

Universidad de Matanzas

Sede "Camilo Cienfuegos"

Facultad de Ciencias Técnicas

Departamento de Química



TRABAJO DE DIPLOMA

Tesis presentada en opción al título de ingeniero químico.

Título: Pronóstico de probabilidad de ocurrencia de accidentes por escape de Bisulfuro de Carbono y su impacto humano en la zona industrial de Matanzas.

Autora: Lianys María Triana Horta

Tutores: Ing. Santiago Díaz Suárez MSc

Matanzas, Cuba, 2021

Nota de aceptación.

Dedicatoria.

A mi papá.

A mi mamá.

Agradecimientos.

Quiero agradecer a todas las personas que de una forma u otra me apoyaron:

Ante todo, mi familia por siempre estar ahí para mí.

A mis padres por ser la luz de mis ojos, por apoyarme incansablemente, creer en mí, darme la fuerza para seguir adelante y ayudarme a ser una mejor persona cada día.

A mi abuela, mi padrino y mis bisabuelos por siempre estar al pendiente y por su comprensión.

A mi novio por siempre estar ahí, por apoyarme y aguantarme en los días tensos.

A mis amigos principalmente a Rachel por aguantarme, por apoyarme en todo, por todos los momentos que hemos pasado juntos.

A mi tutor Santiago y a Lisbett por su confianza y su dedicación a pesar de las circunstancias.

A todos los profesores que contribuyeron en mi formación.

En fin, gracias a todos y cada uno de ustedes por tenderme su mano y confiar en mí.

Resumen.

Este trabajo de investigación es la versión 5.4.7 del software ALOHA (*Areal Locations of Hazardous Atmospheres de sus siglas en inglés*), se realiza en la Empresa Rayonitro de Matanzas, ubicada en la zona industrial de dicha provincia. En él se determinaron los escenarios de riesgo más probables como son la nube tóxica, el *Pool Fire* (piscina de fuego) y el BLEVE (bola de fuego). Mediante el software ALOHA se evaluaron las áreas de atmosferas peligrosas obteniéndose la de mayor riesgo. Mediante las Ecuaciones Probit se obtuvieron las afectaciones humanas en la zona de estudio de ocurrir un accidente y se determinó que el escenario de riesgo que mayor repercusión negativa tendría sobre la población y los trabajadores de la planta es el BLEVE.

Summary.

This investigation work is the version 5.4.7 of the software ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres of its initials in English), it is carried out in the Company Rayonitro of Matanzas, located in the industrial area of this county. In him the most probable scenarios of risk were determined as they are the toxic cloud, the Pool Fire (fire pool) and the BLEVE (fire ball). By means of the software ALOHA the areas of dangerous atmospheres were evaluated being obtained that of more risk. By means of the Equations Probit the human affectations were obtained in the study area of happening an accident and it was determined that the scenario of risk that bigger negative repercussion would have on the population and the workers of the plant is the BLEVE.

Índice.

Introducción.....	1
CAPÍTULO 1: Análisis Bibliográfico.....	3
1.1 Propiedades del bisulfuro de carbono	3
1.2 Características de los escenarios nube tóxica, incendio y explosiones.	5
1.2.1 Nube tóxica.	6
1.2.2 Incendios.....	7
1.2.3 Explosiones.....	10
1.3 Herramientas para cuantificar los daños que ocasionan al medio ambiente los diferentes escenarios de riesgo.....	12
1.4 Conclusiones parciales.....	17
CAPÍTULO 2: Materiales y Métodos.....	18
2.1 Caracterización de la empresa Rayonitro de Matanzas.	18
2.2 Procedimiento de identificación de la sustancia involucrada en el proceso. ...	18
2.2.1 Consideraciones relacionadas con el escenario de incendio y el estado de agregación de la sustancia.	21
2.3 Metodología general de investigación.	21
2.4 Características y particularidades del <i>software</i> ALOHA.	23
2.5 Método “ <i>Probit</i> ”	30
2.5.1 Vulnerabilidad a radiaciones térmicas.....	31
2.5.2 Vulnerabilidad a explosiones.....	32
CAPÍTULO 3: Análisis de los resultados.	35
3.1 Análisis para la selección de los escenarios de esta investigación.	35
3.2 Establecimiento de las condiciones de trabajo con el <i>software</i>	36
3.3 Análisis de los resultados del <i>software</i> ALOHA.....	36
3.3.1 Determinación del alcance del escenario <i>Pool Fire</i> para el Disulfuro de carbono.	37
3.3.1.1 Afectación de la radiación de un <i>Pool Fire</i> al personal de la planta de Disulfuro de carbono.....	40
3.3.2 Determinación del alcance del BLEVE.....	40

3.3.2.1 Afectación de la radiación de un BLEVE.	41
3.3.3 Determinación del alcance del escenario de una nube de vapor.	44
3.3.3.1 Afectación de la sobrepresión de una nube de vapor en la empresa Rayonitro de Matanzas.	46
3.4 Conclusiones Parciales.	49
Conclusiones.	51
Recomendaciones.	52
Bibliografía.	53
Anexos.	57

Introducción.

Conforme la humanidad ha ido avanzando, ha encontrado a su paso retos y desafíos que ha tenido que ir afrontando, que no sólo han supuesto dificultades a sus avances, sino que también han servido de estímulo y experiencia.

El rápido aumento del empleo de sustancias químicas peligrosas en la industria y el comercio ha producido un considerable incremento del número de personas, tanto trabajadores como ciudadanos en general, cuya vida podría estar en peligro en cualquier momento.

La incorrecta manipulación de estas sustancias provocadas por el desconocimiento ha provocado innumerables hechos como consecuencia de incendios, explosiones o escapes. Por lo que se le ha otorgado un espacio importante al estudio de los riesgos industriales, con el objetivo de disminuir su posibilidad de ocurrencia y de luchar contra la magnitud de sus consecuencias.

La Empresa Rayonitro de Matanzas es una industria destinada al almacenamiento y comercialización de sustancias químicas. En sus instalaciones se manejan sustancias de riesgo, como el bisulfuro de carbono. Por ello, es importante realizar un análisis de los eventos peligrosos que allí se pueden desencadenar, con el fin de estimar las consecuencias de dichos eventos con posibilidad de ocurrir.

