que actúan de forma simultánea, y pueden modificar las relaciones causales objeto de análisis.

A pesar de la complejidad, para el caso de los gases analizados el agravante es que es muy difícil adjudicar algún factor que afecte a la salud respiratoria con la actividad hidrocarburífera,



dado que el sector tiene un campo de aplicación fragmentado y la población expuesta no siempre es numerosa para poder realizar un muestreo y un seguimiento responsable.

A medida que las urbanizaciones se han desplazado cada vez más a zonas que eran de explotación petrolera, se ha generado una interacción actividad-población que amerita un seguimiento y cuidados muchos más intensos.



4. Capítulo 4: Cómputo de emisiones

Para la industria en cuestión, los tipos de emisiones identificadas que se desarrollarán son las emisiones directas y las emisiones fugitivas.

4.1 Procesos que generan emisiones directas

Sólo se plasmarán aquellas instalaciones de la Industria que serán evaluadas en este trabajo. Procesos de emisión y fuentes de venteo:

- Deshidratación con glicol
- Productos almacenados de gas y petróleo
- Alivio de válvulas
- *Shut downs* de emergencia

4.1.1 Deshidratación con glicol

Uno de los procesos de acondicionamiento del gas natural es la deshidratación con glicol. Este tipo de procesos opera en forma continua y requiere regeneración del glicol. Se absorbe metano, y este metano se libera en la regeneración. El gas de *stripping* (despojamiento) también se puede introducir en el regenerador para ayudar a despojar el agua y otros compuestos absorbidos en el glicol. Emisiones de metano no controladas en unidades de glicol se producen porque el metano eliminado de la corriente de glicol pasa directamente a través del regenerador y se ventila a la atmósfera. Algunos sistemas de deshidratación con glicol usan un tanque *flash* (tanque de vaporización súbita), que trabaja a menor presión que la presión de operación de la torre contactora, lo que ocasiona liberación de hidrocarburos livianos que vaporizan en el equipo, lo cual puede ser una importante fuente de emisión de metano.



4.1.2 Bombas de glicol

Las bombas de glicol también pueden ser fuente de emisiones, dado que las bombas pueden aportar grandes cantidades de emisiones de metano ya que usan gas de servicio y gas que se va disuelto luego del absorbedor en el glicol y se ventea en el regenerador.

4.1.3 Almacenamiento de gas y petróleo: Pérdidas por flasheo de crudo

A alta presión, el crudo puede contener gas disuelto del reservorio. Sin embargo, en superficie, el almacenamiento de los mismos se efectúa a presión atmosférica.

En tanques de almacenamiento con techo fijo pueden ocurrir emisiones de metano (CH_4) y eventualmente de CO_2 (dióxido de carbono) a través de *flasheos* (desprendimiento de gases por despresurización súbita). Otras pérdidas en la etapa de almacenamiento pueden producirse por la forma de operar y por la volatilización de hidrocarburos en equilibrio termodinámico.

Los venteos en tanque pueden evaluarse de la siguiente manera:

- Medición directa de venteo: Es el método más conveniente aunque es caro e insume mucho tiempo si hay muchos tanques.
- Medición en laboratorio: Se mide el GOR de un líquido presurizado, luego se multiplica el GOR por la salida de crudo y aplicamos por la composición de CH_4 y CO_2 para estimar las emisiones, representa la misma desventaja que la medición directa.
- *Software* específicos: Existen algunos *softwares*, como el *E&P TANK* que incluyen temperatura, presión atmosférica, etc.
- Simuladores de procesos: Algunos simuladores pueden estimar las pérdidas por flasheo.
- Ecuaciones de correlación: Vásquez- Beggs y la correlación de Standing, tienen incluida las aproximaciones para la evaluación de pérdidas por *flasheo* en tanques.
- Cartas de aproximación: basado en la presión y la gravedad API.
- Factores de emisión: E&P Tanks tiene factores de emisión incluidos en su rutina de cálculos.



A continuación se expresan ecuaciones para estimar pérdidas en tanques por vaporización

- Correlación de Vasquez- Beggs

El primer paso para calcular las pérdidas por *flasheo* de crudo para calcular la gravedad específica del gas a 100 psig.

$$SG_x = SG_1 \times \left[1 + 0.00005912 \times API \times T_i \times \text{Log} \left(\frac{P_1 + 14.7}{114.7} \right) \right] \quad \text{Ecuación 4.1.3.1}$$

Donde

SG_x= Gravedad de gas a 100 psig

SG₁= Gravedad del gas a condiciones iniciales. Se sugieren SG₁=0.9.

API= Gravedad del hidrocarburo líquido a las condiciones finales.

T₁= Temperatura a condiciones iniciales °F

P₁= Presión a condiciones iniciales (psig)

El flash del GOR es calculado usando la ecuación:

$$R_s = C_1 \times SG_x \times (P_1 + 14.7)^{C_2} \times \exp \left(\frac{C_3 \times API}{T_1 + 460} \right) \quad \text{Ecuación 4.1.3.2}$$

Donde,

$$R_s = \text{Produccion de Gas por barril de crudo almacenado} \frac{scf}{bbl} @60^\circ F$$

SG_x= Gravedad del gas disuelto, ajustada a 100 psig.

P₁= Presión en el separador, psig.

API= Gravedad API del tanque stock de crudo a 60°F

T₁= Temperatura en el separador °F

Para crudos con API < 30°API , C₁= 0.0362, C₂=1.0937 y C₃=25.724

Para crudos con API > 30°API, C₁= 0.0178, C₂=1.187 y C₃=23.931

Las emisiones de gases estimadas con la ecuación de estado de Vásquez – Beggs, son en términos de contenido total de hidrocarburos, por lo cual, para poder hacer una estimación de CH₄, necesita de una estimación adicional.



Estudios publicados⁶ evaluando las pérdidas de gas, concluyen que el arrastre de CH₄ es 27.4% en volumen de la corriente de venteo en promedio.

El *flasheo* de CH₄ debe contemplar también el CH₄ contenido en el tanque. Si no se conoce el contenido de CH₄ del crudo almacenado, una buena estimación sugerida es considerar 27.4% en el total de las emisiones contabilizadas. También de diferentes evaluaciones a nivel de distintas compañías en el mundo, se han obtenido factores de emisión aproximados para el *flasheo* de crudo en tanques. Para obtener por cálculo un cómputo de emisiones de CH₄ por *flasheo* existen varios métodos como se han descripto anteriormente.

Cabe aclarar que en diferentes segmentos del proceso se pueden acumular condensados, que pueden ocasionar pérdidas intermitentes de CH₄ a medida que el condensado es llevado a condiciones atmosféricas. Pequeñas cantidades de condensados se pueden acumular en compresores y puntos bajos de cañerías.

- **Factores de emisión de *flasheo* por default en producción de condensado**

5.068 lb CH₄/bbl condensado +/-101%

0.0023 tonnes CH₄/bbl condensado +/-101%

0.0145 tonn CH₄/m³ condensado +/- 101%

Intervalo con 95% de confianza.

- **Factores de emisión de flasheo de condensados emitidos por transmisión**

160000 scf CH₄ por año/1.75x10⁹ bbl/día

5.29x10⁻¹² tonn CH₄/bbl (convertido)

4.8x10⁻¹² tonn CH₄/bbl (convertido)

Si el volumen de crudo es bajo, se pueden aplicar reglas del pulgar como la siguiente:

$$V_S = 0.0257 \times V_0 \times \Delta P \text{ Ecuación 4.1.3.4}$$

⁶ Ogle- marzo 1997;Piccard-Vol III-1992

Donde

V_s = Volumen de alivio, m^3

V_0 = Volumen de crudo producido, m^3

ΔP = Caída de presión en tanque atmosférico, kPa

Similar a la ecuación VBE y la ecuación de Standing, los cálculos anteriores deben ser convertidos a emisiones de CH_4 .

También se pueden obtener valores de cartas⁷.

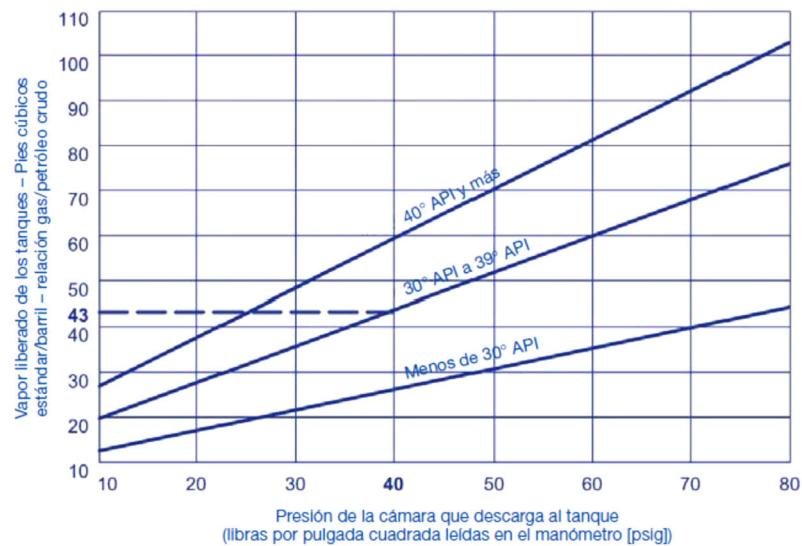


Fig.4.1.3 Vapor liberado en tanques (ft3) vs. Presión de cámara que descarga al tanque (lb/in2 manométricas (psig))

4.1.4 Pérdidas evaporativas en tanques con techos fijos

Bajo los lineamientos de la Norma API 19, las pérdidas por evaporación de hidrocarburos almacenados se estimarán en pérdidas por año.

$$LT \text{ (pounds per year)} = L_s \text{ (pounds per year)} + L_w \text{ (pounds per year)} \quad \text{Ecuación 4.1.3.5}$$

⁷ Gráfico de Compendio API 2009 de GHC.



Donde L_s son las pérdidas por almacenaje y L_w las pérdidas operativas.

Para estimar las pérdidas por almacenaje, la información mínima según Norma que se requiere es la siguiente:

- Diámetro de Tanque
- Altura de la envolvente del tanque
- Tipo de techo (cónico o domo)
- El color de la superficie exterior del tanque
- Ubicación del tanque
- Tipo de Stock
- Temperatura de almacenamiento
- Presión de vapor de almacenamiento
- Nivel de llenado del tanque

Estimaciones más precisas de las pérdidas por almacenamiento pueden lograrse obteniendo como datos extras los siguientes:

- La pendiente o radio de curvatura del techo del tanque, según este sea cónico o cóncavo, respectivamente.
- La presión de ajuste de las válvulas de presión y vacío ubicadas en el techo.
- La temperatura ambiente promedio diaria.
- El aislamiento solar total diario sobre una superficie horizontal.
- Peso molecular del vapor.
- Temperatura de la superficie del líquido almacenado.

La pérdida de almacenamiento permanente, L_s , se refiere a la pérdida como resultado de la respiración del tanque (movimiento del espacio de vapor).

La pérdida de almacenamiento puede ser estimada a partir de la ecuación siguiente:

$$L_S = 365 \times K_E \times H_{VO} \times \left(\frac{\pi}{4} \times d^2\right) \times K_S \times W_v \quad \text{Ecuación 4.1.3.6}$$

Donde

$K_E = \text{Factor de expansión del espacio de vapor}$

$$K_E = 0.04$$



Aunque una forma más precisa sería:

$$K_E = 0.0018 \left[\frac{1}{\theta_R} \right] \times \Delta T_V \text{ Ecuación 4.1.3.7}$$

$$\Delta T_V = 0.72 \times (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) + 0.028 \times \alpha \times I \text{ Ecuación 4.1.3.8}$$

Cuando la absorbancia α es conocida para el color del tanque e I la aislación del tanque es conocida también.

ΔT_V = Promedio de las temperaturas ambiente máxima y mínima.

Corte espacio de vapor H_{v0}

$$H_{V0} = H_S - H_L + H_{R0} \text{ Ecuación 4.1.3.9}$$

Factor de saturación del vapor venteado K_S

$$K_S = \frac{1}{1 + 0.053 \left[\frac{1}{\text{psi} \times \text{ft}} \right] \times P_{VA} \times H_{V0}} \text{ Ecuación 4.1.3.10}$$

Densidad del vapor almacenado W_v

$$W_v = \frac{M_V \times P_{VA}}{R \times T_{LA}} \text{ Ecuación 4.1.3.11}$$

4.1.5 Pérdidas evaporativas operativas

En el llenado y vaciado del tanque se pierde producto. El procedimiento de cálculo para pérdidas operativas será la siguiente:

$$L_w = N \times H_{LX} \times \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \times K_N \times K_P \times K_B \times W_v \text{ Ecuación 4.1.3.12}$$

$$N = \frac{5.614 \times Q}{\left(\frac{\pi}{4} \right) D^2 \times H_{LX}} \text{ Ecuación 4.1.3.13}$$

- Emisiones producidas en tanques con agua de formación

En condiciones aeróbicas, las bacterias consumen nutrientes emitiendo CO_2 , por eso es muy importante en este tipo de instalaciones preservar el sistema inyectando gas de *blanketing* y lo agregando productos químicos luego de una caracterización del sistema.



- **Emisiones de CH₄ en agua producida de gas de pozo**

En producción los pozos de gas tienen agua asociada, esto es de vital importancia a la hora de contemplar las posibles emisiones en los separadores, ya que el agua de formación puede arrastrar CH₄.

- **Emisiones de CH₄ en tanques que utilizan gas de blanketing**

El gas de blanketing se usa generalmente para desplazar el aire sobre la superficie de los líquidos evitando así el contenido de oxígeno que promuevan un ambiente propicio para el desarrollo de bacterias.

$$E_x = \text{Caudal}_x \text{Mwx} / V_{\text{molar}} \quad \text{Ecuación 4.1.5}$$

Donde

- E_x= Emisiones de “x” en unidades de masa (lb,kg,tonn) por unidad de tiempo.
- “x”=El GHG compuestos de interés (CH₄ ó CO₂, para corrientes de CO₂ rico).
- V_R= El venteo en unidades de volumen en condiciones STP por unidad de tiempo (scfm ó m³/min).
- MW_x=Peso molecular del compuesto x
- Volumen molar= Conversión de volumen molar a masa (379.3 scf/lbmol ó 23.685 m³/kmol)

La aplicación de gas de *blanketing* es más una operación discontinua que continua, por tal motivo el valor V_R, que es el venteo en unidades de volúmenes por unidad de tiempo se evalúa en promedio diario.

4.2 Procesos en los que se generan Emisiones fugitivas

Entre las fuentes de emisiones fugitivas relativas a los sistemas de petróleo y gas se incluyen, las fugas de los equipos, la evaporación y las pérdidas por descarga, el venteo, la quema en antorcha, la incineración y las liberaciones accidentales (p. ej., excavaciones en los ductos, fugas de pozo y derrames).



Mientras que algunas de estas fuentes de emisiones son parte de los procesos (p. ej., venteo de tanque, sello y proceso y sistemas de quema en antorcha) y, por lo tanto, están caracterizadas relativamente bien, la cantidad y composición de las emisiones suelen estar sujetas a una incertidumbre significativa. Aunque se implemente un sistema de medición, habrá siempre puntos ciegos en los controles. Incluso si se hace un seguimiento de algunas de estas pérdidas o flujos como parte de los procedimientos rutinarios de contabilización de la producción, suele haber incoherencias en las actividades que se justifican si las cantidades se basan en las estimaciones o mediciones tecnológicas.

Si las emisiones son fugitivas, y no se considera combustión de metano, la forma para calcular dichas emisiones será:

$$E_{g,s} = V_s * FE_s \quad \text{Ecuación 4.2.1}$$

Dónde:

$E_{g,s}$
= Emisiones fugitivas del gas de efecto invernadero g por la actividad del segmento s (kg de gEI)

V_s = Valor que caracteriza el volumen de actividad del segmento s (Unidad de actividad)

FE_{gs} = Factor de emisión estándar de gas g en la actividad del segmento s $\left(\text{kg} \frac{\text{GEI}}{\text{Unidad}} \text{ de actividad} \right)$

4.2.1 Gas de Servicio

Dentro de las posibles emisiones encontramos que las instalaciones de superficie utilizan instrumentación neumática para accionar diferentes dispositivos relacionados con el sistema de control.

El volumen de trabajo se calcula de la siguiente forma:

$$V = 16330 \times \left[1 + \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] \times d^2 \times \sqrt{H(29.32 + (0.3 \times H))} \times \sqrt{\frac{520}{460+T_f}} \times \sqrt{\frac{10000}{G}} \quad \text{Ecuación 4.2.2}$$

Donde

V= Flujo de Gas, scf/d



d= Diámetro de orificio, in

D= Diámetro interno de tubería, in

H= Presión, inHg

T_f= Temperatura de gas, °R

G=SG@60°F

En producción se priorizan los cambios climáticos que influyen notablemente en las emisiones posibles.

4.2.2 Gas combustible para accionamiento de bombas de inyección de químicos

En la industria se dosifican productos químicos en diferentes puntos del proceso a través de bombas dosificadoras. Estas bombas en general son de accionamiento neumático.

$$V_G = \left(\frac{P_0 + P_A}{14.74} \right) \times \left(\frac{T_A}{459.7 + T_G} \right) \times V_L \times (1 + I) \quad \text{Ecuación 4.2.2}$$

Dónde:

V_G= Pérdidas de gas en motores en bombas neumáticas scf/año

P₀=Presión de salida de la bomba, psig

P_A=Presión atmosférica, psig , 14.7 psig

T_G=Temperatura del gas, °F y T_A: Temperatura ambiente

V_L= Volumen de líquido bombeado, ft³/año

(1+I)= Ineficiencia de la bomba, dada por el fabricante o asumida en 30%.

4.3 Emisiones no rutinarias

Hay actividades no rutinarias que emiten CH₄, y posibilidad de emisión de CO₂.

- Mantenimiento y actividades no planeadas
- Otras actividades no planeadas



- *Blowdown*

4.3.1 Venteo frío

Se le llama venteo frío a los venteos sin combustión. Estos venteos llevan CH₄ y CO₂. Estos venteos pueden ser continuos o intermitentes.