Por años han sido desarrolladas varias investigaciones encaminadas a estudiar los escenarios de accidentes químicos que pueden producirse en dicha empresa, con las diferentes sustancias. Los resultados obtenidos tienen un gran valor a la hora de la confección de los planes de protección y emergencia de dicho centro. Siguiendo diferentes criterios de investigación, los proyectos realizados hasta la fecha han tratado de ofrecer resultados que respondan a la probabilidad de ocurrencia en función de las características propias del área objeto de estudio, y de las sustancias almacenadas.

En correspondencia con lo expuesto anteriormente, podemos plantear como **problema de investigación:**

¿Cómo determinar el peligro potencial que puede representar para la población, posibles accidentes químicos, por escapes bisulfuro de carbono, en la zona industrial de Matanzas?

Para dar solución a este problema se plantea la **hipótesis** siguiente:

Si se realiza una evaluación adecuada, se puede llegar a determinar la probabilidad de surgimiento de accidentes por toxicidad, incendio y explosión, y su impacto humano.

Para dar cumplimiento a la hipótesis se propone el siguiente **objetivo general**:

Evaluar el impacto sobre las personas al originarse accidentes tóxicos, de incendio y explosión en la zona industrial de Matanzas.

Objetivos específicos:

- Estimar el alcance de los posibles escenarios relacionados a incendios y explosiones.
- Seleccionar las herramientas más eficaces para determinar la probabilidad de ocurrencia de los diferentes escenarios.
- Cuantificar el daño humano producto de los diferentes escenarios en las direcciones donde laboren los empleados de la empresa y donde mayor población existe, para las sustancias objeto de estudio.

CAPÍTULO 1: Análisis Bibliográfico.

En el presente capítulo se realiza una revisión sobre las temáticas necesarias para el desarrollo de la investigación, donde se analizan las características y propiedades del bisulfuro de carbono, los escenarios de riesgos ambientales, así como las herramientas para cuantificar los daños que ocasionan al medio ambiente los diferentes escenarios de riesgo.

1.1 Propiedades del bisulfuro de carbono

El bisulfuro de carbono es el compuesto químico con fórmula CS_2 , líquido hasta $46^\circ C$, es extremadamente volátil. Es un compuesto de carbono y azufre que se utiliza a menudo como un componente básico en la química orgánica, como disolvente industrial o de laboratorio. Puro es incoloro y tiene un olor etéreo débil, pero las impurezas de azufre que contiene a menudo lo hacen amarillento y le dan un olor fuerte y desagradable. (Kehoe, 2006).

Propiedades físicas del bisulfuro de carbono:

- ✓ Masa molecular: 76.14 g/mol.
- ✓ Apariencia: Líquido incoloro, insoluble en agua y más denso que está, inflamable, de olor desagradable.
- ✓ Punto de ebullición: $46.5^\circ C$.
- ✓ Punto de fusión: $-11.5^\circ C$.
- ✓ Densidad: 1.22632 g/cm³ a $20^\circ C$.
- ✓ Presión a vapor: 297mmHg a $20^\circ C$.
- ✓ Factor de convección: 1ppm=3.11mg/m³ a $25^\circ C$.

El Bisulfuro de Carbono reacciona con sulfuros, alcoholes, Amoniac, Aminas y Cloro para producir importantes derivados y productos intermedios industriales. También reacciona lentamente con álcalis acuosos para producir tritocarbonato y carbonato. Reacciona con álcalis alcohólicos para producir xantatos (sales de ditiocarbamatos). Esta reacción es la base para el proceso en el cual la celulosa se convierte en xantato y se regenerada como fibras y películas. Reacciona con Amoniac, y dependiendo de la concentración y de la temperatura, forma

ditiocarbamato, tritiocarbonato y tiocianato de amonio. Con agua reacciona rápidamente en presencia de alúmina y óxidos catalizadores sobre los 150 °C para producir dióxido de Carbono y sulfuro de Hidrógeno. (Elvers B, Hawkins S y otros, 2000).

Esta sustancia se absorbe principalmente por inhalación, que se produce en los primeros 30 minutos de exposición; se absorbe alrededor del 80%, luego va decreciendo gradualmente. A este respecto dice el profesor Teisinger de Checoslovaquia: "Cuando el obrero abandona el lugar de trabajo contaminado, solamente alrededor del 5% del total de bisulfuro absorbido es eliminado por los pulmones". La eliminación dura alrededor de 97 horas después de la exposición y la misma se verifica en tres etapas. Por ello es que los trabajadores aún exhalan el bisulfuro al día siguiente antes de comenzar su turno de trabajo. El equilibrio entre el ambiente y la sangre se alcanza alrededor de los 90 a 120 minutos; el punto de saturación del organismo con el bisulfuro se alcanza a las 5 horas. Un 95% del producto es metabolizado en el organismo. (Poison, 2002).

Según la Organización Mundial de la Salud (2003) los efectos del bisulfuro de carbono en la salud humana y el ambiente dependen de la cantidad presente de esta sustancia, de la frecuencia y el tiempo de exposición. Los efectos también dependen de la salud de la persona o de las condiciones del ambiente cuando ocurre la exposición. Inhalar o consumir bisulfuro de carbono por períodos cortos de tiempo afecta el sistema nervioso; los efectos van desde mareo y dolor de cabeza, visión borrosa y agitación hasta convulsiones, coma y la muerte. El vapor del bisulfuro de carbono irrita la nariz y la garganta. El contacto directo del bisulfuro líquido con la piel causa quemaduras, y danos severos en los ojos. Estos efectos no ocurren con los niveles normales de bisulfuro de carbono que se encuentran en el ambiente.

Según *United States Environmental Protection Agency* (2009) puede causar también daño al sistema cardiovascular, resultando en un incremento de la presión arterial y enfermedad coronaria. Existen estudios que demuestran que el personal que es expuesto permanentemente a bisulfuro de carbono ha desarrollado

insuficiencias gastrointestinales y del sistema inmunológico. Las únicas rutas de exposición significativas son por inhalación y contacto con la piel, por lo que el bisulfuro de carbono pueda entrar al organismo humano por ingestión, de forma accidental o completamente intencional (suicidio).

Se encuentra en una amplia variedad de procesos industriales, además de la industria del petróleo, en la producción de pulpa y papel y en el tratamiento de las aguas residuales. Es también conocido como gas ácido, gas amargo o gas que apesta. (Gilman, 2018).

Según Occupational Safety & Health Administration (2000) esta sustancia se utiliza principalmente en la fabricación de productos sintéticos como el rayón, acetato, papel de cellophan, etc., pero también se utiliza en otros muchos procesos como, por ejemplo, en la extracción de grasas; en la fabricación del tetracloruro de carbono y alcanfor; en la fabricación de cementos a prueba de agua (plastilina); en lociones para el pelo; como solvente del fósforo, etc. Es ampliamente utilizado en la síntesis de compuestos orgánicos de azufre como metam sodio, xantatos, ditiocarbamatos, que se utilizan en la metalurgia extractiva y la química del caucho. Se puede utilizar en la fumigación de depósitos de almacenamiento herméticos, contenedores, elevadores de granos, vagones de ferrocarril, bodegas, barcazas y molinos de cereales. También se usa como insecticida para la fumigación de granos, material de vivero, en la conservación de frutas frescas y como desinfectante de suelos contra insectos y nematodos.

1.2 Características de los escenarios nube tóxica, incendio y explosiones.

En la industria de procesos existen tres tipos de escenarios accidentales: escenarios que determinan efectos peligrosos de tipo térmico (incendios), escenarios que determinan efectos mecánicos (explosiones) y escenarios que determinan efectos químicos (dispersión de producto tóxico). (Casal *et al.*, 1999; Ferrero, 2006).

1.2.1 Nube tóxica.

Según (Fernández, 2008) la nube tóxica se define como “la dispersión de vapores en forma de nube con concentraciones tales, capaces de provocar afectaciones para la salud”. Para describir la evolución de nubes tanto inflamables como tóxicas en la atmósfera y hacer posible su modelización, es muy importante conocer el grado de estabilidad atmosférica que existe. (Casal *et al*, 2001 y EPA, 2016). Las distintas variables meteorológicas afectan en menor o mayor grado la dispersión atmosférica de contaminantes, y a su vez, estas presentan una gran variabilidad estacional diaria. (Viatela, 2007 y Rodríguez *et al.*, 2014). Entre las principales variables meteorológicas que afectan la dispersión de nubes de contaminantes definidas por (Casal *et al*, 2001) se encuentran:

- El viento: tiene un efecto de arrastre que provoca la dispersión de nubes por desplazamiento de la masa de gas. Suele utilizarse un valor de 10 metros de altura en los modelos de dispersión.
- La estabilidad atmosférica: caracteriza la capacidad que la atmósfera tiene para dispersar un contaminante, es decir, representa el grado de turbulencia existente en un momento determinado. La clase de atmósfera viene determinada por la cantidad de insolación, la humedad, las inversiones nocturnas y el viento.
- La temperatura y la humedad relativa: básicamente son consecuencias de la estación del año. La humedad del aire solo tiene efectos significativos sobre la dispersión de un contaminante si existe reactividad entre el contaminante y el vapor de agua presente en la atmósfera, tiene también otro efecto significativo si el gas que se tiene que dispersar está a una temperatura más baja que la ambiente.
- La inversión térmica: se caracteriza por un aumento anómalo de temperatura en las capas altas atmosféricas. Desde el punto de vista de la dispersión de gases, este es un efecto muy importante, pues impide la dispersión en altura y provoca su reflexión hacia las capas bajas atmosféricas.

Una de las causas de accidentes más frecuentes es almacenar en una misma ubicación productos tóxicos y productos inflamables, dado que, en caso de incendio, los productos inflamables avivan el fuego y lo hacen mucho más agresivo. (Hernández, 2017).

1.2.2 Incendios.

Castro. D y Castro. K, (2014) y Febles, (2015) plantean que un incendio es una reacción química de oxidación - reducción fuertemente exotérmica, son los reactivos el oxidante y el reductor. En terminología de incendios, el reductor se denomina combustible y el oxidante, comburente; las reacciones entre ambos se denominan combustión. Para que un incendio se inicie es necesario que el combustible y el comburente se encuentren en espacio y tiempo en un estado energético suficiente para que se produzca la reacción entre ambos.

Los incendios presentan diferentes manifestaciones, como son incendios de gas, entre los que se encuentra el incendio de un chorro y una nube de gas, y los incendios de líquidos, como son la balsa de fuego al aire libre, bolas de fuego, borbollón (Boilover).

❖ Incendios de gas natural:

- **Incendio de un chorro de gas (*Jet fire*).**

Este tipo de incendio tiene lugar cuando se produce el vertido accidental de vapores o gases inflamables a presión, en áreas de proceso o depósitos de almacenaje. (Planas-Cuchi *et al.*,1997) y (Casal *et al.*, 2001). La peligrosidad de un incendio de chorro accidental reside en la posibilidad de efecto dominó, es decir, la propagación del accidente a otras instalaciones cercanas. (Ferrero, 2006). La radiación emitida por un chorro de fuego afecta generalmente a zonas muy limitadas, tanto por las usualmente reducidas dimensiones del chorro, como por su relativamente corto tiempo de exposición. Su peligro principal es la incidencia directa del dardo sobre otras superficies, sobre todo de equipos que contengan gases licuados. (Fernández, 2008).

- **Incendio de una nube de gas (*flash fire*).**

Este tipo de incendio tiene lugar cuando se produce el vertido de un gas o un vapor inflamable, de manera que se forma una nube que se va dispersando hasta que encuentra una fuente de ignición. El escape puede ser instantáneo o continuo. Estas nubes pueden estar originadas también por el vertido de un líquido que en condiciones atmosféricas experimente un flash o que se evapore muy rápidamente. (Planas-Cuchi *et al*, 1997 y Casal *et al*, 2001). “No es siempre fácil distinguir entre explosión o incendio de una nube de gas. Sin embargo, se puede decir que en el segundo caso los efectos de la presión pueden considerarse despreciables, siempre que no existan obstáculos al propagarse el frente de llama, el cual se mueve desde el punto de ignición hacia el punto de fuga, a través de las zonas que se encuentran entre los límites de inflamabilidad”. (Ferrero, 2006).

- ❖ **Incendios de líquidos:**

- **Incendios de balsa al aire libre (*pool fire*).**

Para Colmenero, (2011) y Piedra y Valdivieso, (2013), el suceso que desencadena este tipo de incendio es el vertido de un líquido inflamable que se extenderá sobre el suelo alcanzando un espesor reducido o, si existe una zona de contención, formando un charco de mayor profundidad. Además, afirman que se trata de un caso en el que el incendio se produce en una condición abierta, es decir, no presurizada. El incendio de charco o piscina de fuego, como también se le conoce, ocurre una vez que se produce una rotura en una línea que transfiere un fluido líquido y este a su vez se derrama. Cuando ocurre la evaporación instantánea del producto derramado, se puede originar una nube inflamable, la cual entra en ignición y posteriormente ocurre el incendio del producto que permanece esparcido sobre la superficie.