En el caso de los venteos intermitentes, se deben a la necesidad de ventear dado lo remoto del campo de procesamiento de gas.

4.3.2 Shut down - Situaciones de emergencias

Cuando los equipos de procesos por algún motivo deben despresurizarse, o se produce un *shut down* de emergencia, se producen venteos. Enfatizar que la complejidad de emisiones a la atmosfera no se pueden recolectar para medirlas.

$$E_{CH_4 \text{ ó } CO_2} = \frac{\text{Volumen de Gas venteado}}{\text{Evento}} \times \% \text{Molar } CH_4 \text{ ó } CO_2 \times \frac{\text{Evento}}{\text{año}} \times \frac{MW_{CH_4 \text{ ó } CO_2}}{\text{Conversion volumen molar}}$$

Ecuación 4.3.2

Dónde:

$E_{CH_4 \text{ ó } CO_2}$ = Emisiones de CH₄ ó CO₂ en unidades de masa

Volumen molar = Conversión de volumen molar a masa (379.63 scf/lbmol ó 23.685 m³/kmol @60°F y 14.7 psia). El volumen venteado se calcula en función de la geometría del recipiente, sin embargo, si no se cuenta con datos para el cálculo, se puede usar valores estimados.

4.4 Esquemas de procesos de gas y petróleo

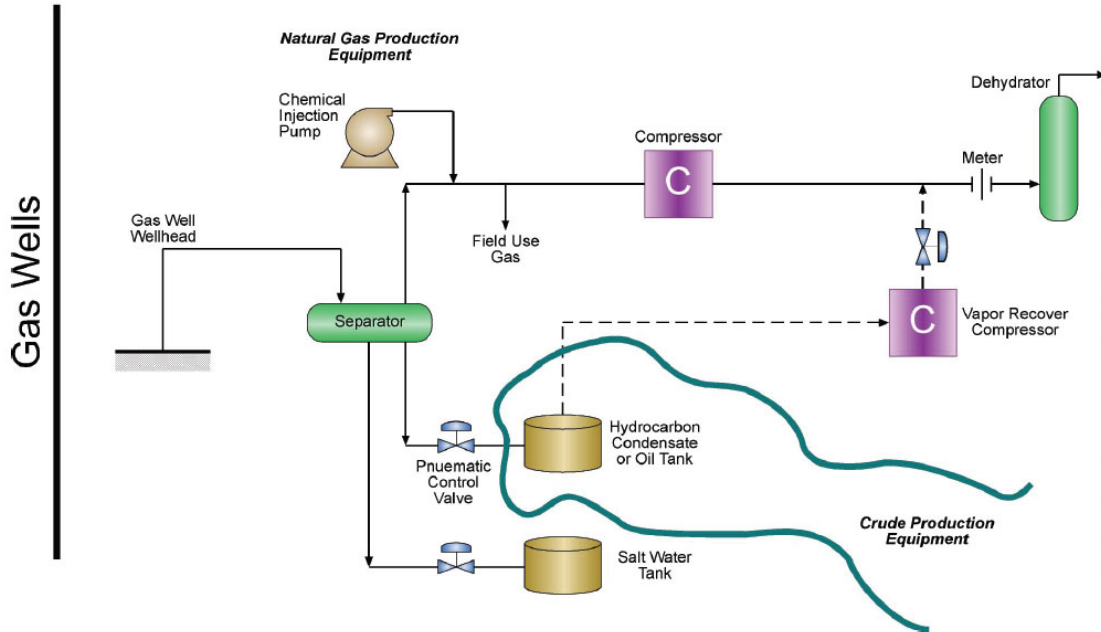


Fig.4.4 Esquema de Procesos de Gas

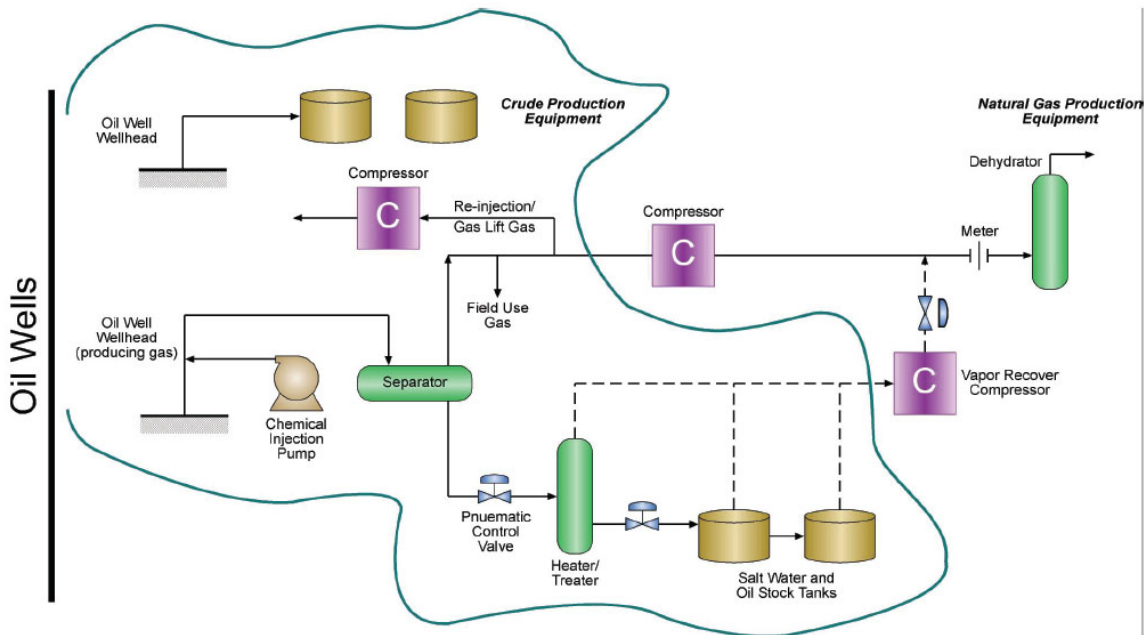


Fig.4.5 Esquema de Procesos de Petróleo



Los factores de emisión propuestos están basados en experiencias y mediciones. Dado que la mayoría de las compañías no tienen evaluadas estas emisiones, se trabajará con los factores de emisión propuestos por el compendio API.

La mayoría de las emisiones de CH₄ y CO₂ de crudo ocurren en tanques de almacenaje como resultado del *flasheo*, llenado y vaciado y respiración, aunque son pérdidas muy pequeñas y virtualmente inexistentes en segmentos *downstream*.



5 Capítulo 5: Modelos de dispersión

5.1 Generalidades

En la operación de Instalaciones de Superficie se producen emisiones, tal como se ha mencionado en capítulos precedentes. Cuando se produce una emisión de un gas o vapor a la atmósfera, ya sea procedente de una fuga de gas propiamente dicha ó como consecuencia de la evaporación de un charco de líquido, dicho gas en contacto con la atmósfera sufre una dispersión por dilución del gas en la atmósfera y se extiende en ella arrastrado por el viento y las condiciones meteorológicas.

La dispersión de las emisiones puede ocasionar que los contaminantes emitidos lleguen a lugares que pudieran afectar la salud de las personas. Los tipos de emisiones producidas dependen de la naturaleza del gas (propiedades termodinámicas) y de la continuidad o discontinuidad de la emisión.

La predicción de dispersión de contaminantes puede efectuarse con modelos matemáticos (ecuaciones gaussianas) que incluyen en sus fórmulas factores meteorológicos, propiedades y características de los contaminantes y geografía en donde se desarrollan los procesos y se ubican los asentamientos urbanos.

Para aplicar fórmulas de dispersión un dato fundamental son los factores de emisión de cada contaminante. Los factores de emisión utilizados serán obtenidos de compendios internacionales, propuestos y utilizados para instalaciones asociadas a producción y procesamiento de Gas y Petróleo.

5.2 Variables que afectan la dispersión

Los factores que influyen en el comportamiento de los gases son múltiples y variables en el tiempo y una mezcla gas/aire puede evolucionar como un gas pesado sin serlo debido a:

- Peso molecular del gas.
- Temperatura del gas.
- Temperatura y humedad del aire ambiente.
- Presencia de gotas líquidas arrastradas en la emisión.
- Reacciones químicas en la nube, etc. (fuera del alcance)



Figura 5.1: Pluma de Venteo de Planta de Recuperación de Condensables en Cuenca Neuquina

Algunas de las variables que influyen en la dispersión de contaminantes en aire son las siguientes:

- Factores meteorológicos: Estabilidad atmosférica
- Viento: dirección predominante, frecuencia e intensidad.
- Factores de emisión: Altura de emisión
- Temperatura y velocidad de salida de gases
- Diseño aerodinámico de la chimenea
- Factores topográficos: Orografía del terreno
- Rugosidad de la superficie , referida a la orografía del lugar

Dado el comportamiento de las moléculas gaseosas, la dispersión es rápida y alta en función del viento y las variables meteorológicas, ambientales, temperatura, presión.

5.3 Modelos matemáticos

Cuando un sistema contiene dos ó más componentes cuyas concentraciones varían de un punto a otro, presenta una tendencia a transferir masa, haciendo mínimas las diferencias de concentraciones dentro del sistema.



La difusión ó transporte molecular no es otra cosa que la transferencia de moléculas individuales a través de un fluido por medio de los movimientos desordenados de las moléculas debido a su energía interna. Las moléculas se desplazan en trayectorias desordenadas, y recorren distancias extremadamente cortas antes de chocar con otras y ser desviadas.

La difusión de emisiones puntuales y fugitivas puede modelarse aplicando la ley de difusión. La ley de difusión de Fick, establece que la difusión molecular es proporcional a la disminución del gradiente de concentración; es decir, para una mezcla gaseosa o líquida de dos componentes A y B, el **vector densidad de flujo J_A de la especie A**, con respecto a un observador que se desplazase con la velocidad media de la corriente, viene dado por

$$J_A = -D_{AB} \times \nabla C_A \quad \text{Ecuación 5.3.1}$$

La densidad de flujo N_A de la especie A, con respecto a un observador estacionario, es:

$$N_A = J_A + x_A(N_A + N_B) = -D_{AB}\nabla C_A + x_A(N_A + N_B) \quad \text{Ecuación 5.3.2}$$

En estas ecuaciones C_A es la concentración del componente A, D_{AB} es la difusividad de A en B, y x es la fracción molar.

El segundo término de la ecuación tiene en cuenta el transporte debido al flujo global mientras que el primero corresponde al transporte difusional superpuesto al flujo global. La difusividad es **una propiedad física** de la dupla de componentes A y B.

Existen valores tabulados para numerosas mezclas binarias de gases en aire a 25°C y 1 atm (101,3 kPa), aunque debe tenerse en cuenta que para gases de la industria hidrocarburífera el valor de referencia es de 15,5°C. Las difusividades para otras mezclas gaseosas o líquidas son más raras y con frecuencia es preciso determinarlas experimentalmente, sin embargo, si no se dispone de datos experimentales, las difusividades en gases a baja presión se pueden calcular por medio de la ecuación empírica de *Fuller, Schettler y Giddings*.

$$D_{BA} = D_{AB} = \frac{0.001 \times T^{1.75} \times (1/M_A + 1/M_B)^{0.5}}{P \times [(\sum V_A)^{1/3} + (\sum V_B)^{1/3}]} \quad \text{Ecuación 5.3.3}$$

(ΣV) es el volumen de difusión para moléculas simples que aparece en la tabla de abajo. Para moléculas más complejas las contribuciones moleculares se pueden obtener sumando las contribuciones atómicas.

Tabla 5.1 Distribuciones y volúmenes moleculares

| Molécula | Suma V | Molécula | Suma V |
|----------------|--------|----------------------|--------|
| H ₂ | 7,07 | N ₂ O | 35,9 |
| D ₂ | 6,7 | NH ₃ | 14,9 |
| He | 2,88 | H ₂ O | 12,7 |
| N ₂ | 17,9 | (CClF ₂) | 114,8 |
| O ₂ | 16,6 | (SF ₆) | 69,7 |
| Aire | 20,1 | (Cl ₂) | 31,1 |
| Ar | 16,12 | (Br ₂) | 67,2 |
| Kr | 22,8 | (SO ₂) | 41,1 |
| CO | 18,9 | CO ₂ | 26,9 |

Los valores entre paréntesis indican que los datos declarados han sido evaluados con pocos datos.

Tabla 5.2: Difusividad de gases en aire a presión atmosférica

| Coeficiente de difusión binaria m ² /s x 10 ⁵ | | | | |
|---|----------------|-----------------|----------------|------|
| T(°K) | O ₂ | CO ₂ | H ₂ | NO |
| 200 | 0.95 | 0.74 | 3.75 | 0.88 |
| 300 | 1.88 | 1.57 | 7.77 | 1.80 |
| 400 | 5.25 | 2.63 | 12.5 | 3.03 |
| 500 | 4.75 | 3.85 | 17.1 | 4.43 |
| 600 | 6.46 | 5.37 | 24.4 | 6.03 |
| 700 | 8.385 | 6.84 | 31.7 | 7.82 |
| 800 | 10.5 | 8.57 | 39.3 | 9.78 |
| 900 | 12.6 | 10.5 | 47.7 | 11.8 |
| 1000 | 15.2 | 12.4 | 56.9 | 14.1 |
| 1200 | 20.6 | 16.9 | 77.7 | 19.2 |
| 1400 | 26.6 | 21.7 | 99.0 | 24.5 |
| 1600 | 33.2 | 27.5 | 125 | 30.4 |
| 1800 | 40.3 | 32.8 | 152 | 37.0 |
| 2000 | 48.0 | 39.4 | 180 | 44.8 |



El transporte molecular de masa ocurre usualmente debido a un gradiente de concentración, pero en algunas ocasiones es debido a un gradiente de temperatura, presión o por la acción de una fuerza impulsora (viento). El mecanismo real de transporte difiere en gran medida entre gases y líquidos debido a las diferencias sustanciales en la estructura molecular de los tres estados físicos.

Las moléculas gaseosas se difunden con mayor facilidad que las moléculas de líquido debido a que las moléculas de gas las primeras tienen pocas moléculas vecinas con las que pueda interactuar y las fuerzas son relativamente débiles; en los sólidos las fuerzas intermoleculares son suficientemente grandes para mantener a las moléculas en una distribución fija.

Por lo tanto los gases se difunden con mayor facilidad que los líquidos y los sólidos. Los fenómenos de transporte tienen lugar en aquellos procesos, conocidos como procesos de transferencia, en los que se establece el movimiento de una propiedad (masa, *momentum* ó energía) en una o varias direcciones bajo la acción de una fuerza impulsora. Si no hay datos experimentales se puede calcular la difusividad en base a la teoría cinética de los gases. Conocer la cantidad de contaminantes emitidas por determinadas fuentes no es suficiente para evaluar cómo se afecta la calidad del aire de una actividad.

En este caso, importa saber las concentraciones de contaminantes en puntos de interés cercanos, por ejemplo áreas habitadas.

5.3.1 Modelos Gaussianos

La ley de Fick explica el fenómeno de difusión molecular, el coeficiente de difusión es isotrópico, es decir, igual en todas direcciones. Esto no suele ser así en el caso de la difusión turbulenta. Los modelos gaussianos son los que se utilizan más ampliamente para estimar la concentración de un **contaminante no reactivo** emitido por una **fente puntual**, por ejemplo, un *flare* (antorcha de venteo) o el escape de un depósito.

La función de los *flares* es descargar los contaminantes a suficiente altura para que puedan dispersarse bien en la atmósfera antes de llegar al suelo. A medida que el contaminante se mueve, se dispersa, los gases se emiten en forma de penacho o pluma.



Los modelos gaussianos pueden suministrar la concentración de contaminantes en diversos puntos en el espacio. Para una fuente puntual y una región llana, esa concentración es dada por:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-h}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+h}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad \text{Ecuación 5.3.1}$$

Dónde:

$C(x,y,z)$: concentración en los puntos de coordenadas (x,y,z) .

Q : tasa constante de emisión ($\mu\text{g/s}$).

σ_y : coeficiente de dispersión horizontal (m).

σ_z : coeficiente de dispersión vertical (m).

u : velocidad constante del viento (m/s).

h : altura efectiva (m).

Los coeficientes de dispersión σ_y y σ_z dependen de la distancia a la fuente emisora y al grado de estabilidad de la atmósfera que a su vez es función de la velocidad del viento y la irradiación solar recibida.

Pueden presentarse situaciones en que el problema de la contaminación se puede modelar como una fuente lineal, continua de emisión infinita.

Cuando la dirección del viento es normal a la línea de emisión, la concentración a nivel del suelo en la dirección del viento está dada por:

$$C(x, 0) = \frac{2 \times Q}{(2\pi)^{1/2} \sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{h}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad \text{Ecuación 5.3.2}$$

Donde Q es la fuerza de la línea por distancia unitaria.

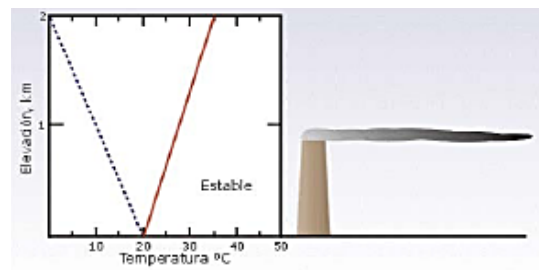
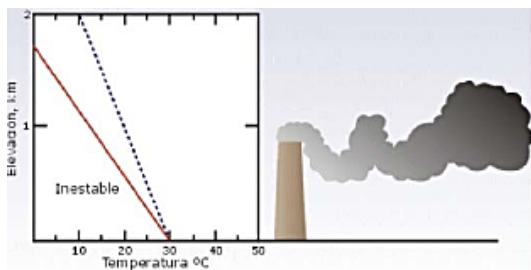
Cuando la dirección no sea perpendicular a la fuente lineal, se sugiere que la ecuación anterior se divida por $(\text{sen } \varphi)$ donde φ es el ángulo entre la fuente lineal y la dirección del viento. Esta corrección puede no ser usada cuando φ sea menor de 45 grados.