La máxima velocidad de quemado está en función del calor neto de combustión y del calor requerido para su vaporización. La radiación domina el régimen de

combustión para diámetros de llamas mayores a un metro, porque la llama se convierte en un cuerpo de radiación grueso ópticamente. (Wells, 2003).

- **Bolas de fuego/ BLEVE (*fireball*).**

Las bolas de fuego se producen por el estallido súbito y total, por calentamiento externo de un recipiente que contiene un gas inflamable licuado a presión, cuando el material de la pared pierde resistencia mecánica y no puede resistir la presión interior. El calentamiento extremo es generalmente producido por un incendio de charco o de dardo de fuego, y la probabilidad de que estalle es especialmente elevada en los casos en los que hay un contacto directo de la llama con la superficie del recipiente.” (Casal *et al*, 1999).

Según Ferrero (2006) los BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*) alcanzan dimensiones variables en función del volumen de los materiales involucrados en el accidente, por lo cual al estimar las consecuencias de este tipo de accidentes en actividades altamente riesgosas en las que puedan ocurrir, se requiere determinar la dimensión de las zonas intermedias de salvaguarda a establecer para proteger a la población.

Las explosiones de tipo BLEVE son uno de los peores accidentes que pueden ocurrir en la industria química o en el transporte de mercancías peligrosas. Las sustancias que lo pueden producir (butano, propano, cloruro de vinilo, cloro, etc.) son relativamente comunes en la industria, y abundan en las instalaciones susceptibles de sufrirlo (depósitos, cisternas). El origen puede ser diverso, pero una de las causas más frecuentes es la acción del fuego sobre un recipiente. (Casal *et al.*, 2002 y Wells, 2003).

- **Borbollón (*Boilover*).**

Según Michaelis *et al.*, (2014); Jarosz, (2014); Hristov, (2016) y Gutiérrez, (2016), el *boilover* se origina como consecuencia de un incendio de larga duración en un depósito abierto o tanque de almacenamiento de combustible, u otros líquidos

viscosos, de amplio rango de puntos de ebullición. Los componentes más pesados permanecen en la superficie y transmiten el calor a las capas inferiores de líquido, mientras que los más volátiles se desprenden y queman, debido a que la superficie del líquido se encuentra incendiada. Esto genera una onda de calor que desciende hacia el fondo del tanque y las capas inferiores del mismo. Si en estas últimas se da la presencia de agua, existe el riesgo de producirse la ebullición instantánea de la misma. El vapor de agua generado de forma tan súbita, produce la expulsión violenta del líquido contenido en el tanque y en consecuencia un derrame en el que ocasionalmente puede superar los muros de contención y destruir lo que encuentre a su paso.

Según Casal *et al*, (2002), Wells, (2003), Whemeier y Mitropetros, (2016) y Nwabueze, (2016) para que se produzca el *boilover* es necesario en general que se cumplan tres condiciones:

- Presencia de agua en el recipiente.
- Generación de una ola de calor, es decir, existencia de una amplia gama de volatilidades en los componentes presentes en el depósito.
- Que la viscosidad del hidrocarburo sea suficientemente elevada para dificultar el paso del vapor.

El *boilover* es uno de los accidentes más agresivos que involucran tanques de almacenamiento de líquidos inflamables. Más de 40 accidentes de este tipo han sido registrados desde finales del siglo XIX. Estos han causado muertes de civiles y bomberos, pérdidas financieras y destrucción de docenas de instalaciones industriales. (Pessanha, 2015).

1.2.3 Explosiones.

Una explosión es una liberación repentina de energía, que genera una onda de presión que se desplaza alejándose de la fuente mientras va disipando energía. Esta liberación tiene que ser, no obstante, bastante rápida y concentrada para que la onda que se genera sea audible. No es necesario, pues, que se produzcan

daños para poder considerar este fenómeno como explosión. La energía liberada puede haber sido almacenada inicialmente bajo una gran variedad de formas: nuclear, química, eléctrica o de presión (Sharma *et al.*, 2018; HSE, 2018; Wells, 2003; Casal *et al.*, 2002).

- Las explosiones pueden producirse en forma de una deflagración o de una detonación, en función de la velocidad de combustión durante la explosión. Se produce una deflagración cuando la velocidad de combustión o la velocidad de la llama es relativamente lenta. En una detonación, en cambio, la velocidad de la llama es extremadamente elevada. El hecho de que se produzca una deflagración o una detonación dependerá del material de que se trate, así como de las condiciones en que ocurre la explosión. Por lo común, se acepta que una explosión en fase de vapor requiere cierto grado de limitación para que se produzca una detonación (Casal *et al.*, 2002).

❖ **Explosiones de gases y de polvos:**

Es posible hacer una distinción entre las explosiones de gases y las de polvos tomando como base el material de que se trate. Se producen explosiones de gases, que en general son catastróficas, cuando se liberan y dispersan con el aire considerables cantidades de material inflamable para formar una nube de vapor explosivo antes de que tenga lugar la ignición. Las explosiones de polvos se producen cuando materiales sólidos inflamables se mezclan intensamente con el aire. El material sólido dispersado adapta la forma de material pulverizado con partículas de dimensiones muy pequeñas. La explosión resulta de un hecho inicial, como un incendio o una pequeña explosión, que motiva que el polvo depositado sobre las superficies pase a ser transmitida para el aire. Al mezclarse con el aire se produce una explosión secundaria que a su vez puede originar una explosión terciaria, y así sucesivamente. En el pasado, estas series sucesivas de explosiones han provocado catástrofes y la destrucción de fábricas enteras. Puesto que los cereales, la leche en polvo y la harina son inflamables, las explosiones de polvo han sido más comunes en la industria agrícola. Sin embargo,

la historia de las explosiones de polvo, particularmente las de los últimos años, ha mostrado que los efectos nocivos se limitan en general al lugar de trabajo y afectan menos a quienes se encuentran fuera de la fábrica. (Casal *et al.*, 1999; Santos, 2010).