En el caso de partículas, a causa de la gravedad, será necesario usar una corrección a la magnitud h en la ecuación de dispersión gaussiana para la deposición general del material particulado. La distancia de caída libre de una partícula con una velocidad terminal o de asentamiento Vt es simplemente $Vt t$; donde t es el tiempo que le toma a la corriente principal del contaminante para alcanzar una distancia x en la dirección del viento.

El tiempo t se expresa también por x/u (*Espacio/velocidad*). Por tanto, la distancia de caída libre que es necesario aplicar como corrección a H es $Vt x/u$. La concentración a nivel del suelo a lo largo de la línea central tiene un especial interés. Haciendo $y=0$ y $z=0$, se encuentra que:

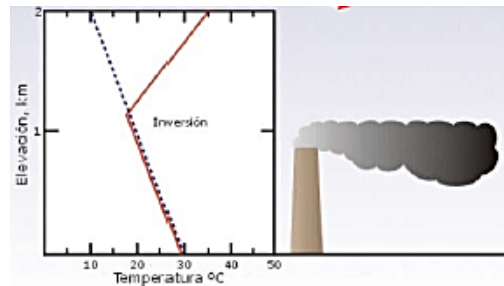
$$C(x, 0, 0, H) = \frac{Q_p}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{H - \left(\frac{Vt x}{u}\right)}{\sigma_z}\right]^2\right\} \quad \text{Ecuación 5.3.3}$$

donde Q_p es la tasa de emisión de las partículas. En general, Q_p se puede expresar en unidades tales como gramos por segundo, con σ_y y σ_z en metros y u en metros por segundo, Q_p se refiere a un tamaño específico de partícula con una velocidad terminal Vt . Según factores meteorológicos, el transporte y la dispersión pueden verse afectados. En los siguientes esquemas se representan diferentes tipos de pluma según la meteorología:



Pluma serpenteante (a)

Pluma de Abanico (b)



Pluma de Fumigación (c)

Figura 5.2 (a,b,c) : Distintos tipos de plumas

En el primer gráfico, la pluma corresponde a condiciones atmosféricas inestables, en el segundo, condiciones estables, y el último corresponde a Inversión térmica, que es el fenómeno por el cual se invierte la escala térmica, que naturalmente marca las temperaturas menores hacia arriba.

Además de las variables meteorológicas, también influye la geometría del sistema, altura de la fuente de emisión y velocidad de salida de los fluidos. En los gráficos siguientes puede verse esquemáticamente este efecto:

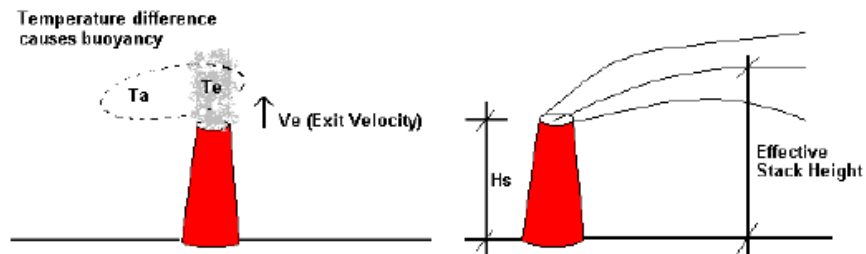


Fig 5.3: Esquema efecto de altura de fuente de emisión y velocidad de gases de salida.

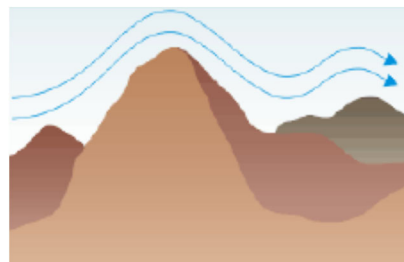


Fig.5.4: Esquema de Influencia de Orografía en la difusión



5.4 Software para modelización

La dispersión de contaminantes se modelará en base a simulación de emisiones en una planilla de cálculo desarrollada para la presente tesis, programada en función de estándares internacionales y ecuaciones de dispersión, contraponiendo los resultados para su validación con simuladores comerciales disponibles.

Los simuladores comercialmente disponibles son algunos provistos por EPA (*Environmental Protection Agency*) u organismos de reconocimiento internacional, así como simuladores de procesos desarrollados por compañías de prestigio.

A continuación se exponen las características de algunos de los *softwares* utilizados con una breve descripción de su potencialidad:

- **ALOHA**

Es un programa computarizado diseñado para el uso en situaciones de personas que responden a accidentes químicos, así como la planificación y entrenamiento de emergencias. Aloha puede predecir las tasas a los cuales los vapores químicos pueden escapar a la atmosfera desde tuberías de gas rotas, fugas de tanques, y charcos en evaporación. Puede predecir como una nube de gas peligrosa podría dispersarse en la atmósfera después de una descarga química accidental.

- **AERMOD Modeling System aermod**

Es un modelo de pluma en **estado estacionario** que incorpora la dispersión basada en la estructura y conceptos de escalado de la turbulencia en la capa límite planetaria, incluyendo el tratamiento de fuentes de área, de volumen y puntuales (chimeneas) y terrenos complejos y simples.

- **BLP (Buoyant Line and Point Source Model)**

Modelo de pluma gaussiano para modelizar emisiones industriales en chimeneas donde la sobreelevación de la pluma y el *downwash* (Efecto de inducir flujo de aire hacia abajo) son importantes. Diseñado especialmente para tratar problemas de dispersión de contaminantes emitidos por plantas de reducción del aluminio.



- **CTDMPLUS (Aplica igual que el Excel)**

Modelo Gaussiano de dispersión en terreno complejo para focos puntuales, aplicable a todo tipo de condiciones de estabilidad atmosférica.

5.5 Situaciones de fuga y dispersión

Para los casos a estudiar, se pretende analizar la potencialidad de incidente ambiental, en su más amplio concepto. Por tal motivo se enuncian algunos conceptos claves en los ítems siguientes en cuanto a condiciones de borde para la modelización de emisiones.

5.5.1 Fuente puntual de emisión continua

Bajo las hipótesis de que:

- 1) El contaminante es liberado a la atmósfera en forma continua desde una fuente puntual a Q (grs./seg.) (Caudal másico).
- 2) Viento estacionario de velocidad uniforme u .
- 3) La pluma del contaminante se expande *viento abajo* de la fuente por difusión. Para facilitar los cálculos se adopta un sistema de coordenadas con el origen ubicado en el punto de emisión y el eje x en la dirección del viento.

Luego,

$$u = u_i \text{ con } u \neq u(x, y, z, t) \quad \text{Ecuación 5.5.1}$$

Por consiguiente la derivada material se reduce a:

$$\frac{d}{dt} \cong u \frac{\partial}{\partial x}$$

Además,

$$4) k \neq k(x, y, z, t)$$

Entonces la ecuación anterior toma la forma

$$u \times \frac{\partial C}{\partial x} = k \times \nabla^2 C$$

Ecuación 5.5.2

Donde

C = Concentración del contaminante.

t = Tiempo.

K ó D_{AB} = Coeficiente de difusión.

La extensión del principio a fluidos se obtiene reemplazando la derivada parcial de la ecuación anterior por la derivada total con respecto al tiempo.

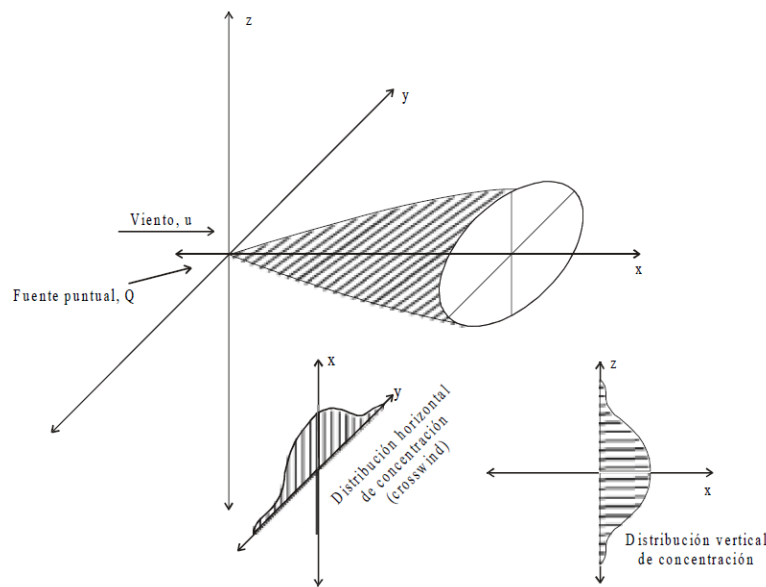


Figura 5.5: Modelización de Fuente Puntual

Solución de la ecuación:

Donde

$r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$. Si la concentración, como es usual, se evalúa para $x^2 \gg y^2 + z^2$, entonces:

$$C = \frac{Q}{4\pi kx} \exp \left[-\frac{u}{4kx} (y^2 + z^2) \right]$$

Ecuación 5.5.2



5.5.2 Fuente puntual de emisión instantánea

Bajo la hipótesis de que:

Q' (en grs.) se libera en $x = y = z = t = 0$:

$$\frac{c}{Q'} = \frac{1}{8(\pi kt)^{3/2}} \exp \left[-\frac{1}{4kt} (x^2 + y^2 + z^2) \right] \text{ Ecuación 5.5.3}$$

5.5.3 Fuente lineal de emisión continua entrecruzada (crosswind)

Hipótesis:

Q'' (en grs./m seg.) se libera uniformemente a lo largo de una línea ($x = 0, z = 0$):

$$\frac{c}{Q''} = \frac{1}{(2\pi kxu)^{1/2}} \exp \left[-\frac{uz^2}{4kx} \right] \text{ Ecuación 5.5.3}$$

Para los casos anteriores en el desarrollo de estas ecuaciones el coeficiente k de difusión se considera anisotrópico.

$$\begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix}$$

Para estimar la cantidad de descarga rutinaria algunas veces se usa un monitor para tomar una muestra del contaminante a medida que se está emitiendo. La cantidad colectada en un periodo de tiempo dado es medida en un laboratorio. Alternativamente, se puede usar un modelo de emisión para estimar la cantidad de contaminante descargada por un establecimiento particular.

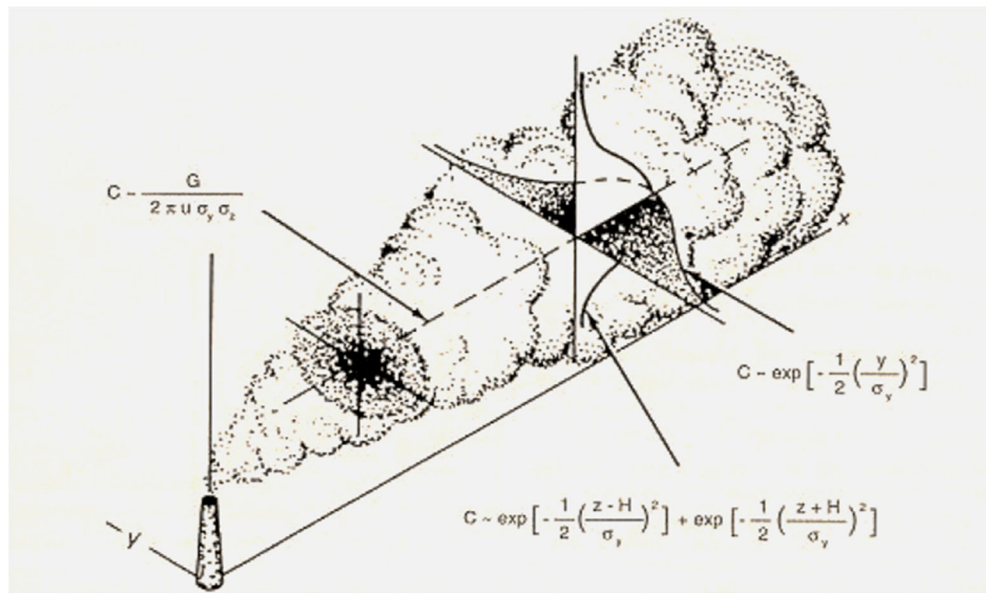


Fig.5.6. Los tres términos de la ecuación gaussiana del penacho. Concentración central y términos vertical y lateral.

Un modelo de emisión es un juego de ecuaciones matemáticas que representan los procesos que ocurren cuando una instalación genera un contaminante. Dos clases de monitores, una de números rutinarios, son puestos en estas ecuaciones matemáticas:

- "factores de emisión" o promedio de medidas de emisión que son hechos midiendo las emisiones de unos pocos establecimiento "típicos", y
- (2) "depende de" factores que son específicos a un cierto tipo de proceso y de cómo estas instalaciones operan.

Usando una técnica llamada modelos de dispersión, se pueden estimar la concentración de un contaminante a diferentes distancias y direcciones de la fuente.

Los modelos computacionales se usan para calcular valores estimados de información sobre la cantidad de contaminante emitido, representando lo mejor posible la realidad, en función del tiempo y geografía circundantes a la fuente, entre otros factores que afectan la concentración del contaminante.

Una hipótesis para la resolución de la ecuación es que la velocidad del viento es independiente de la altura y que el coeficiente de difusión depende de la altura y del gradiente vertical de temperatura. Consecuentemente, es posible obtener una serie de formas integradas:



Las concentraciones de contaminantes emitidos por una fuente continua puntual pueden evaluarse mediante el empleo de las ecuaciones de *Sutton*, bajo condiciones meteorológicas y topográficas que ajusten razonablemente al modelo simple utilizado para obtenerla. Un criterio para determinar si la fuente puntual emite en forma continua o instantánea es el siguiente:

$$\frac{x_r}{\bar{u}x\Delta t_{emisión}} < 1.8 \rightarrow \text{emisión continua}$$

$$1.8 < \frac{x_r}{\bar{u}x\Delta t_{emisión}} < 18 \rightarrow \text{emisión semicontinua}$$

$$\frac{x_r}{\bar{u}x\Delta t_{emisión}} > 18 \rightarrow \text{emisión instantanea}$$

Donde

x_r : distancia

\bar{u} : velocidad de viento

$\Delta t_{emisión}$: gradiente de temperatura

5.6 Aplicación de metodología para la resolución

En el análisis de la estimación de las consecuencias de las emisiones accidentales a la atmósfera, de contaminantes procedentes de actividades industriales, uno de los aspectos clave a considerar es su dispersión en el medio ambiente.

Una de las características principales que condiciona la evolución de un gas/vapor en la atmósfera es su densidad, distinguiéndose tres posibilidades:

- Gases ligeros. Densidad inferior a la del aire.
- Gases pasivos o neutros. Densidad similar a la del aire.
- Gases pesados. Densidad mayor que la del aire.

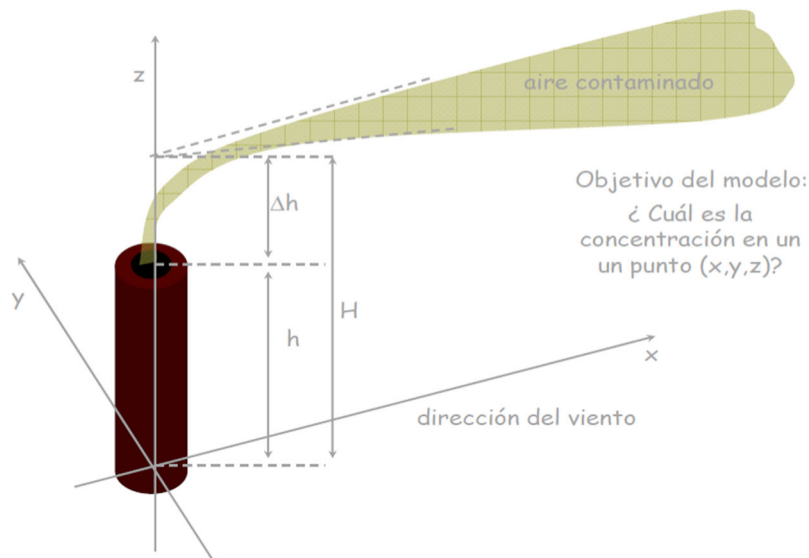


Fig.5.7. Esquema para descripción de modelo matemático

Los coeficientes de dispersión vertical se calculan según fórmulas empíricas. Una de ellas es la dada por Griffiths. Estas fórmulas han sido incorporadas a las planillas Excel desarrolladas en la presente tesis para evaluar dispersión de los contaminantes. Los coeficientes de Griffiths son función de la clase de estabilidad atmosférica.

La estabilidad atmosférica se representa por un código alfabético que va desde la A (más inestable) hasta la F (más estable). La clase de estabilidad atmosférica se puede deducir para cada condición meteorológica a partir de la siguiente tabla:

Tabla 5.3: Condiciones de Estabilidad meteorológica de Pasquill

| Velocidad del viento (m/s) a 10 m altura (U10) | Insolación diurna | | | Condiciones nocturnas | |
|--|-------------------|----------|--------|---|----------------------|
| | Fuente | Moderada | Ligera | Finamente cubierto ó más de la mitad cubierto | Nubosidad $\leq 3/8$ |
| <2 | A | A-B | B | | |
| 2-3 | A-B | B | C | E | F |
| 3-4 | B | B-C | C | D | E |
| 4-6 | C | C-D | D | D | D |
| >6 | C | D | D | D | D |



La velocidad del viento se acostumbra a medir a 10 metros de altura. Esta velocidad, a niveles más bajos de 10 metros, se ve reducida notablemente debido a los efectos de rozamiento.

5.7 Perfil de Velocidades del Viento.

La ley de potencias del viento se utiliza para ajustar la velocidad del viento observada, U_{ref} , desde una altura de medición de referencia, Z_{ref} , hasta la altura de emisión de la chimenea, h_s .

La ecuación de la ley de potencias es de la forma:

$$U_z = u_{10} \left(\frac{z_{ref}}{10} \right)^p \text{ Ecuación 5.7.1}$$

Siendo

U_z = Velocidad del viento a la altura de la fuente emisora (m/s)

U_{10} = Velocidad del viento a la altura de 10 m (m/s)

z =Altura de la fuente emisora (m)

p =Coeficiente exponencial

La velocidad del viento a la altura de la fuente u_s , es usada en la ecuación de la pluma Gaussiana. Para niveles distintos de este valor, la velocidad del viento debe corregirse según la relación anteriormente mencionada.

Los valores de p son función de la estabilidad atmosférica y rugosidad del suelo.

Según la situación a evaluar existen diferentes ecuaciones que nos permiten calcular los coeficientes de dispersión. Para el caso de predecir el comportamiento del ascenso de una columna de humo se utilizan expresiones empíricas como la de *Holland* o la de *Briggs*, de la cual se hablará más adelante.

5.7.1 Factores que influyen en la dispersión del penacho

Las condiciones meteorológicas y la duración del escape tienen una gran importancia en el alcance de la dispersión del penacho. Los factores principales son: la velocidad del viento y la



estabilidad atmosférica. La estabilidad atmosférica viene definida en función del gradiente vertical de temperatura de las capas del aire. Los datos de velocidad del viento y estabilidad atmosférica, siempre que sea posible, deben obtenerse de estaciones meteorológicas locales. Dado que no siempre es posible disponer de esta información, a través de una tabla establecida por *Pasquill*, puede obtenerse la categoría de estabilidad atmosférica, estimada según las condiciones de insolación y velocidad del viento.

En todas ellas el ascenso vertical depende de la diferencia de temperatura entre los gases de salida y la temperatura ambiente y la velocidad de salida de gases. Otros parámetros que también influyen en el ascenso vertical son el diámetro de la chimenea y la estabilidad atmosférica.

Al igual que ocurre con los coeficientes de dispersión, las fórmulas para el cálculo de Δh ya suelen estar incluidas en los modelos informáticos al uso, lo cual no es excusa para ignorar como influyen cada uno de ellos en el ascenso de la columna de humo.

5.7.2 Estimación de la elevación del penacho

La elevación del penacho (Δh) se define como la diferencia entre la altura de la línea central final del penacho y la altura inicial de la fuente. Esta elevación está originada por la fuerza ascensional y el impulso vertical del efluente.

La temperatura de salida del efluente en el caso de que supere en más de 50 °C a la temperatura ambiente, tiene mayor influencia que el impulso vertical en la determinación de la altura que alcanzará el penacho.

Como regla general la elevación del penacho es directamente proporcional a:

- contenido calorífico del efluente
- velocidad de salida del mismo e inversamente proporcional a velocidad local del viento.

Una de las ecuaciones más empleadas para el cálculo de esta elevación es la de **Holland**:

✓ Fórmula de Holland

$$\Delta h = \frac{V_s x d}{u} (1.5 + 2.68 * 10^{-3} * P * \frac{(T_s - T_a)}{T_s} d) \quad \text{Ecuación 5.7.2.1}$$



Δh = Elevación del penacho por encima de la fuente emisora (m)

V_s = Velocidad de salida del contaminante (m/s)

d = Diámetro interior del conducto de emisión (m)

u = Velocidad del viento (m/s)

P = Presión atmosférica (mbar)

T_s = Temperatura del contaminante (K)

T_a = Temperatura ambiente atmosférica (K)

El valor de $2,68 \cdot 10^{-3}$ corresponde a una constante expresada en mbar-1 m-1.

Los valores de Δh obtenidos con esta ecuación, deben corregirse multiplicando por un factor, establecido por **Pasquill-Gifford-Turner**, que es función de las condiciones de la estabilidad atmosférica, definida en el ítem anterior.

Tabla 5.4 Factores de corrección de Holland según la clase de Estabilidad Atmosférica

| Categorías de estabilidad (Clases) | Factor de corrección aplicado al Δh calculado por Holland |
|------------------------------------|---|
| A-B | 1.15 |
| C | 1.1 |
| D | 1 |
| E,F | 0.85 |

✓ Coeficientes de dispersión

Los coeficientes de dispersión, bajo la premisa de la distribución normal de contaminantes, según se trate de terrenos urbanos ó de campo, han sido obtenidos por diferentes autores en forma matemática y gráfica, en función de la estabilidad atmosférica, ya que la mayor o menor dispersión de un contaminantes depende fuertemente de esta variable, e indican, como su nombre lo expresa, la dispersión del contaminante en dirección perpendicular al viento.



✓ **Ecuaciones de Griffiths**

Tabla 5.5 Fórmulas para los coeficientes de dispersión para suelos urbanos

| Fórmulas para los coeficientes de dispersión para suelos urbanos | | |
|--|------------------------------------|------------------------------------|
| Estabilidad | σ_y | σ_z |
| A-B | $0,32 \times (1 + 0,0004X)^{-1/2}$ | $0,24 \times (1 + 0,0001X)^{-1/2}$ |
| C | $0,22 \times (1 + 0,0004X)^{-1/2}$ | 0,2 X |
| D | $0,16 \times (1 + 0,0004X)^{-1/2}$ | $0,14 \times (1 + 0,0003X)^{-1/2}$ |
| E-F | $0,11 \times (1 + 0,0004X)^{-1/2}$ | $0,08 \times (1 + 0,0015X)^{-1/2}$ |

Los parámetros σ_y y σ_z son las desviaciones tipo en las direcciones lateral y vertical respectivamente, que representan una medida de la dispersión del penacho en dichas direcciones.

Tales parámetros son función de la distancia a la fuente emisora viento abajo y de la clase (categoría) de estabilidad atmosférica definida anteriormente. Estos coeficientes se suelen presentar en forma gráfica o pueden calcularse según fórmulas empíricas. Diferentes autores llegan a expresiones que difieren ligeramente.

En las figuras siguientes se muestran unos gráficos ampliamente utilizados para obtener las σ_y y σ_z , obtenidos a partir de las fórmulas de Turner, denominados Curvas de Pasquill-Gifford. Estos gráficos indican que para una determinada distancia viento abajo de la fuente de emisión, la amplitud del penacho es máxima cuando la inestabilidad atmosférica es también máxima y es mínima cuando la atmósfera es muy estable.

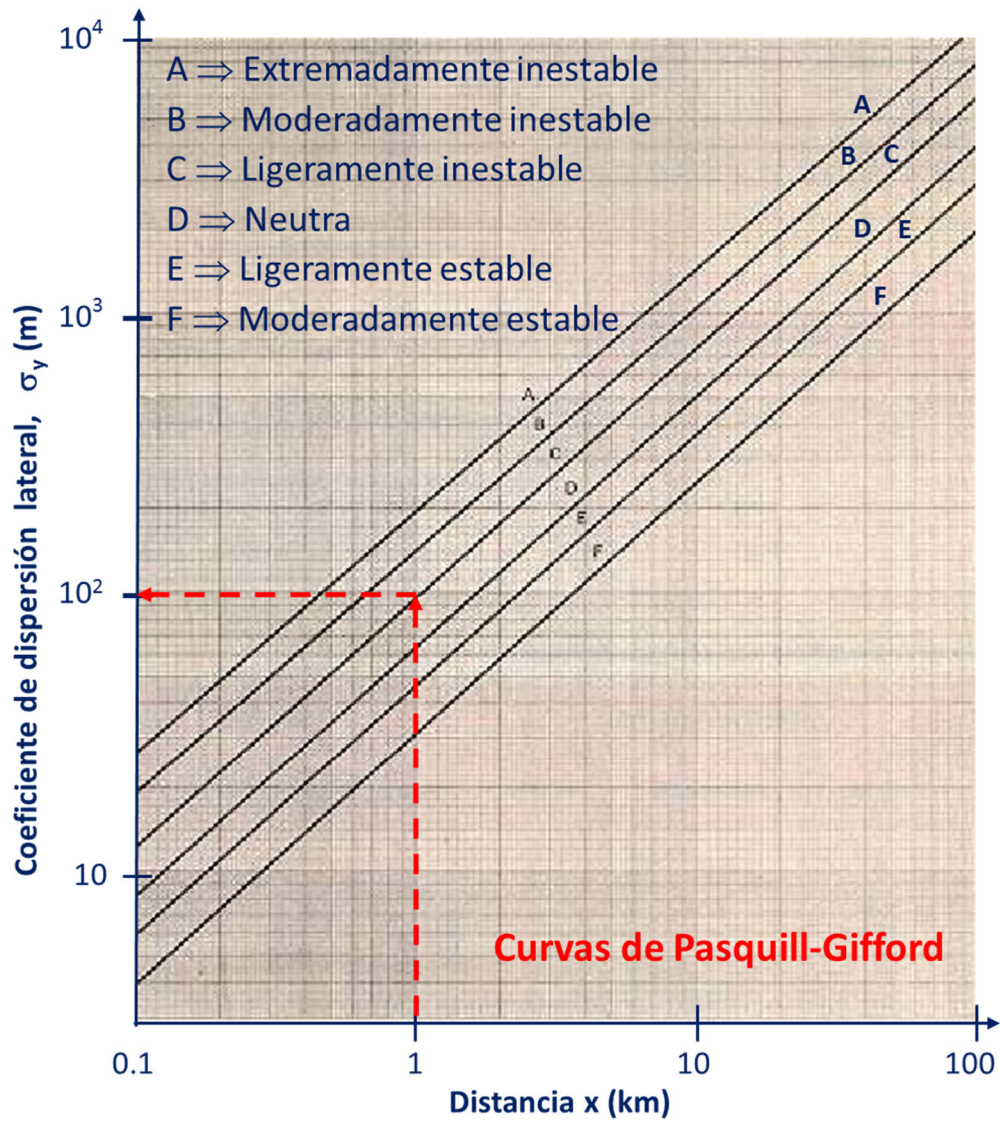


Figura 5.8 Coeficiente de dispersión lateral σ_y según distancia y categoría de estabilidad atmosférica

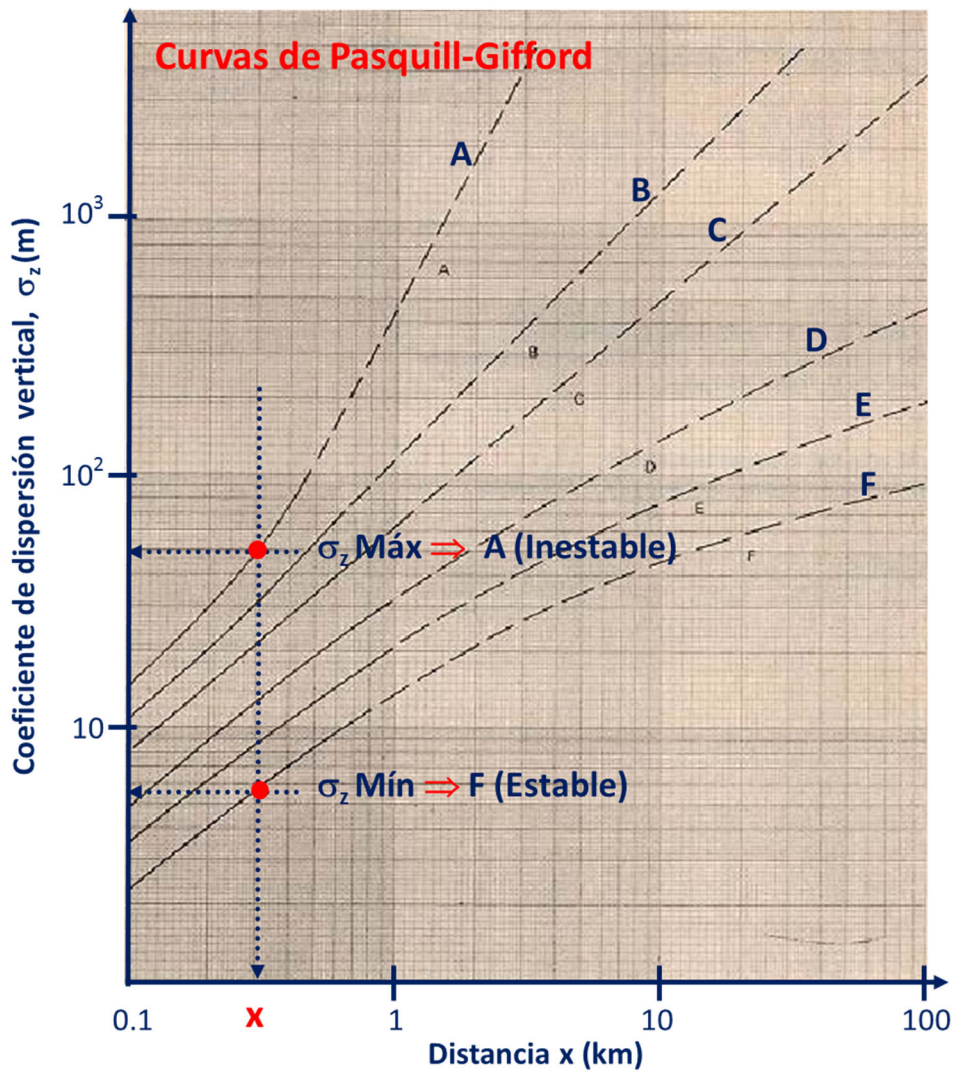


Figura 5.9: Coeficiente de dispersión vertical σ_z según distancia y categoría atmosférica

Los valores obtenidos por estos gráficos o por las fórmulas que han dado lugar a ellos, solamente son aplicables en campo abierto y debe tenerse en cuenta que en condiciones inestables (A) y estables (F) se pueden cometer errores importantes en la estimación de σ_z .

Para condiciones de estabilidad intermedias entre las anteriores, la estimación de σ_z se puede esperar que como máximo, se desvíe al doble del valor estimado por los gráficos.



5.8 Parámetros de dispersión de Fuentes Puntuales

Las tablas 5.4 y 5.5 muestran las ecuaciones utilizadas para determinar σ_y y σ_z para terreno urbano. Estas expresiones fueron determinadas por Briggs, y representan la mayor aproximación a los datos de difusión vertical urbana reportados por McElroy y Pooler (1968).

Mientras que las funciones de Briggs se asumen como válidas para distancias a favor del viento menor a 100 m, se sugiere aclarar que la fiabilidad de los datos puede disminuir si la aplicamos a receptores que se encuentren a distancias menores a 100 m de la fuente de emisión.

Para calcular σ_y y σ_z (en metros) para el modo rural se utilizan ecuaciones que se aproximan a las curvas de Pasquill-Gifford (Turner, 1970). Las ecuaciones para calcular σ_y son de la forma:

$$\sigma_y = 465.11628 \times \tan TH \tag{Ecuación 5.8.1}$$

Donde

$$TH = 0,017453293[c - d \ln(x)]$$

Tabla 5.6: Parámetros utilizados para calcular la σ_y de Pasquill-Gifford $\sigma_y = 465, 11628 \times \tan (TH)$, $TH=0,017453293 (c-d \ln (x))$

| Categoría de Estabilidad de Pasquill | c | d |
|--------------------------------------|---------|---------|
| A | 24,1670 | 2,5334 |
| B | 18,3330 | 1,8096 |
| C | 12,5000 | 1,0857 |
| D | 8,3330 | 0,72382 |
| E | 6,2500 | 0,54287 |
| F | 4,1667 | 0,36191 |

Donde σ_y está en metros y x está kilómetros.



Tabla 5. 7: Utilizados para calcular la σ_z de Pasquill-Gifford

$$\sigma_z (m) = ax^b \quad x (m)$$

| Categoría de Estabilidad de Pasquill | X (km) | a | b |
|--------------------------------------|-----------|---------|---------|
| A | <10 | 22.8 | 0.94470 |
| | 0.1-0.15 | 158.08 | 1.05420 |
| | 0.16-0.2 | 170.22 | 1.09320 |
| | 0.21-0.25 | 179.52 | 1.12620 |
| | 0.26-0.30 | 217.41 | 1.26440 |
| | 0.31-0.40 | 258.89 | 1.40940 |
| | 0.41-0.5 | 346.75 | 1.72830 |
| | 0.51-3.11 | 453.85 | 2.11660 |
| | >3.11 | ** | ** |
| B | <20 | 90.673 | 0.93198 |
| | 0.21-0,40 | 98,483 | 0,98332 |
| | >0,4 | 109,30 | 1,09710 |
| C | Todos | 61,141 | 0,91465 |
| D | <30 | 34,459 | 0,86974 |
| | 0,31-1 | 32,093 | 0,81066 |
| | 1,01-3 | 32,093 | 0,64403 |
| | 3,01-10 | 33,504 | 0,60486 |
| | 10,01-30 | 36,650 | 0,56589 |
| | >30 | 44,053 | 0,51179 |
| E | <10 | 24,260 | 0,83660 |
| | 0,10-0,30 | 23,331 | 0,81956 |
| | 0,31-1 | 21,628 | 0,75660 |
| | 1,01-2 | 21,628 | 0,63077 |
| | 2,01-4 | 22,534 | 0,57154 |
| | 4,01-10 | 24,703 | 0,50527 |
| | 10,01-20 | 26,970 | 0,46713 |
| | 20,01-40 | 35,420 | 0,37615 |
| >40 | 47,618 | 0,29592 | |
| F | <20 | 15,209 | 0,81558 |
| | 0,21-0,7 | 14,457 | 0,78407 |
| | 0,21-1 | 13,953 | 0,68465 |
| | 1,01-2 | 13,953 | 0,63227 |
| | 2,01-3 | 14,823 | 0,54503 |
| | 3,01-7 | 16,187 | 0,46490 |
| | 7,01-15 | 17,836 | 0,41507 |
| | 15,01-30 | 22,651 | 0,32681 |
| | 30,01-60 | 27,074 | 0,27436 |
| >60 | 34,219 | 0,21716 | |

Si el valor σ_z excede los 5000 m, $\sigma_z = 5000 m$



5.9 Inversión térmica y contaminante.

La acumulación de contaminantes de todo tipo se agrava cuando las condiciones favorecen, además, que se condense la humedad atmosférica. El aire tibio puede contener proporcionalmente más humedad que el frío, por lo que, cuando el aire se enfría, el vapor de agua tiende a condensar y a transformarse en niebla, lo que dependerá de la proporción de agua en la atmósfera y de la temperatura. Por lo tanto, durante una inversión atmosférica térmica es muy probable que se forme niebla. Adicionalmente, en estas condiciones las partículas sólidas y líquidas que están como contaminantes del aire favorecen la formación de pequeñas gotas de niebla y su estabilidad, ya que actúan como núcleos para ellas. Esta niebla que incluye partículas de contaminantes, en especial carbón, es lo que se conoce como "neblumo", palabra formada a partir de niebla y humo y que corresponde al término inglés smog, el cual, a su vez, deriva de *smoke* (humo) y *fog* (niebla).