❖ **Explosiones de nubes de vapor confinado o no confinado:**

Motwali, (2010), plantea que la explosión de vapor confinado es el resultado de la ignición de una nube inflamable de vapor o de gas, en que las velocidades de la llama son bastante altas para producir una sobrepresión significativa. Si el vapor involucrado es inflamable, es probable que la nube resultante de gas inflamable liberado a la atmósfera prenda inmediatamente después que haya ocurrido el BLEVE, formando una bola de fuego.

Según Casal *et al.*, (2002) y Fabbri *et al.*, (2017) las nubes de vapor no confinadas se generan a raíz del escape de una cantidad determinada de un vapor combustible, o bien de un líquido a partir del cual se formará el vapor. Esto puede ocurrir, tanto en la planta, como en el transporte o rotura de un gaseoducto.

Estas representan uno de los mayores peligros dentro de la industria química, pues ocurren con mucha mayor frecuencia que los escapes tóxicos, que pueden, potencialmente, producir más víctimas. Por otra parte, el problema principal de este tipo de explosiones proviene del hecho que, además del alcance que puede llegar a tener la nube, la ignición de esta puede producirse en un punto alejado de la fuente origen del vertido y afectar a grandes áreas. (Casal *et al.*, 1999).

1.3 Herramientas para cuantificar los daños que ocasionan al medio ambiente los diferentes escenarios de riesgo.

Los accidentes de incendios, explosiones y nubes tóxicas ocasionan grandes daños al medio ambiente debido a la cantidad de contaminantes que liberan estos tipos de accidentes.

Un índice de valoración de riesgo consiste en caracterizar el nivel de riesgo, desarrollar una valoración, cuantificar y evaluar el riesgo medioambiental. (Darbra *et al*, 2010).

El índice Indiana *Relative Chemical Hazard Score* (IRCHS) cuantifica la sostenibilidad por un índice ambiental, índice de seguridad y el incremento de la ganancia para el proceso por el valor añadido. De acuerdo al IRCHS, el método de la Universidad de Tennessee (UTN) evalúa cada químico de forma separada y asigna un valor de peligro basado sobre los peligros químicos con respecto al ambiente, con énfasis sobre el sistema acuífero. (Aboud, 2008).

El índice de peligro atmosférico (AHI) propuesto por Gunasekera y Edwards, (2003) se usa para evaluar el impacto potencial de partículas transportadas por el aire relacionadas a productos químicos. Se asume una falla catastrófica de la planta y se estima el impacto sobre el ambiente atmosférico. El método se diseña para evaluar posibles alternativas de roturas en un proceso donde se escape un compuesto químico. El peligro primario en la industria química reside en el material, ya que este está presente, hasta solo en el almacenamiento y, desde luego, en el procesamiento u otra actividad.

La NFPA, (1994) desarrolló un sistema que indica la inflamabilidad, reactividad y peligros para la salud de químicos peligrosos. El sistema se basa en dar un número de 0 a 4 a un químico, indicando su efecto. Índices detallados se consideran usualmente en muchos efectos ambientales o estudios, en detalles, de ciertos efectos sobre la vida en la planta. (Aboud, 2008).

El índice de evaluación del riesgo ambiental propuesto por Chen *et al.*, (2013) consiste en tres etapas: caracterizar el nivel de riesgo, desarrollar un algoritmo de evaluación para cuantificar el riesgo ambiental, y evaluar el riesgo ambiental con los datos recogidos.

Este índice propuesto por Chen *et al*, (2013) tiene como principal desventaja la falta de disponibilidad en la literatura especializada de alguno de los factores en

los que se sustenta. Además, es más utilizado en la petroquímica que en el manejo de hidrocarburos.

El Índice de Severidad de Biodiversidad (BSI) para escenarios de contaminación accidental es la respuesta a la siguiente interrogante: “Si el escenario S ocurriera en las condiciones corrientes con respecto a la funcionalidad de la planta industrial estudiada y sus alrededores, cuán importante sería para la sociedad, sus esperadas consecuencias sobre el ambiente circundante”. (Denat, 2017).

El accidente en la ciudad de Seveso en Italia, durante el cual una nube tóxica significativa se escapó en 1976, los estados europeos adoptaron una política común sobre la prevención de riesgos industriales mayores. Desde el 24 de junio de 1982, la directiva Seveso requiere a los estados y compañías para identificar los riesgos asociados con actividades industriales peligrosas listadas y toman los pasos necesarios para ejecutarlo. Actualmente, en Francia, basado en la cantidad de productos peligrosos presentes en los establecimientos, públicos y privados, facilitan que puedan ser clasificados en diferentes categorías de Facilidades Clasificadas para la protección del ambiente (ICPE).

Una vez que se conocen los efectos de un accidente, se hace necesario determinar sus consecuencias, a través de una estimación de lo que sucederá cuando estos efectos actúen sobre las personas y el medio. Esta estimación puede realizarse mediante una serie de datos tabulados y gráficos, o mediante los denominados modelos de vulnerabilidad. El resultado de estos modelos es una aproximación, cuya validez depende del buen criterio y experiencia del analista.

Conesa, (2000) define la Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) como un proceso de análisis encaminado a identificar, predecir, interpretar, valorar, prevenir o corregir y comunicar, el efecto de un Proyecto sobre el Medio Ambiente.

El objetivo del modelo es llegar a establecer, en primer lugar, y a través de los factores ambientales considerados, los indicadores capaces de medirlos, la unidad de medida y la magnitud de los mismos, transformando estos valores en

magnitudes representativas, no de su alteración, sino de su impacto neto sobre el Medio Ambiente. (Conesa, 2000).

Blengini *et al*, (2017) proponen un Índice de Sustitución en función de cambiar sustancias dañinas al medio ambiente por otras menos dañinas, en función de su costo. Este se basa en la toxicología de las sustancias a sustituir.

Los efectos sobre el medio vienen medidos en unidades heterogéneas, y, por tanto, sin posibilidad de comparación entre las de los distintos factores, ni de adición o sustracción de manera directa (magnitudes inconmensurables). Al estar medidas las magnitudes en unidades heterogéneas, no se pueden cuantificar resultados globales, tales como el impacto total sobre un componente ambiental, sobre un subsistema, o el impacto total que, sobre el medio ambiente, ejerce la actividad en su conjunto. (Conesa, 2000).

Por esta razón, surge la necesidad de homogenizar las diferentes unidades de medida y, en último caso, expresarlas todas ellas en unidades abstractas de valor ambiental. Por lo que el valor en magnitud del indicador del impacto sobre un factor determinado, en unidades inconmensurables, se transforma en el índice de calidad que dicha magnitud representa, en cuanto a estado ambiental del indicador. (Conesa, 2000).

El proceso consiste en referir todas las magnitudes de los efectos a una unidad de medida común a la que denominamos unidad de impacto ambiental. Esta transformación es compleja y requiere un desarrollo, en la investigación de efectos, muy importante, y acabaría en la definición de una función distinta para cada indicador de impactos que permitiera obtener el índice de calidad ambiental de un factor en función de la magnitud del impacto recibido. (Conesa, 2000).

Uno de los gases más tóxicos que afectan a la atmósfera es el monóxido de carbono, el cual, durante un incendio, aumenta considerablemente su concentración en la atmósfera. Existe una función de transformación para la concentración del mismo en calidad ambiental. (Conesa, 2000).

El humo reduce considerablemente la visibilidad, en función de la densidad óptica del combustible. (Hadjisophocleous y Benichou, 2016).

Aboud, (2008) propone un índice simple K, partiendo de la definición básica de riesgo, el cual se considera el producto de la probabilidad del incidente con la magnitud de sus efectos peligrosos. Este índice se puede aplicar a plantas químicas, empleando las propiedades de los químicos asociados a la producción. Es un índice que cuantifica riesgo a la vida humana.

Este índice se puede usar, además, en los siguientes casos:

1. El índice puede ser aplicado a una planta química incluyendo químicos mayores o menores. El índice en este caso se calcula como la sumatoria de los índices de los químicos individualmente.
2. Se usa el inventario de un mes de producción para calcular un máximo teórico para el riesgo. Consecuentemente, se emplea un valor alto para el inventario.
3. El número usado para el tamaño es un número representativo, una media. Puede ser empleado el actual número de procesos mayores.
4. El índice puede aplicarse para químicos en una planta, la cual no sea de almacenamiento. En este caso, un estimado para su inventario en el proceso se usa.
5. El índice se puede usar para estimar el riesgo desde un proceso simple en una planta, en este caso el tamaño debe ser tomado como 1 y el inventario como el inventario de químicos dentro del proceso.

El índice incluye la experiencia de previos accidentes en base de datos, las cuales se consideran fuente de valores de la información.

Según Casal *et al*, (2002), Wells, (2003) y Sanmiquel *et al*, (2018) para realizar una estimación de las consecuencias se requiere una función que relacione la

magnitud del impacto, con el grado de daño causado por el mismo; se debe establecer una relación entre la dosis y la respuesta.

Para realizar una estimación de las consecuencias se requiere una función que relacione la magnitud del impacto, con el grado de daño causado por el mismo; se debe establecer una relación entre la dosis y la respuesta. El método más utilizado es el del análisis *Probit*, método estadístico que relaciona la intensidad de la radiación térmica y la sobrepresión con el grado de lesión o daño que pueda resultar a partir de estos. El valor *Probit* permite determinar el porcentaje de la población expuesta que se verá afectada a un determinado nivel de lesiones o por muerte a causa de una carga de exposición determinada, dichos valores se encuentran tabulados como parte indispensable de aplicación del método. (Wells, 2003; Domínguez, 2014).

La autora considera que el método *Probit* es el método idóneo para medir impacto ambiental ya que estima el porcentaje de la población que se encuentra afectada, con un mínimo de error en sus valores.

1.4 Conclusiones parciales.

- ✓ El bisulfuro de carbono presenta características que deben ser estudiadas para poder estimar los riesgos que le otorgan a la zona industrial de Matanzas.
- ✓ Los escenarios de riesgo que más probables en las instalaciones industriales que almacenan combustibles son los incendios, explosiones y nubes tóxicas.
- ✓ El método *Probit* resulta apropiado para determinar los posibles daños de los diferentes escenarios de riesgo que pudiera tener la empresa.

CAPÍTULO 2: Materiales y Métodos.

Roldan K. y Dueñas J., (2019), afirman que para definir los escenarios que se pueden manifestar ante la ocurrencia de un derrame de sustancias químicas, hay que tener en cuenta en primer lugar las propiedades de las mismas, así como las propias características de la instalación.

2.1 Caracterización de la empresa Rayonitro de Matanzas.

La Empresa Rayonitro, pertenece a la Unión Química del Ministerio de la Industria Básica y es la Unión de Empresas Rayonera (inaugurada en el mes de agosto de 1948 con el nombre Co. Rayonera Cubana S.A.) y la Empresa Cubanitro (1959). Se encuentra ubicada en el litoral Norte occidental de la provincia de Matanzas, al Noroeste de la Ciudad. Limita al sur con la carretera del litoral, y por el Este con la Terminal Marítima, por el Oeste y Noroeste con la carretera Vía Blanca. La misma posee una serie de tanques y balsas de Ácido sulfúrico, Amoníaco y Disulfuro de Carbono estando los mismos soportados en bases de gran consistencia.

Esta empresa tiene almacenado desde hace varias décadas 150 toneladas de Bisulfuro de carbono en un tanque horizontal cuya construcción data del año 1948, habiendo sido una empresa química de alta nocividad y agresividad, resulta un peligro latente la presencia de este compuesto almacenado en un tanque que presenta ya un mal estado de conservación.

2.2 Procedimiento de identificación de la sustancia involucrada en el proceso.

El peligro potencial de una instalación industrial depende en gran medida de las características de las sustancias involucradas en el proceso. Los datos de interés para los análisis posteriores son básicamente las propiedades de las sustancias y sus condiciones en el proceso.

Según **Orozco (2007)**, la caracterización de las sustancias involucradas en un proceso se desarrolla mediante la siguiente guía:

Identificación del producto.

- Nombre del producto.
- Fórmula Química.
- Etiquetado de peligro (frases R y S) así como las que la identifican por otros efectos.

Datos Físicos.

- Apariencia.
- Punto de ebullición.
- Punto de fusión.
- Solubilidad.
- Densidad.
- TLV - Límite superior de inflamabilidad.
- IPVS. Límite inferior de explosividad.
- Punto de congelación.
- Temperatura de auto ignición.
- Coeficiente de expansión.
- Temperatura de inflamación.
- Biodegradabilidad.
- Corrosión.
- Capacidad calorífica.

Formas de control y mitigación en casos de desastres.

Productos o técnicas empleados en el control y mitigación en caso de desastre. Existencia del producto de control y mitigación en la entidad

Peligros para la salud.