Ocasionalmente, las inversiones térmicas pueden durar varios días sobre todo en temporadas de invierno o cuando las condiciones topográficas o atmosféricas dificultan el movimiento del aire. Estas inversiones de larga duración son las que han causado los graves incidentes debidos a la contaminación del aire en diversas partes del mundo, que se mencionaron antes.

Debe hacerse notar que para que los contaminantes queden atrapados, no es forzoso que ocurra una inversión térmica ya que basta que las masas de aire queden inmóviles por cualquier motivo, por ejemplo porque la velocidad del movimiento ascendente de la masa de aire sea menor que la del descendente o porque no haya movimiento horizontal de ésta.



6 Capítulo 6: Casos de Aplicación

6.1 Introducción

En este capítulo se establecerán algunos escenarios de emisiones hipotéticos en el marco del tratamiento de gas y petróleo. En función de los escenarios planteados se procederá a computar las emisiones de CO₂ y CH₄ emitidas como producto de la operación normal y de emisiones fugitivas teóricas. Una vez obtenidas las emisiones tipo de los contaminantes establecidos y fijando parámetros geográficos y meteorológicos, se procederá a predecir la dispersión de contaminantes, haciendo uso de la herramienta informática desarrollada, y también de otros software.

Para correlacionar emisiones de CO₂, son 0.15 de las emisiones de CH₄.

Resumiendo, los pasos a seguir serán:

- Proponer Instalación de Procesamiento.
- Establecer entorno de la Instalación (poblaciones, escuelas, ríos, otras industrias, vegetación, etc.).
- Cómputo de contaminantes.
- Datos meteorológicos (vientos, temperaturas en invierno y verano).
- Predicción de difusión de contaminantes mediante ecuaciones gaussianas.

Las imágenes siguientes, sacadas de *google earth*, pretenden plasmar la cercanía de viviendas a zonas de explotación petrolera. Se calculará mediante modelos matemáticos la difusión de contaminantes para una sola instalación, a pesar de que el ambiente es dinámico y más aún en momentos de campañas de exploración y perforación intensas. No se contemplará la sinergia de emisiones.



Figura 6.1 Ubicación geográfica de un pozo de petróleo en cercanía de una vivienda



Fig.6.2 Instalación de Procesamiento de Crudo



Fig 6.3: Yacimientos vs. Asentamientos

La dirección del viento en la ciudad de Neuquén es O y SO por lo que existen zonas más y menos vulnerables desde el punto de vista de dispersión de contaminantes⁸.

6.1 Caso A: Planta de tratamiento de Gas

Se ha mencionado anteriormente que el principal riesgo identificado en instalaciones cercanas a poblaciones es el riesgo potencial.

En este caso evaluaremos la dispersión de contaminantes en una planta de tratamiento de gas.

⁸ Los vientos medios mensuales son mayores en verano que en invierno. Ello se debe al efecto del calentamiento de la superficie que contribuye a inestabilizar estáticamente la atmósfera, favoreciendo la mezcla vertical de la cantidad de movimiento y en consecuencia el transporte del mismo hacia la superficie desde capas altas. El porcentaje medio de cielo cubierto presenta un mínimo de menos de 50% en el Este de Neuquén. Igualmente, para cada latitud hay mayor nubosidad en la cordillera que en el resto de la provincia. La mayor parte de la nubosidad es de tipo medio y alto, asociada a fenómenos de escala sinóptica, esto es, de miles de kilómetros de extensión. (Centros operativos de pronóstico meteorológico del aeropuertos de Neuquén y publicación “**CLIMATOLOGÍA DEL VIENTO EN EL ALTO VALLE DEL RÍO NEGRO**”, por Marisa G. Cogliati - Nicolás A. Mazzeo Fac. Humanidades- Depto. Geografía.- Fac. Ingeniería- Universidad Nacional del Comahue

6.1.1 Cómputo de emisiones

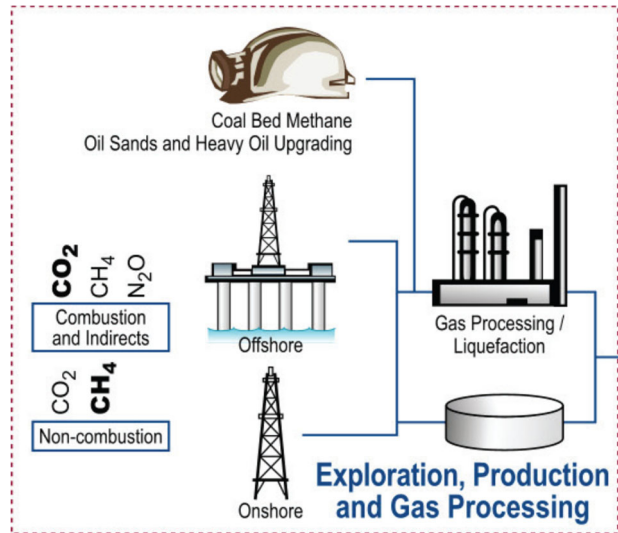


Fig 6.1.1: Esquema de emisiones en la Industria

Uno de los equipos principales de un sistema de deshidrataciones con glicol TEG es la torre de contacto.

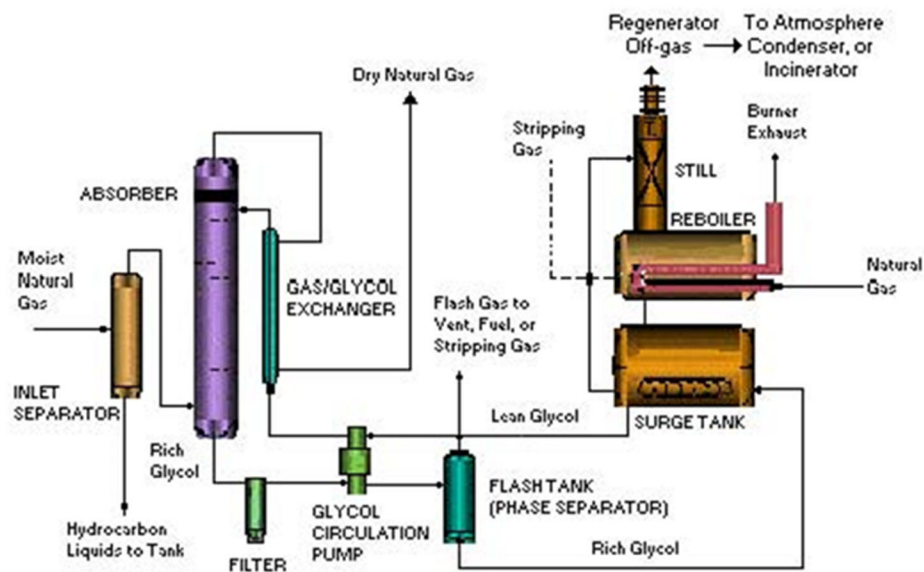


Fig 6.1.2: Esquema de Deshidratación de Gas con glicol



Una unidad de deshidratación es más susceptible de emitir CO₂ sin combustión que otro tipo de instalaciones. Es muy común ver en el campo pequeñas instalaciones para acondicionar parcialmente el gas para facilitar el transporte hasta el transporte hacia plantas de tratamiento hasta especificación.

Considerando una unidad de deshidratación que trata un 1.000.000 Sm³/d de gas con la siguiente composición: 90% de CH₄ y 5% de CO₂, se puede calcular las emisiones de la siguiente manera:

Datos adicionales:

| Operación Normal | | |
|------------------------------|-----------|--------------------|
| Caudal de Gas a Tratar | 1.000.000 | Sm ³ /d |
| Tipo de Instalación | Proc. Gas | |
| Presión de trabajo | 40,8 | kg/cm ² |
| Temperatura de trabajo | 26,7 | °C |
| Contenido de CH ₄ | 0,9 | |
| Contenido CO ₂ | 0,05 | |

Solo se plasmarán en el análisis aquellas emisiones que son más significativas, que por representar el escenario más desfavorable es con el único que se realizará el análisis de dispersión.

• **Emisiones en situación de emergencia:**

| | | |
|--------------------------------|-----------|-------------------------------------|
| Producción de gas | 1.000.000 | m ³ /d |
| Emisiones en procesos de gas 2 | 0,1244 | tonn/10 ⁶ m ³ |

| | 1 evento | | 15 eventos | |
|-------------------|----------|---------------------------|------------|---------------------------|
| E CH ₄ | 45,41 | tonn CH ₄ /año | 681,1 | tonn CH ₄ /año |
| | | | 0,52 | kg/seg |

6.2 Dispersión de contaminantes

En este ítem se intentará demostrar, que si bien el cálculo de cómputo de emisiones para una instalación no supera los límites que pudieran provocar asfixia, sin embargo, podrían incidir en enfermedades respiratorias crónicas.

Los cálculos de emisiones anteriormente mencionados se han evaluado para una sola instalación. En general, los campos petroleros tienen asociadas un sinnúmero de instalaciones, por lo que no puede concluirse solo en función del cómputo de una instalación, sin embargo se plasmará solo el cómputo de una fuente de emisión.

En primera instancia se plasmará la dispersión de una fuente de emisión, luego se intentará ver interacción de varias fuentes.

- Dispersión de CH_4 y CO_2

Para iniciar los cálculos hay condiciones de borde que se deben establecer. Una de las condiciones que se fijarán es la estabilidad atmosférica, la cual se denomina E, como se vio en el capítulo anterior. En situación de emergencia a pocos metros de una emisión de una sola fuente, la dispersión de contaminantes es menor aun cuando la concentración es alta, lo cual produce un desplazamiento de oxígeno, cuya calidad respirable disminuye, aun cuando esto no provocará asfixia por no encontrarse en espacio confinado.

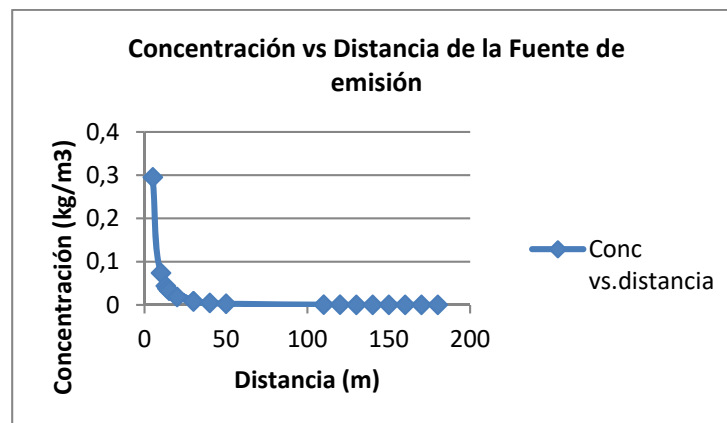


Fig.6.2.1 Concentración Vs. Distancia de la fuente de emisión –Caso A

Si se analizan los coeficientes de dispersión, puede verse que cerca de la fuente de emisión la concentración es grande y la dispersión del contaminante es pequeña.

El siguiente gráfico muestra la simulación de una pluma de dispersión de una sola fuente de emisión.

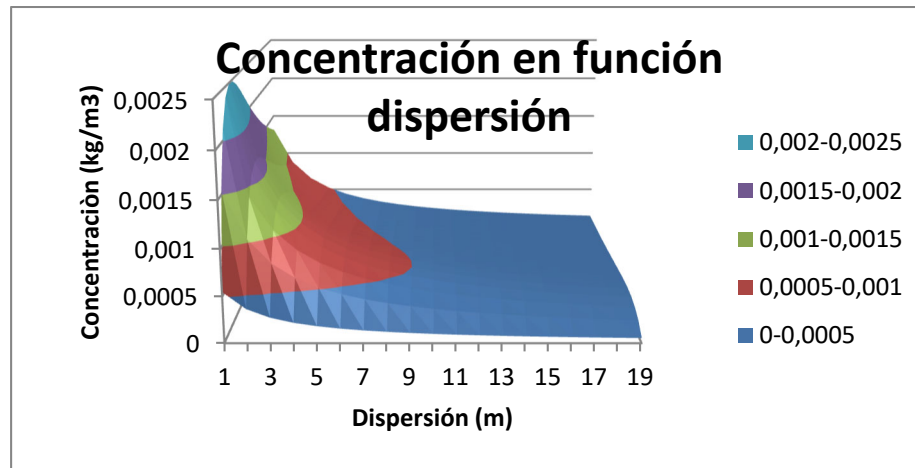


Fig.6.2.2 Concentración Vs. Dispersión –Caso A

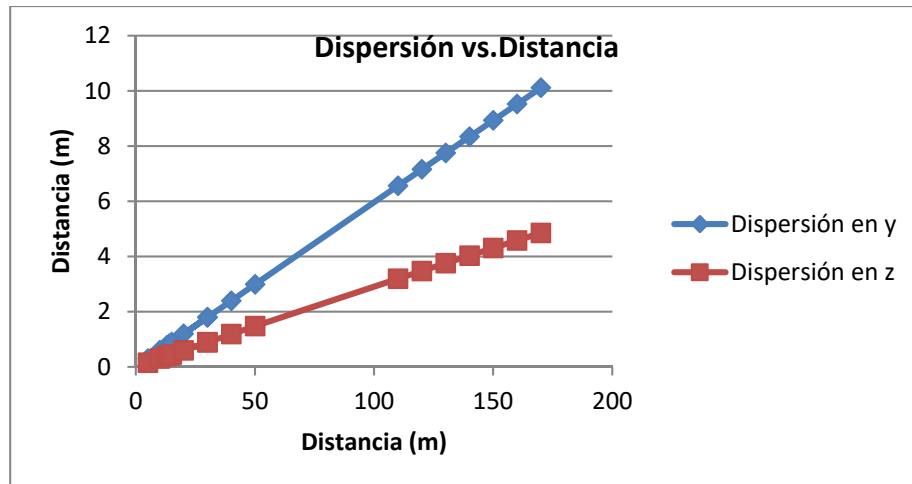


Fig.6.2.3 Dispersión vs. Distancia –Caso A

En el gráfico anterior puede verse la apertura de la pluma de contaminantes con la distancia, lo que implica una dilución y elevación del contaminante. Como condición de borde se ha considerado que la fuente de emisión está a la misma altura que la fuente receptora.

6.3 Resolución Caso A usando software Aloha

Los *softwares* de licencia libre no calculan en forma integral el cómputo de emisiones de contaminantes y la dispersión de los mismos. Aloha se ha desarrollado para elaborar respuestas ante emergencias. Las ecuaciones de dispersión no incluyen en su desarrollo la variable de cambios en la topografía desde una fuente a un receptor.

A pesar de lo acotado de la aplicación Aloha, se lo utilizará para validar aspectos de la planilla excel desarrollada a fin de validarla. Cabe destacar que Aloha no contempla las emisiones crónicas pequeñas como las “emisiones fugitivas”.

Aloha Modela:

- Dispersión de una nube de gas contaminante en la atmósfera con visión aérea de las concentraciones que pudieran alcanzar niveles peligrosos.
- Usa el modelo gaussiano para predecir como los gases se dispersarán.

Mediante la herramienta desarrollada en la presente tesis se calcularon las ppm emitidas de cada contaminante considerando que el peso molecular del CH₄ y el CO₂ no son los mismos. Los datos obtenidos se exponen en la tabla 6.3.

Tabla 6.3.1 Parámetros de dispersión Caso A evaluado con herramienta informática desarrollada en la presente tesis

| Concentración kg/m ³ | Dist. | Dispersión sy | Dispersión sz | ppm CH ₄ | ppm CO ₂ | Aire respirable ppm O ₂ 0,21 |
|------------------------------------|-------|------------------|------------------|---------------------|---------------------|--|
| 0,295247257 | 5 | 0,2999250 | 0,1497753 | 443350,66 | 66578,256 | -234350,6628 |
| 0,073940835 | 10 | 0,5997002 | 0,2991026 | 111031,40 | 16673,658 | 97968,59324 |
| 0,008255157 | 30 | 1,7973060 | 0,8919722 | 12396,150 | 1861,5379 | 196603,8495 |
| 0,043797794 | 13 | 0,7794934 | 0,3884849 | 65767,862 | 9876,4025 | 143232,1373 |
| 0,037777596 | 14 | 0,8394126 | 0,4182433 | 56727,782 | 8518,8479 | 152272,2172 |
| 0,032919959 | 15 | 0,8993257 | 0,4479840 | 49433,432 | 7423,4506 | 159566,5672 |
| 0,018549674 | 20 | 1,1988017 | 0,5964214 | 27854,654 | 4182,9515 | 181145,3451 |
| 0,008255157 | 30 | 1,7973060 | 0,8919722 | 12396,150 | 1861,5379 | 196603,8495 |



“Emisiones Gaseosas de la Actividad Hidrocarburífera *Upstream*”

Ing. Flavia Ruiz

| | | | | | | |
|-------------|-----|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|
| 0,004603892 | 40 | 2,3952143 | 1,1857707 | 6913,3196 | 1038,1776 | 202086,6804 |
| 0,00291486 | 50 | 2,9925280 | 1,4778325 | 4377,0259 | 657,30082 | 204622,974 |
| 0,000611305 | 110 | 6,5639967 | 3,1945788 | 917,95154 | 137,84937 | 208082,0485 |
| 0,000516468 | 120 | 7,1571849 | 3,4749034 | 775,54174 | 116,46360 | 208224,4583 |
| 0,000442436 | 130 | 7,7497890 | 3,7536092 | 664,37301 | 99,769326 | 208335,627 |
| 0,000383506 | 140 | 8,3418102 | 4,0307101 | 575,88147 | 86,480493 | 208424,1185 |
| 0,000335807 | 150 | 8,9332500 | 4,3062200 | 504,25673 | 75,724560 | 208495,7433 |
| 0,00029664 | 160 | 9,5241094 | 4,5801526 | 445,44180 | 66,892285 | 208554,5582 |
| 0,00026407 | 170 | 10,114389 | 4,8525214 | 396,53367 | 59,547718 | 208603,4663 |
| 0,000236684 | 180 | 10,704092 | 5,1233396 | 355,41026 | 53,3721906 | 208644,5897 |

Incorporando los datos arriba calculados en planillas de cálculo desarrolladas para este fin en el software Aloha se pretende chequear consistencia en la simulación.