- Concentración permisible.
- Exposición permisible.
- Emergencias.
- Partes del cuerpo que afecta.
- Forma de entrada al organismo.

- Toxicidad (se debe llenar una tabla con la siguiente información).

Tabla 2.1: Modelo para la clasificación toxicológica de la sustancia analizada.

Sustancia	Toxicidad							
	TA	I	SB	TDR	MG	CG	C	TR
Disulfuro Carbono.	X	ROP	X				X	X

Condiciones de almacenamiento y manipulación.

- Nombre del producto almacenado.
- Forma del recipiente (cilíndrico, rectangular, vertical, horizontal, etc.).
- Dimensiones del recipiente (largo, ancho, diámetro).
- Material de construcción.
- Protección del recipiente (interior o exterior).
- Existencia de accesorios en el recipiente y su localización.
- Fecha de fabricación del recipiente.
- Condiciones de almacenamiento de las sustancias.
- Cantidad de sustancia almacenada.
- Registro histórico de averías producidas en el recipiente. Casos de derrames, salideros, etc. (definir fecha y cantidad de producto vertido).
- Tipo de averías producidas.
- Condiciones de almacenamiento (presión, temperatura, etc.).
- Características de los alrededores del recipiente.

Condiciones para su uso en el proceso.

- Uso en el proceso.
- Condiciones en las que se usa la sustancia (presión, temperatura).
- Fallos ocurridos en estos equipos al operar con estas sustancias.

- Material de construcción de los equipos donde es usada.
- Protección del sistema de tuberías.

2.2.1 Consideraciones relacionadas con el escenario de incendio y el estado de agregación de la sustancia.

Los incendios se clasifican en cuatro tipos en función del estado físico de los productos que los originan y del momento en que se aporta la energía de activación. Se aprecia en la siguiente tabla 1.1 un resumen de las características citadas.

Tabla 2.2: Clasificación de tipos de incendios.

Tipos de incendios		
Denominación	Estado físico de producto	Ignición
Incendio de charco o depósito	Líquido	Inmediata o diferida
Bola de fuego	Gas o líquido	Inmediata
Dardo de fuego	Gas o líquido	Inmediata o diferida
Incendio flash	Gas	Diferida

Los resultados anteriores, deben ser considerados para definir los escenarios más probables que se deben originar ante un escape de Disulfuro de carbono.

2.3 Metodología general de investigación.

2.3.1 Estimación de las pérdidas de recursos físicos y económicos por concepto de incendio y explosión.

Las cuantificaciones de las pérdidas físicas se hacen atendiendo al criterio de Wells, (2003), y las pérdidas económicas, se estiman usando el software CAPCOST.

En la figura 2.1 se muestra la metodología general a seguir basada en la secuencia lógica de análisis.

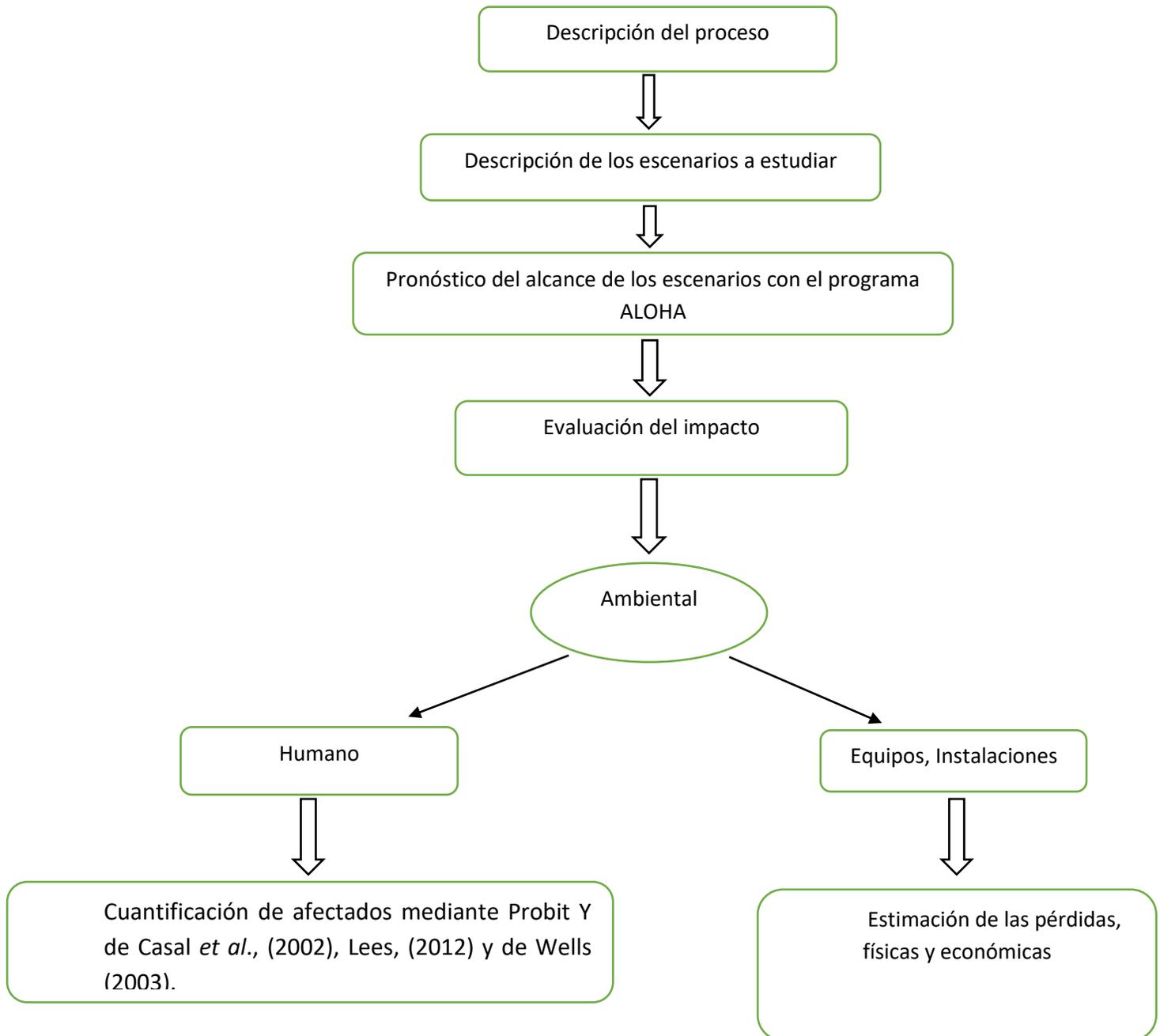


Figura 2.1: Metodología general basada en la secuencia lógica de análisis.