Reporte 6.3.1 Parámetros de dispersión Caso A evaluado con software comercial Aloha



"Emisiones Gaseosas de la Actividad Hidrocarburífera *Upstream*"

Ing. Flavia Ruiz

SITE DATA:

Location: HOUSTON, TEXAS
Building Air Exchanges Per Hour: 0.56 (user specified)
Time: June 16, 2013 2057 hours CDT (using computer's clock)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: METHANE Molecular Weight: 16.04 g/mol
PAC-1: 2900 ppm PAC-2: 2900 ppm PAC-3: 17000 ppm
LEL: 50000 ppm UEL: 150000 ppm
Ambient Boiling Point: -161.5° C
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 6 meters/second from NE at 10 meters
Ground Roughness: open country Cloud Cover: 5 tenths
Air Temperature: 25° C
Stability Class: E (user override)
No Inversion Height Relative Humidity: 19%

SOURCE STRENGTH:

Direct Source: 0.5 kilograms/sec Source Height: 0
Release Duration: 60 minutes
Release Rate: 30 kilograms/min
Total Amount Released: 1,800 kilograms
Note: This chemical may flash boil and/or result in two phase flow.
Use both dispersion modules to investigate its potential behavior.

THREAT ZONE:

Model Run: Gaussian
Red : 43 meters --- (17000 ppm = PAC-3)
Note: Threat zone was not drawn because effects of near-field patchiness
make dispersion predictions less reliable for short distances.
Orange: 106 meters --- (2900 ppm = PAC-2)
Yellow: 106 meters --- (2900 ppm = PAC-1)

THREAT AT POINT:

Concentration Estimates at the point:
Downwind: 29.9 meters Off Centerline: 1.22 meters
Max Concentration:
 Outdoor: 28,200 ppm
 Indoor: 12,000 ppm

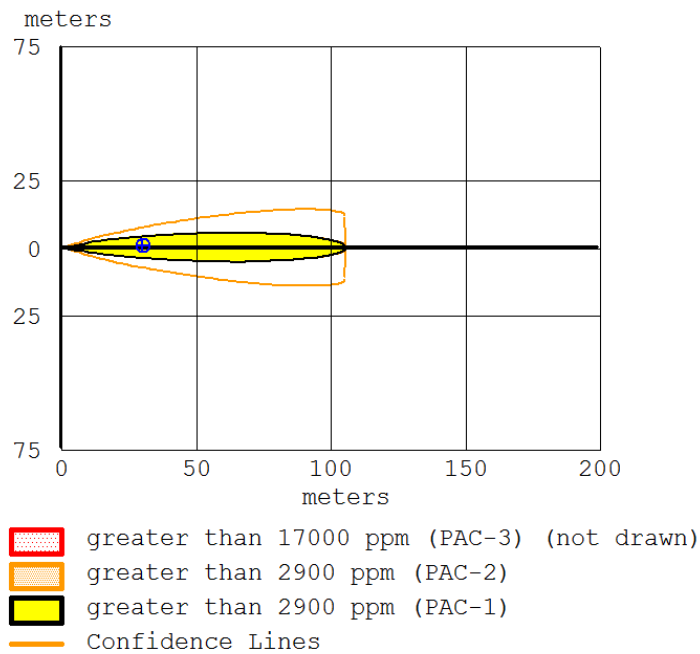


Figura 6.3.1 Gradiente de Concentración-software Aloha

6.4 Caso B: Batería

En un área de producción de petróleo y gas los fluidos una vez producidos se reciben en Baterías. Se denomina procesamiento al conjunto de operaciones unitarias que se le realizan al petróleo y el gas desde boca de pozo. Involucra separación de fases y remoción de impurezas.

Acondicionamiento, procesamiento, manipuleo son usados como sinónimos para hacer referencia a todas las operaciones del crudo y /o gas en forma segura para el manipuleo, almacenaje y transporte. El procesamiento de crudo también incluye el tratamiento de agua ya sea para disposición o reinyección.

En forma esquemática la batería puede representarse de la siguiente manera:

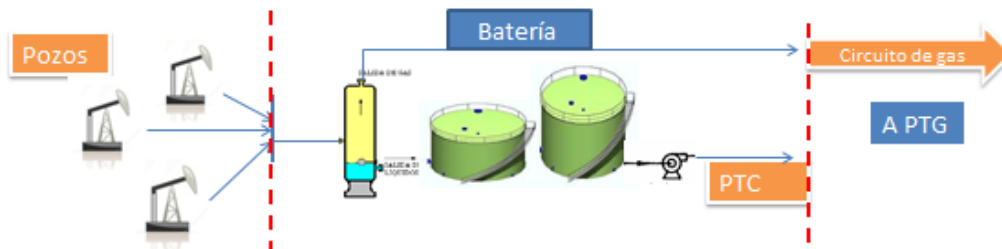


Fig. 6.4 Esquema ilustrativo de Proceso

Las operaciones específicas en función de la composición son:

- **Separación:** Separación de fases vapor, crudo y agua
- **Deshidratación:** Remoción de gotas de agua o agua y arena del crudo
- **Desalación:** Reducción de sales contenidas en el crudo debido al agua emulsificada.
- **Endulzamiento:** Remoción de SH_2 y CO_2
- **Estabilización:** Remoción de los componentes más volátiles de un crudo para reducir la (RVP) o presión de punto de burbuja.

La batería cuenta con un manifold de ingreso, con colector de control y un colector general, dos separadores verticales de control, dos separadores generales, dos tanques de control, un tanque stock, un calentador y 2 bombas para la transferencia de los fluidos, a través de oleoducto hacia otra Batería.

Se considerará para este caso una instalación tipo, en donde los tanques de las baterías tienen las siguientes características:

▪ **Tanque de control TK-001**

- Capacidad: 40 m^3
- Altura: 2,5 m
- Diámetro: 4,3 m



▪ **Tanque de control TK-002:**

- Capacidad: 45 m³
- Altura: 2,5 m
- Diámetro: 4,8 m

▪ **Tanque TK-003:**

- Capacidad: 160 m³
- Altura: 2,5 m
- Diámetro: 9 m

▪ **Calentador CAL-001:**

- Caudal: 305 m³/h
- Salto térmico: 30°C
- Calor absorbido: 500.000 kcal/h
- Peso total: 8500 kg
- Presión diseño en el serpentín: 70 kg/cm²
- Superficie: 498,2 m²
- Presión diseño horno: -1,5/1 kg/cm²
- Superficie: 18, 6 m²

▪ **Bombas de transferencia BP-01/02:**

- Marca: Stork
- Modelo SP 5080
- Caudal: 29, 3 m³/h
- Diámetro de camisa: 4”
- Velocidad 80 epm
- Presión 45 kg/cm²



• **Los datos de producción a tratar**

Producción total

- **9.507 m³/día bruta**
- **197 m³/día petróleo – 9.310 m³/día agua**
- **6563 Sm³/día de gas**

La Batería en cuestión tratará los caudales arriba mencionados, luego del cómputo de emisiones con herramienta informática se contrapondrá con software TANK 4.0.

6.4.1 Pérdidas en Tanques

Para los caudales a almacenar:

9.507 m³/día de producción bruta.....59797, bbl/día

197 m³/día petróleo (1239,09 bbl/d) – 9.310 m³/día agua (58558,14 bbl/d)

- **Emisiones flash de condensados**

Con los datos de producción propuestos, se calculan las variables que serán los datos de ingreso para obtener las emisiones.

| Venteo flash según el GOR | | | | |
|---|-------------|---------------|-----------|---|
| Rs | 13,83099584 | scf/bbl | 2,463403 | m ³ gas/m ³ crudo |
| Producción bruta V0 | 451 | bbl/d | 71,81528 | m ³ /d |
| SG oil | 0,784803106 | | | |
| GOR separador | 1,891063117 | scf/bbl | | |
| GOR tanque | 0,504946894 | scf/bbl | | |
| P1 Presión en el separador | 43,3 | psig | 298,6206 | kPa |
| P2 Presión en tanque | 14,7 | psig | 101,3793 | kPa |
| ΔP | 28,6 | | 197,2413 | kPa |
| Sgi Gravedad de gas disuelto en aire | 0,9 | | | |
| SGx Gravedad de gas disuelto a P1 psig | 0,813879778 | | | |
| API | 48,8 | API del crudo | | |
| API | >30 | API del crudo | | |
| T1 en el separador | 112 | °F | 317,44444 | K |
| T2 Temperatura en tanque | 80 | °F | 299,66666 | K |
| C1 | 0,0178 | | | |



“Emisiones Gaseosas de la Actividad Hidrocarburífera *Upstream*”

Ing. Flavia Ruiz

| | | |
|---------------------|--------------|---------|
| C2 | 1,187 | |
| C3 | 23,931 | |
| γg separador | -0,508459662 | |
| γg tanque | -0,537615218 | |
| GOR Carta | 47 | scf/bbl |

Sin embargo se tomarán los valores del compendio API en la situación de mayor emisión, para un caudal de aproximadamente 9300 m³/d (58558.14 bbl/d)

6.4.2 Emisiones de tanques que utilizan gas de blanketing

Para el volumen de agua almacenada, los tanques utilizarán gas de *blanketing*.

| | | |
|-------------------------------------|---------------------|------------------------|
| Caudal de Líquido almacenado | 21.373.721,1 | bbl/año |
| Altura de líquido en el año | 20.000.000 | bbl |
| Temperatura estimada anual | 75 | °F |
| VR | | a P y T Std |
| Volumen a T de operación | 112291959,1 | ft³ |
| Volumen a T Std | 109143586,4 | Sft³ |
| F CH₄ | 0,82 | |
| F CO₂ | 0,01 | |

Suma de Emisiones anuales de CH₄ en el almacenamiento de agua de formación y crudo:

a) **En etapa de operación:**

Emisiones flash en tanque:

| | | |
|-------------------------|-------------|--------------------------------|
| E CH₄ | 67,6 | tonn CH₄/año |
| E CO₂ | 30,5 | tonn CH₄/año |



Emisiones de venteos fríos

| | Ventoeo intermitente | | Ventoeo continuo sin flare | |
|---------------------------------|-----------------------------|----------|-----------------------------------|-----------|
| Emisiones CH₄ | 37,4 | tonn/año | 910,3 | tonn/ año |
| Emisiones CO₂ | 5,7 | tonn/año | 139,1 | tonn/ año |

Ahora se comparará con el cálculo desarrollado con la herramienta informática con el soft TANK 4.0, como se dijo al comienzo de este inciso.

Reporte 6.4.1 Parámetros de dispersión Caso B evaluado con software TANK 4.0

Identification

User Identification: tanque tesis
 City:
 State:
 Company:
 Type of Tank: Vertical Fixed Roof Tank
 Description:

Tank Dimensions

Shell Height (ft): 8,00
 Diameter (ft): 14,00
 Liquid Height (ft) : 7,00
 Avg. Liquid Height (ft): 6,00
 Volume (gallons): 8.060,78
 Turnovers: 5,00
 Net Throughput(gal/yr): 40.303,91
 Is Tank Heated (y/n): N

Paint Characteristics



“Emisiones Gaseosas de la Actividad Hidrocarburifera *Upstream*”

Ing. Flavia Ruiz

| | |
|--------------------|-------------------|
| Shell Color/Shade: | Aluminum/Specular |
| Shell Condition | Good |
| Roof Color/Shade: | Aluminum/Specular |
| Roof Condition: | Good |

Roof Characteristics

| | |
|---------------------------|------|
| Type: | Cone |
| Height (ft) | 0,00 |
| Slope (ft/ft) (Cone Roof) | 0,00 |

Breather Vent Settings

| | |
|--------------------------|-------|
| Vacuum Settings (psig): | -0,03 |
| Pressure Settings (psig) | 0,03 |

Meteorological Data used in Emissions Calculations: Wilmington, North Carolina

(Avg Atmospheric Pressure = 14 psia)

TANKS 4.0.9d

Emissions Report - Summary Format

Liquid Contents of Storage Tank

tanque tesis - Vertical Fixed Roof Tank

| Mixture/Component | Daily Liquid Surf. Temperature (deg F) | | | Liquid Bulk Temp (deg F) | Vapor Pressure (psia) | | | Vapor Mol. | Liquid Mass |
|-------------------|--|-------|-------|--------------------------|-----------------------|---------|---------|------------|-------------|
| | Month Avg. | Min. | Max. | | Avg. | Min. | Max. | Weight. | Fract. |
| crudo almacenado | All | 68,52 | 60,87 | 76,17 | 64,72 | 12,0000 | 10,0000 | 14,0000 | 30,0000 |

TANKS 4.0.9d

Emissions Report - Summary Format



Individual Tank Emission Totals

Emissions Report for: Annual

tanque tesis - Vertical Fixed Roof Tank

| Componentes | Losses(lbs) | | |
|------------------|--------------|----------------|-----------------|
| | Working Loss | Breathing Loss | Total Emissions |
| Crudo almacenado | 259,10 | 4.688,58 | 4.947,68 |

=4947.68 lbs/año x 0.0095 tonn/lb=**47 tonn /año**, obteniendo valores del orden a los de cálculos propuestos.

Hasta aquí se ha validado la parte de cómputo de emisiones. El software Tank no calcula dispersión, dicho cálculo se llevará a cabo con las ecuaciones gaussianas incluidas en la herramienta informática desarrollada en la presente tesis.

Ahora, se calculará la dispersión de contaminantes para el caso de mayor emisión en la instalación completa: **E CH₄= 4723.34 tonn/año=0.15 kg/seg.**

Tabla 6.4.1 Parámetros de evaluación Caso B.

| | Fórmulas de Briggs-Zonas rurales |
|---|----------------------------------|
| C Concentración | 0,022182251 |
| Concentración en ppm | 33309,42203 |
| Índice Estabilidad | E |
| Q tasa de emisión | 0,15 |
| σ_y Coeficiente de dispersión horizontal | 0,599700225 |
| σ_z Coeficiente de dispersión vertical | 0,299102692 |
| u velocidad del viento | 6 |
| h altura efectiva | 5 |
| y | 2 |
| z | 2 |
| x dirección del viento | 10 |

A continuación se exponen los datos de dispersión de los contaminantes obtenidos por aplicación de la herramienta informática desarrollada en la presente tesis. Esta planilla fue validada para otra situación con software Aloha. En el caso de emisiones en tanques, lo único que nos permite hacer el software TANK 4.0 es el cómputo de emisiones.

Si se quiere exponer los datos en función de la dispersión, el gráfico que se vería sería parecido a lo siguiente:

Fig.6.4.2 Concentración vs Distancia Caso B

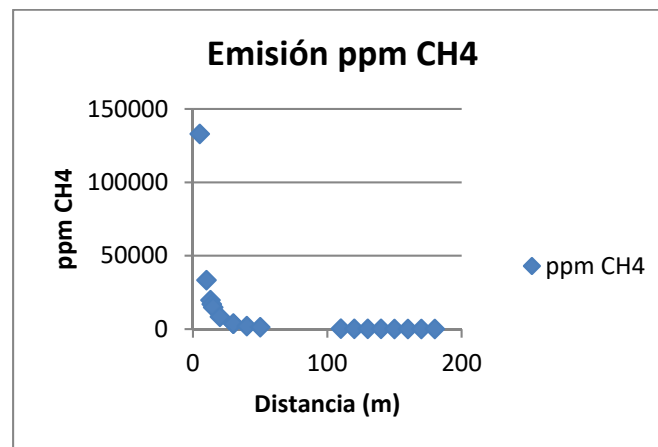


Tabla.6.4.2 Parámetros de dispersión - Caso B

| Concentración kg/m ³ | Distancia (m) | Dispersión sy | Dispersión sz | ppm CH4 | ppm CO2 | Aire respirable ppm O2 0,21 |
|------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------|------------|--------------------------------|
| 0,088574177 | 5 | 0,299925028 | 0,149775337 | 133005,198 | 19973,4769 | 75994,80117 |
| 0,022182251 | 10 | 0,599700225 | 0,299102692 | 33309,4220 | 5002,09750 | 175690,578 |
| 0,002476547 | 30 | 1,79730606 | 0,89197225 | 3718,84516 | 558,461389 | 205281,1548 |
| 0,013139338 | 13 | 0,779493494 | 0,388484909 | 19730,3588 | 2962,92077 | 189269,6412 |
| 0,011333279 | 14 | 0,839412617 | 0,418243378 | 17018,3348 | 2555,65438 | 191981,6652 |
| 0,009875988 | 15 | 0,899325758 | 0,447984072 | 14830,0298 | 2227,03519 | 194169,9702 |
| Debajo límite respirable | | | | | | |
| 0,005564902 | 20 | 1,198801797 | 0,596421471 | 8356,39648 | 1254,88547 | 200643,6035 |
| 0,002476547 | 30 | 1,79730606 | 0,89197225 | 3718,84516 | 558,461389 | 205281,1548 |
| 0,001381168 | 40 | 2,395214352 | 1,185770751 | 2073,99588 | 311,453307 | 206926,0041 |
| 0,000874458 | 50 | 2,992528008 | 1,477832512 | 1313,10779 | 197,190248 | 207686,8922 |
| 0,000183392 | 110 | 6,563996756 | 3,194578896 | 275,385463 | 41,3548135 | 208724,6145 |



“Emisiones Gaseosas de la Actividad Hidrocarburífera *Upstream*”

Ing. Flavia Ruiz

| | | | | | | |
|-------------|-----|-------------|-------------|------------|------------|-------------|
| 0,00015494 | 120 | 7,157184952 | 3,474903475 | 232,662524 | 34,9390821 | 208767,3375 |
| | | | | | 1 | |
| 0,000132731 | 130 | 7,74978903 | 3,75360924 | 199,311904 | 29,9307979 | 208800,6881 |
| | | | | 4 | 3 | |
| 0,000115052 | 140 | 8,341810284 | 4,030710173 | 172,764441 | 25,9441481 | 208827,2356 |
| | | | | 1 | 6 | |
| 0,000100742 | 150 | 8,933250006 | 4,306220096 | 151,277020 | 22,7173682 | 208848,723 |
| | | | | 2 | 1 | |
| 8,8992E-05 | 160 | 9,524109482 | 4,580152672 | 133,632542 | 20,0676855 | 208866,3675 |
| | | | | 2 | 1 | |
| 7,92209E-05 | 170 | 10,11438999 | 4,852521408 | 118,960101 | 17,8643156 | 208881,0399 |
| | | | | 6 | | |
| 7,10051E-05 | 180 | 10,70409282 | 5,123339658 | 106,623080 | 16,0116571 | 208893,3769 |
| | | | | 8 | 9 | |

6.5 Caso C: Tanque de almacenamiento con hidrocarburos volátiles

En un yacimiento, las propiedades de los fluidos transportados cambian continuamente, los sistemas son dinámicos, y muchas veces nos encontramos con situaciones de tanques que reciben condensado más que hidrocarburo y las pérdidas por fluctuaciones en la operación son numerosas y por ende las emisiones.

Se analizará la emisión de un tanque, sin embargo, cabe aclarar que la proyección a la cantidad de tanques en un yacimiento puede dar emisiones alarmantes si pronosticamos la sinergia de las emisiones de un área. En este caso, siguiendo la línea de los análisis precedentes computaremos las emisiones con la planilla de cálculo desarrollada y luego corroboraremos con el soft **Hysis** para evaluar consistencia.

Para la última verificación contamos con las curvas de destilación de los condensados:

6.5.1 Propiedades de los fluidos almacenados

Tabla 6.5.1 Curva de destilación de petróleo de yacimientos no convencionales

| Curva de Destilación ASTM D86 | |
|-------------------------------|-------------|
| Temperatura °C | Destilado % |
| 38 | Pra. Gota |
| 78 | 10 |
| 106 | 20 |
| 130 | 30 |
| 158 | 40 |
| 204 | 50 |
| 260 | 60 |
| 308 | 70 |



Ing. Flavia Ruiz

| | |
|-----|----|
| 322 | 80 |
| 350 | 90 |
| 360 | 92 |

Tabla 6.5.2 Curva de condensado de planta de tratamiento de Gas 1:

| Curva de Destilación ASTM D86 | |
|-------------------------------|-------------|
| Temperatura °C | Destilado % |
| 34 | Pra. Gota |
| 54 | 10 |
| 64 | 20 |
| 76 | 30 |
| 86 | 40 |
| 94 | 50 |
| 106 | 60 |
| 126 | 70 |
| 158 | 80 |
| 256 | 90 |
| 360 | 94 |

Este fluido se almacena en tanque. Al estar oficiando estos tanques como tanques de rebombeo, los niveles de operación no son constantes, por ende podemos encontrar que se perderán hidrocarburos por llenado y por vaciado del tanque y por vaporización de hidrocarburos. Al quitarse todo el líquido almacenado en un tanque, todo el espacio del mismo quedará ocupado por sus vapores.

Cuando el tanque es llenado nuevamente, los vapores remanentes del vaciado se comprimirán aumentando su presión hasta que finalmente se alcance la presión de activación de las válvulas de alivio, lo que permitirá el escape de gas constituyendo una pérdida por llenado.

Si el fluido sufre aumento de temperatura del líquido almacenado, debido a un flujo calórico a través de las paredes del tanque, existirán pérdidas por evaporación.

6.5.2 Simulación de emisiones

Tabla 6.5.2 Cómputo de emisiones

| <i>API 19</i> | | | |
|------------------------------------|----------|--------|--------|
| <u>Computo emisiones volátiles</u> | | | |
| | Variable | Número | Unidad |



“Emisiones Gaseosas de la Actividad Hidrocarburífera *Upstream*”

Ing. Flavia Ruiz

| | | | |
|---|-------------------|----------|--------|
| Pérdidas totales por evaporación en tanques con techo fijo | LT=LS+LW | 0,001605 | kg/seg |
| Diámetro del tanque | D | 20 | ft |
| Altura envolvente | h | 25 | ft |
| Forma de techo | Cónico Convexo | | |
| Ubicación | | | |
| Temperatura del fluido almacenado | Tf | 80 | °F |
| Presión de vapor | Pv | 30 | psia |
| Nivel de llenado | | 0,5 | |

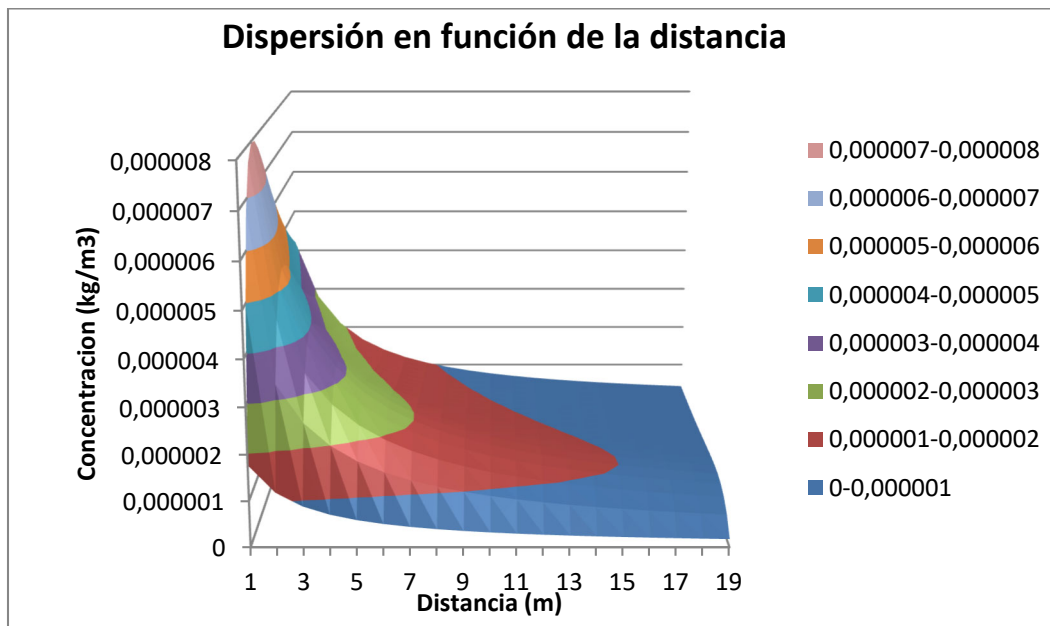
El cómputo de emisiones en un solo tanque constituye un riesgo menor comparando con las emisiones de otras actividades.

Tabla 6.5.3 Parámetros de dispersión –Caso C

| Concentración kg/m ³ | Distancia | Dispersión sy | Dispersión sz | ppm HC | Aire respirable ppm O ₂ 0,21 |
|---------------------------------|-----------|---------------|---------------|-------------|---|
| 0,000944791 | 5 | 0,299925028 | 0,149775337 | 1418,722121 | 207581,2779 |
| 0,000236611 | 10 | 0,599700225 | 0,299102692 | 355,3005016 | 208644,6995 |
| 0,000164428 | 12 | 0,719568388 | 0,358708649 | 246,9087211 | 208753,0913 |
| 0,000140153 | 13 | 0,779493494 | 0,388484909 | 210,4571605 | 208789,5428 |
| 0,000120888 | 14 | 0,839412617 | 0,418243378 | 181,5289051 | 208818,4711 |
| 0,000105344 | 15 | 0,899325758 | 0,447984072 | 158,186985 | 208841,813 |
| 5,9359E-05 | 20 | 1,198801797 | 0,596421471 | 89,13489584 | 208910,8651 |
| 2,64165E-05 | 30 | 1,79730606 | 0,89197225 | 39,66768171 | 208960,3323 |
| 1,47325E-05 | 40 | 2,395214352 | 1,185770751 | 22,12262281 | 208977,8774 |
| 9,32755E-06 | 50 | 2,992528008 | 1,477832512 | 14,0064831 | 208985,9935 |
| 1,95618E-06 | 110 | 6,563996756 | 3,194578896 | 2,937444941 | 208997,0626 |
| 1,6527E-06 | 120 | 7,157184952 | 3,474903475 | 2,48173359 | 208997,5183 |
| 1,4158E-06 | 130 | 7,74978903 | 3,75360924 | 2,125993647 | 208997,874 |
| 1,22722E-06 | 140 | 8,341810284 | 4,030710173 | 1,842820706 | 208998,1572 |
| 1,07458E-06 | 150 | 8,933250006 | 4,306220096 | 1,613621548 | 208998,3864 |
| 9,49248E-07 | 160 | 9,524109482 | 4,580152672 | 1,425413783 | 208998,5746 |
| 8,45023E-07 | 170 | 10,11438999 | 4,852521408 | 1,268907751 | 208998,7311 |

| | | | | | |
|-------------|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 7,57388E-07 | 180 | 10,70409282 | 5,123339658 | 1,137312862 | 208998,8627 |
|-------------|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|

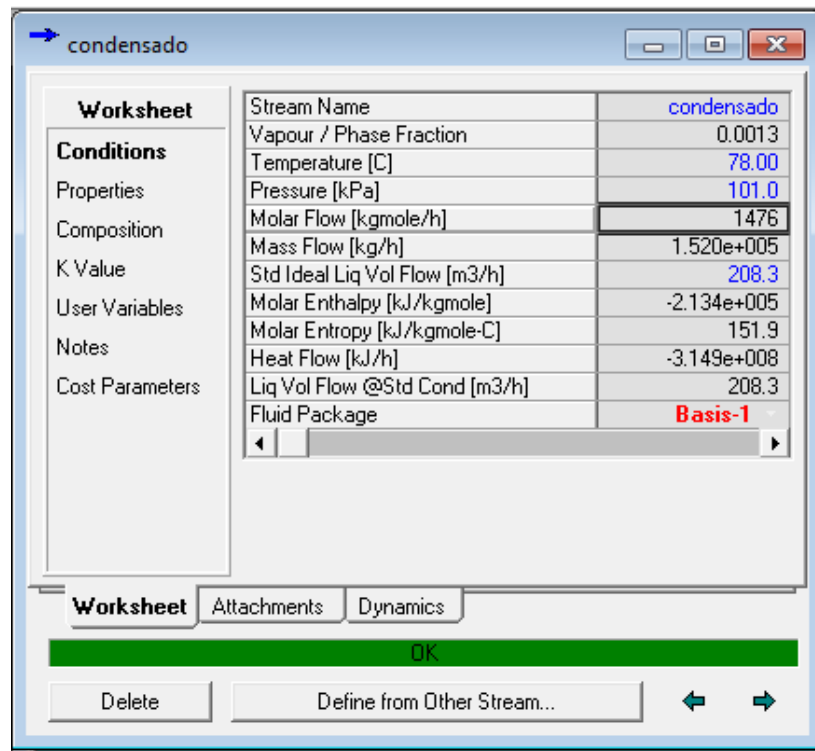
Fig.6.5.2 Dispersión Vs. Distancia Caso C



En este caso, puede observarse que las concentraciones emitidas no alcanzan a constituir un riesgo toxicológico con un solo tanques, aunque es innegable que el impacto al medioambiente existe y debe ser un punto de partida para analizar a futuro la incorporación de más tanques.

Sin embargo, independientemente del riesgo toxicológico, a este tipo de emisiones debe adicionarse algunos otros hidrocarburos livianos además del CH₄. La ventaja en este tipo de emisiones es que la recuperación es relativamente fácil y la inversión de un sistema de recuperación de vapores lleva de la mano un recuperero de producto.

Validación con Hysis



| Worksheet | |
|-------------------------------|----------------|
| Stream Name | condensado |
| Vapour / Phase Fraction | 0.0013 |
| Temperature [C] | 78.00 |
| Pressure [kPa] | 101.0 |
| Molar Flow [kgmole/h] | 1476 |
| Mass Flow [kg/h] | 1.520e+005 |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 208.3 |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole] | -2.134e+005 |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C] | 151.9 |
| Heat Flow [kJ/h] | -3.149e+008 |
| Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h] | 208.3 |
| Fluid Package | Basis-1 |

Worksheet Attachments Dynamics

OK

Delete Define from Other Stream...

Fig 6.5.3 Cálculo con Hysis Caso C

Cargando una curva de destilación y estimando las pérdidas evaporativas son comparables en cuanto a fracción evaporada, Fracción: 0.0013, que pareciera consistente, sin embargo en cuanto a caudal evaporado, las temperaturas y presiones a las que el caudal es representativo no son totalmente consistentes con la planilla elaborada en base a API 19, por lo que si bien el software Hysis es reconocido, para el caso de cálculo de pérdidas evaporativas no fue posible aplicarlo para validarlo con la planilla elaborada.

6.6 Caso D: Transporte de Gas

Una vez que el gas está en especificación, se lo transporta por gasoductos. Los gasoductos poseen diferente instrumentación para bloqueo y otras utilidades.

Tabla 6.6.1 : Computo de emisiones.

| | | | Unidades | E CH4 tonn/año |
|---|--------|-------------------|----------|----------------|
| Blowdown de compresores de gas | 101,7 | tonn/estación-año | 2 | 203,4 |
| Venteos/Blowdowns Cañerías de Gas 1 | 0,7855 | tonn/estación-año | 50 | 39,275 |
| Venteos/Blowdowns Cañerías de Gas 1 | 0,7855 | tonn/estación-año | 1 | 0,7855 |
| Estacion de venteo en almacenaje de gas | 83,61 | tonn/estación-año | 1 | 83,61 |
| | | | | 327,0705 |

Esto sería el equivalente anual, sin embargo, en situaciones de emergencia, este caudal se produce en forma instantánea, por lo que los riesgos a la salud aumentarían por los altos caudales en forma puntual.

De todos modos, la frecuencia con la que podría darse un escenario de este tipo es tan baja, dada que esta sería una etapa de pocas intervenciones en el proceso y prácticamente nula, por lo que de los tres escenarios propuestos, el caso 2 sería el más crítico, dado que las emisiones serían continuas y los efectos crónicos podrían presentarse, sin embargo, a los fines de validación con Hysis, la situación a comparar sería más comparable a la situación 1.

Simulando una fuga puntual obtenemos con Hysis 66.8 tonn/año sólo para un *blowdown* con una apertura del 100%. Como puede notarse, los valores de la herramienta son del orden de los calculados con Hysis.

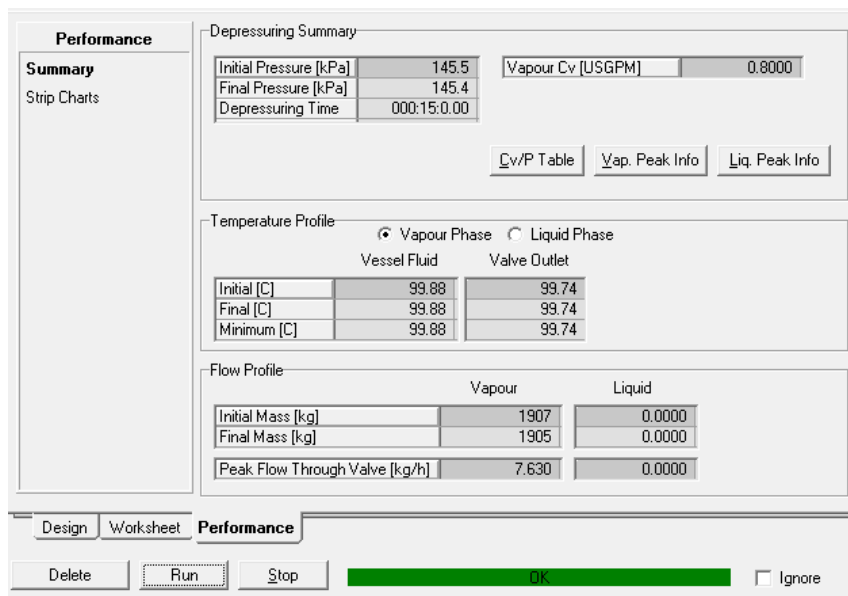


Fig 6.6.1 Cálculo con Hysis Caso D

6.7 Cuadro comparativo

| Escenario | Cómputo de emisión Herramienta Desarrollada | Software de validación | Comentarios | Tipo de emisión |
|---|---|---|---|--|
| Caso A: Planta de tratamiento de Gas | Caudal de emisión: 0.5 kg/seg 15 m: 45000 ppm 29 m: 12396 ppm 110 m: 917 ppm | Aloha 0.5 kg/seg 17000 ppm 12000-28000 ppm 2900 ppm | Aloha desestima la fiabilidad a cortas distancias por presuponer efecto de agregación. La dispersión, al igual que en la herramienta desarrollada, es calculada con ecuaciones gaussianas. Sin embargo en la zona de confianza, los resultados son consistentes. | Aloha no realiza cómputo de emisiones y sólo predice el comportamiento para dispersión de CH ₄ y no para CO ₂ . |
| Caso B: Batería | Cómputo de emisiones flash en un tanque de almacenamiento de petróleo E CH ₄ : 67,6 tonn CH ₄ /año E CO ₂ : 30,5 tonn CH ₄ /año | Tank 4.0 =4947.68 lbs/año x 0.0095 tonn/lb= 47 tonn /año | Tank 4.0 El software Tank no calcula dispersión | |
| Caso C: Tanque de almacenamiento con hidrocarburos volátiles | Pérdidas totales por evaporación en tanques con techo fijo LT=LS+L W: 0,001605 kg/seg | Hysis Fracción: 0.0013, que pareciera consistente, sin embargo en cuanto a caudal evaporado. | Las temperaturas y presiones a las que el caudal es representativo no son totalmente consistentes con la planilla elaborada en base a API 19. | |
| Caso D: Transporte de Gas | Blowdown: 101 tonn/año | A | Como puede notarse, los | |



los fines de valores de la
validación con herramienta
Hysis, la son del orden
situación a de los
comparar sería calculados con
más Hysis.

comparable a
la situación de
blowdown

Sim

ulando una
fuga puntual
obtenemos

con Hysis
66.8 tonn/año
sólo para un
blowdown con
una apertura
del 100%.



7. Capítulo 7: Discusión de los resultados

Del desarrollo y análisis de la presente tesis, se obtienen resultados que sirven como diagnóstico preliminar en una evaluación de impacto ambiental, contemplando la dispersión de la emisión de contaminantes a raíz del procesamiento de hidrocarburos en Instalaciones de Superficie.

7.1 Caso A: Planta de tratamiento de Gas

Se aplicó la planilla desarrollada para calcular emisiones y dispersión para determinar las emisiones de un proceso de Tratamiento de deshidratación de Gas con glicol.

Con la intención de validar la herramienta, se simuló con software Aloha⁹. Analizando los resultados arrojados por ambas herramientas, se observa consistencia, tanto en cómputo de emisiones como en dispersión de los mismos. Sin embargo, el enfoque de los *softwares* existentes no está alineado en su totalidad al enfoque pretendido en esta tesis, sólo se los ha utilizado para ir mostrando consistencia con los cálculos expuestos.

Los resultados obtenidos muestran que los gases emitidos en operación normal de un proceso de tratamiento de hidrocarburos líquidos o gaseosos se mantienen a alturas donde pueden ser respirados. Si bien los contaminantes evaluados en la presente tesis no son considerados como tóxicos letales, cuando la emisión es en lugares abiertos la difusión y concentración de los mismos puede generar una alta concentración e incluso de desplazamiento de aire disminuyendo concentraciones de oxígeno en aire. La dispersión amplía la pluma de contaminantes, reduciendo la concentración puntual y el riesgo de asfixia desaparece, aunque el desplazamiento de oxígeno puede ocasionar llegar a estar en límites de calidad de aire, donde está comprobado que aparecen cefaleas.

7.2 Caso B: Batería

Las Baterías son instalaciones comunes y en gran cantidad en la cadena de procesamiento de hidrocarburos. El tipo de equipos que se presentan en mayoría son tanques. Al igual que en el caso anterior, para validar la herramienta informática desarrollada, como aplicación en instalaciones

⁹ Aloha: Ver descripción del software en Capítulo 2.



con parque de trasvasando y procesando hidrocarburos líquidos, se utilizó un software reconocido para emisiones de tanques TANK 4.0. Cabe aclarar que el software solo permite comparar los venteos en operación normal, validando la herramienta dado que los resultados obtenidos son consistentes.

Por otro lado, de los cálculos de dispersión con ecuaciones gaussianas, se ve que en los primeros 15 m desde la fuente de emisión, las concentraciones están por debajo del límite de calidad de aire respirable. Si bien la cantidad de CH₄ emitido no llega a ser tal que pueda generar asfixia, la exposición continua de elementos que no integran la composición de un aire limpio alteran los organismos generando diferentes tipos de patologías crónicas.

Simulando una mezcla con oxígeno se observa que la concentración para asfixia (18% de O₂ en aire) podría darse en situaciones mucho más extremas que la de operación normal de una batería.

7.3 Caso C: Tanque de almacenamiento con hidrocarburos volátiles

En este caso, tal como en la situación anterior, los principales equipos que generan emisiones serán tanques de almacenamiento de fluidos volátiles. En este caso sumado a la planilla de cálculo se calcularon las emisiones por los techos según API 19. Para validar las rutinas de cálculos se utilizó el *software* Hysis. En este caso la planilla de cálculo subestima las emisiones con respecto al software, sin embargo, pero en el rango de consistencia es proporcional a las planillas *Excel*. Es probable que la no es coincidencia se deba a que los equilibrios termodinámicos planteados en API RP19 son específicos para tanques y hysis no contempla la geometría ni vaciado ni llenado de tanques.

7.4 Caso D: Transporte de Gas

Las emisiones en gasoductos son de rutinas, dado que si existe fuga no se estará en una situación normal del proceso.

En caso de emergencia por rotura del ducto, se enviará el fluido a venteo por *blowdown*. La herramienta informática desarrollada permite computar el caudal emitido en un *blowdown*, para la validación de este cálculo se utilizó el software *Hysis*, obteniéndose una emisión menor a la de la herramienta pero del orden.



7.5 Generalidades de la discusión de resultados

La planilla de cálculo contempla, además de los cálculos de emisiones y dispersión, la geografía, pretendiendo sentar las bases para concluir la posibilidad de riesgo inminente en cuanto a salud para las zonas cercanas a Instalaciones de procesamiento de Gas y Petróleo. Este tipo de riesgo no se ha contemplado hasta el momento como tal, por ser de carácter imperceptible al corto plazo y difícil de probar debido a otras fuentes de contaminación. Sin embargo analizando en forma sistémica es recomendable incluir los factores de emisión de gases como factores a incluir en la evaluación de impactos.

De lo anteriormente calculado y expuesto, puede verse que si bien la evaluación de CH₄ y la de CO₂ clásicas radica en el enfoque de aumento de gases de efecto invernadero, el riesgo de respirar emisiones de gases que puedan generar algún efecto adverso sobre la salud es grande.

Las concentraciones de CO₂ y CH₄ emitidas por los procesos de la industria hidrocarburífera no alcanzan valores emitido puntuales cuyas concentraciones que afecten la salud, al menos en parámetros que hayan sido estudiados ni a dosis letales, sin embargo las alergias en general han tenido una tendencia al aumento aunque es más difícil de identificar o cualificar.

Dado que el sistema de Salud no incluye aspectos de estadísticas de consultas en enfermedades respiratorias, es interesante poder predecir y en un futuro comparar o ir identificando aspectos que indiquen aumentos en algún aspecto de la salud respiratoria de la población.

En los capítulos precedentes se ha desarrollado la emisión de contaminantes y simulado la dispersión de los mismos.

Por otro lado, esas emisiones que se producen en algunas etapas de procesos podrían ser recuperadas y aprovechadas, lo que implicaría no solo optimización de procesos sino disminución de contaminantes.

Como consecuencia a la exposición al aire contaminado, las personas mayores, niños, o aquellos quienes sufren de enfermedades cardiopulmonares, son las más vulnerables para contraer asma o bronquitis. Los niños están bajo un mayor riesgo ya que sus pulmones aún están en proceso de desarrollo. Y como pasan mucho tiempo jugando al aire libre, suelen respirar más aire contaminado que la mayoría de los adultos.



Esta consecuencia hacia la salud no se verá en forma inmediata en áreas petroleras del sur de Argentina, ya que los vientos hacen que la contaminación no se estanque, sino que se traslade y difunde.

Sin embargo, queda demostrado que no es errado el cambio de paradigma de que solo era gases de contribución al efecto invernadero, sino que la sinergia de las emisiones producidas por las instalaciones puede ser responsable de disminución de la calidad de vida de una población, que si bien no es numerosa, va en incremento debido a los asentamientos poblacionales muchas veces ilegales, en zonas cercanas a desarrollo de las poblaciones.

Actualmente en Estados Unidos está cambiando el paradigma de clasificación del metano y el dióxido como contaminantes, sobre todo en zonas en donde la actividad hidrocarburífera ha sido intensa, dado que si bien en zonas de mucho viento la concentración asfixiante es improbable lograrla, los efectos crónicos en el sistema respiratorio ya están comenzando a evaluarse.



8. Capítulo 8: Conclusiones y Recomendaciones

Del análisis de la presente tesis a lo largo de los capítulos desarrollados puede verse que para la hipótesis planteada la principal dificultad radica en la determinación de las emisiones gaseosas y concentraciones de las mismas. No es un tema fácil debido a la gran imprevisibilidad de los factores que deben tenerse en cuenta para hacer las evaluaciones ambientales de cada caso. Por un lado está la dificultad de realizar muestreo significativo y en abundancia, ya que es muy costoso y por el otro está la dependencia de los gases en su comportamiento con las situaciones meteorológicas. Evaluar la dispersión en forma experimental implica muestrear en las infinitas combinaciones de situaciones de emisión. Por tal motivo, hacer monitoreos o seguimientos de emisiones es válido en algún proceso, pero debido a la infinidad de situaciones no representa un dato útil para prevención de impactos.

Hacer cálculos siguiendo las normas internacionales tiene ventaja sobre la utilización de datos determinados a partir de mediciones in situ, dado que no siempre se puede contar con cantidad y calidad de los mismos debido a la variabilidad del ambiente, esta dificultad se presenta también en la falta de reproducibilidad de muestreo. Resumiendo: a lo largo de este trabajo se hizo un examen de situación actual del problema de contaminación del aire por emisión de gases de fuentes de hidrocarburos. Se describió el comportamiento de los gases y sus propiedades, y las instalaciones de producción de las cuales podrían desprenderse, en caso de fugas, o emergencias. También se discutió el problema de las emisiones relacionado con el entorno atmosférico, y se recopiló las ecuaciones que se utilizan para las determinaciones de dispersión de gases.

Se hizo acopio de toda la información disponible, y utilizando las ecuaciones más apropiadas, se logró desarrollar un programa computacional mediante una planilla de cálculo, con la cual se realizaron cálculos para diferentes casos, según puede verse en capítulos anteriores. Los resultados obtenidos fueron comparados con software existente, a los efectos de validar la bondad del producto desarrollado.

Por lo anteriormente expuesto se tiene como conclusión general de la presente tesis lo siguiente:



La herramienta informática desarrollada es simple y válida para cuantificar y simular la dispersión de contaminantes tales como CO₂ y CH₄ para instalaciones de procesamiento de gas y petróleo a los efectos de ser utilizada para diagnóstico preventivo.

Históricamente las emisiones de CH₄ y CO₂ que históricamente estaban clasificados como gases de efecto invernadero.

Las conclusiones parciales son:

- La herramienta es completa, porque computa emisiones y calcula dispersión de contaminantes para un sinfín de operaciones de procesamiento y transporte de hidrocarburos líquidos y gaseosos, con la confiabilidad de softwares disponibles en el mercado.
- La herramienta es simple, dado que funciona como planilla de cálculo, por lo que permite ejecutarse con la sola instalación de paquete Office.

De todo lo anterior se puede decir que ahora, a partir del uso de esta herramienta, se puede hacer diagnósticos en forma más rápida, confiable, y consistente con datos reales, pudiendo evaluar magnitud de desastre, en caso de querer recomendar acciones preventivas.



9. Anexos

9.1 Anexo A: Listado de Figuras y Tablas

Fig.1.1 Red Conceptual

Fig.2.1: Constantes físicas de alcanos

Fig 2.2: Envolverte de Fase de un hidrocarburo

Fig 2.3: Pantalla de componentes Fluido 1 Hysis

Fig 2.4: Envolverte de Fase fluido 1 – Hysis

Fig 2.5: Pantalla de componentes Fluido 2 Hysis

Fig 2.6: Pantalla de condiciones Fluido 2 Hysis

Fig 2.7: Envolverte de Fase fluido 2 – Hysis

Fig.4.1.3 Vapor liberado en tanques (ft³) vs. Presión de cámara que descarga al tanque (lb/in² manométricas (psig))

Fig.4.4 Esquema de Procesos de Gas

Fig.4.5 Esquema de Procesos de Petróleo

Fig 5.1: Pluma de Venteo de Planta de Recuperación de Condensables en Cuenca Neuquina

Fig 5.2 (a,b,c) : Distintos tipos de plumas

Fig 5.3: Esquema efecto de altura de fuente de emisión y velocidad de gases de salida.

Fig.5.4: Esquema de Influencia de Orografía en la difusión

Fig. 5.5: Modelización de Fuente Puntual

Fig.5.6.Los tres términos de la ecuación gaussiana del penacho. Concentración central y términos vertical y lateral.

Fig.5.7. Esquema para descripción de modelo matemático

Fig 5.8 Coeficiente de dispersión lateral σ_y según distancia y categoría de estabilidad atmosférica

Fig 5.9: Coeficiente de dispersión vertical σ_z según distancia y categoría atmosférica

Fig. 6.1 Ubicación geográfica de un pozo de petróleo en cercanía de una vivienda

Fig.6.2 Instalación de Procesamiento de Crudo

Fig. 6.3: Yacimientos vs. Asentamientos

Fig. 6.1.1: Esquema de emisiones en la Industria

Fig. 6.1.2: Esquema de Deshidratación de Gas con glicol



Fig.6.2.1 Concentración Vs. Distancia de la fuente de emisión –Caso A

Fig.6.2.2 Concentración Vs. Dispersión –Caso A

Fig.6.2.3 Dispersión vs. Distancia –Caso A

Fig. 6.3.1 Gradiente de Concentración-software Aloha

Fig. 6.4 Esquema ilustrativo de Proceso

Fig.6.4.2 Concentración vs Distancia Caso B

Fig.6.5.2 Dispersión Vs. Distancia Caso C

Fig 6.5.3 Cálculo con Hysis Caso C

Fig 6.6.1 Cálculo con Hysis Caso D

Tabla 2.6.3 Clasificación de crudos

Tabla 3.4.1: Anexo II :-Concentraciones máximas de contaminantes emitidos estipuladas en la ley 20284

Tabla 5.1 Distribuciones y volúmenes moleculares

Tabla 5.2: Difusividad de gases en aire a presión atmosférica

Tabla 5.3:Condiciones de Estabilidad meteorológica de Pasquill

Tabla 5.4 Factores de corrección de Holland según la clase de Estabilidad Atmosférica

Tabla 5.5 Fórmulas para los coeficientes de dispersión para suelos urbanos

Tabla 5.6: Parámetros utilizados para calcular la σ_y de Pasquill-Gifford

Tabla 5. 7: Utilizados para calcular la σ_z de Pasquill-Gifford

Tabla 6.3.1 Parámetros de dispersión Caso A evaluado con herramienta informática

Reporte 6.3.1 Parámetros de dispersión Caso A evaluado con software Aloha

Reporte 6.4.1 Parámetros de dispersión Caso B evaluado con software TANK 4.0

Tabla 6.4.1 Parámetros de evaluación Caso B.

Tabla.6.4.2 Parámetros de dispersión - Caso B

Tabla 6.5.1 Curva de destilación de petróleo de yacimientos no convencionales

Tabla 6.5.2 Curva de condensado de planta de tratamiento de Gas 1:

Tabla 6.5.2 Cómputo de emisiones

Tabla 6.5.3 Parámetros de dispersión –Caso C

Tabla 6.6.1 : Computo de emisiones.



9.2 Anexo B: Cálculos Adicionales

Calculo A: Unidad deshidratadora de glicol

- **Emisiones rutinarias**

Las emisiones computadas en etapa operativa de la torre deshidratadora serán las siguientes:

| | | | | |
|-------------------|-------|---------------------------|---------|--------|
| E CH ₄ | 76,72 | tonn CH ₄ /año | 0,0024 | kg/seg |
| E CO ₂ | 11,72 | tonn CO ₂ /año | 0,00037 | kg/seg |

Sumándoles al sistema la instrumentación neumática

| | | | | |
|---------------------------|--------|---------------------------|--------|--------|
| E CH ₄ Proceso | 262,45 | tonn CH ₄ /año | 0,0083 | kg/seg |
| E CO ₂ Proceso | 40,097 | tonn CO ₂ /año | 0,0013 | kg/seg |

En general, en la unidad recuperadora de glicol existen bombas neumáticas:

| | | | | |
|-------------------|-------|---------------------------|-----------|------|
| E CH ₄ | 9,363 | tonn CH ₄ -año | 0,0002969 | kg/s |
|-------------------|-------|---------------------------|-----------|------|

Entonces, para el procesamiento de 1.000.000 Sm³/d las emisiones en operación normal serán:

$$E \text{ CH}_4 = 348.53 \text{ tonn/año} = 0.011 \text{ kg/s}$$

- **Situación no rutinarias asociadas con Instalaciones de Gas**

Las emisiones no rutinarias de una instalación

| | | |
|-------------------|--------|---------------------------|
| E CH ₄ | 45.406 | tonn CH ₄ -año |
|-------------------|--------|---------------------------|

Estas emisiones se deben sumar a las de operación normal, por lo que las emisiones totales serán:

| | | | | |
|---------------------------|--------|---------------------------|-------|------|
| E CH ₄ totales | 393,94 | tonn CH ₄ -año | 0,012 | kg/s |
|---------------------------|--------|---------------------------|-------|------|



Analizando, las emisiones anteriormente computadas están distribuidas a lo largo del año, sin embargo, en la sección siguiente se computarán las emisiones en situación de emergencia, por lo que si bien los factores se expresan en tonn emitidas/año, en situación de emergencia cabe destacar que los picos de emisión serán puntuales, en como mucho alrededor de 15 eventos al año.

Caso B:

Emisiones tanque de agua de formación

| | | |
|--|-----------------|--|
| Caudal de agua producida | 58558,14 | bbl/d |
| Presión en el separador aguas arriba | 43,3 | psig |
| Presión en el separador aguas arriba (tabulada) | 250-10 | psig-%Sales |
| Factor de emisión | 16,4 | 10 ⁶ lb CH ₄ /año |
| Factor de emisión | 0,015 | tonn CH ₄ /1000 bbl Agua Producida |
| Factor de emisión | 0,09 | tonn CH ₄ /1000 m ³ Agua Producida |
| ECH₄ | 320,60 | tonn CH₄/año |

Emisiones en tanques de agua de formación:

E CH₄ 320,6 tonn CH₄/año

Emisiones en tanques que utilizan Gas de Blanketing

E CH₄ 1712,4 tonn CH₄/año

E CO₂ 57,4 tonn CO₂/año

E CH₄=1712.44 tonn CH₄/año

E CO₂= 57.4 tonn CO₂/año