2.4 Características y particularidades del software ALOHA.

El software ALOHA de la EPA de EEUU permite cuantificar los riesgos a través de la modelación de los mismos y determinar para aquellos riesgos posibles de cuantificar las áreas de atmósferas peligrosas. Se utiliza la versión 5.4.7 del 2016 que aporta resultados confiables

- Se modelan tres categorías peligrosas: dispersión de una nube tóxica, incendios y explosiones
- Se basan en los modelos de Dispersión del Aire para estimar el movimiento y dispersión de la nube de gas químico.
- Se estima:
 - Dispersión de gas tóxica.
 - Valores de sobrepresión desde la explosión de una nube de vapor.
 - Área inflamable de la nube de vapor.
- Modela las áreas para emisiones de corta duración de compuestos peligrosos claves: Tóxicos, inflamables, radiación térmica y sobrepresión que pueden exceder los niveles de interés especificados por el usuario (*Levels of Concern LOCs*). Los resultados son representados en diagramas “Y” contra “X” donde nos indica la amplitud del área de localización en el eje “Y” y su alcance en el eje “X”. (*Threat zone plot*).
- Constituye una herramienta que se usa para:
 - Respuesta de emergencia
 - Planificación
 - Propósitos académicos
- No puede ser usado para:
 - Emisiones de sustancias radioactivas.
 - Licencias ambientales de chimeneas de gas.
 - Emisiones fugitivas.

La dispersión de los químicos en el aire es un término usado por los especialistas que incluye la advección y la difusión. Una nube de gas dispersándose se moverá por advección en la dirección del viento y por difusión en flujo cruzado en la dirección vertical del viento. Utiliza dos modelos:

- Modelo Gaussiano para los gases que tienen la misma densidad que el aire.
- Modelo de Gases Pesados utilizado para los gases que son más pesados que el aire donde son emitidos.

Algunos de los términos usados son:

- Gas pesado: Gases con peso molecular superior al peso molecular del aire. También gases que son más ligeros que el aire almacenado a bajas temperaturas (estado criogénico).
- *Flash boiling*: Vaporización brusca de un líquido causada por baja presión.
- *Two-Phase flow*: Cuando las fases líquida y gaseosa de un compuesto químico escapan juntos desde la ruptura de un tanque.

ALOHA define las propiedades que condicionan un fuego de acuerdo a lo planteado por Botta, (2012) y Martínez, (2016) como:

- Volatilidad: Medida de cómo un compuesto químico fácilmente se evapora.
- Punto o temperatura de inflamación (*Flash Point*): Es la más baja temperatura donde un líquido inflamable evapora lo suficiente para alcanzar un fuego sin la fuente de ignición presente.
- Límites de Inflamabilidad: Llamado Límite de Explosividad Inferior (*LEL*) y Límite de Explosividad Superior (*UEL*).

Si el compuesto químico en fase vapor se pone en contacto con la fuente de ignición, solo se producirá el fuego si la relación aire-combustible está entre *LEL* y *UEL*. Compuestos con alta volatilidad y baja temperatura de inflamación tienen bajos valores de *LEL*. ALOHA no modela subproductos del fuego: Hollín, humo, ceniza y compuestos químicos de la reacción.

Los niveles de radiación térmica se indican a través del *LOC*. El *LOC* es un nivel que marca el inicio de la radiación térmica, usualmente el nivel sobre el cual este peligro puede ocurrir.

- Se utilizan tres valores de *LOC*, medidos en kW/m².
 - Rojo: 10 kW/m². Potencialmente letal en el intervalo de 60 sec.
 - Naranja: 5 kW/m². Quemaduras de segundo grado en el intervalo de 60 sec.
 - Amarillo: 2 kW/m². Dolor en 60 sec.

Los niveles de sobrepresión están dados por el nivel de presión de la onda de explosión sobre el cual el peligro puede existir, estos son:

- Rojo: 8 psi (destrucción de edificios).
- Naranja: 3,5 psi (serios daños).
- Amarillo: 1 psi (destrucción de cristales).

ALOHA no modela los fragmentos peligrosos de una explosión.

Modela cinco tipos de escenarios de fuego y explosiones asociados con emisiones de compuestos químicos.

- Dardos de fuego.
- Piscinas de fuego.
- *BLEVE*.
- Áreas inflamables.
- Explosión de una nube de vapor.

La explicación de estos escenarios puede verse en el manual de usuario *ALOHA*, (2016).

Otras particularidades del *software* son:

Debe trabajarse con cuidado para predecir diferentes situaciones, las cuales son consideradas sus limitantes:

- Velocidades del viento muy bajas.

- Condiciones atmosféricas muy estables.
- Irregularidades de la concentración del compuesto químico particularmente cerca de la fuente.

Además, el modelo no incorpora efectos de:

- Reacciones químicas.
- Partículas.
- Mezcla de compuestos químicos.
- Terreno.
- Fragmentos peligrosos.

El programa cuenta con una base de datos de compuestos químicos de interés, sobre la base de datos *DIPPR* (*Department of Chemical Engineering of Brigham Young University for the Design Institute for Physical Property Data (DIPPR) of the American Institute of Chemical Engineers*) donde aparecen las principales propiedades físicas y químicas y tiene en cuenta a diferencia de versiones anteriores algunas soluciones, tales como ácidos anhídridos en agua y ácidos fluorhídricos en agua.

La organización básica del programa consta de varios pasos que son:

1. Indicar la ciudad donde puede ocurrir el accidente químico.
2. Seleccionar el compuesto químico.
3. Dar la información de las condiciones meteorológicas en el período que queremos realizar la predicción del evento.
4. Describir cómo los compuestos químicos escapan a la atmósfera.
5. El *software ALOHA* da su respuesta mostrando en el monitor un diagrama denominado *Threat Zone*, el cual muestra el área donde las concentraciones del compuesto químico en el aire pueden ser lo suficientemente altas para que provoque afectaciones a la población, en los tres niveles de *LOC*.

En el caso que se suministre que ocurre la inversión hay que dar la altura a la cual ocurre este proceso.

Para entregar los datos de humedad del aire se podrá indicar el valor particular o dar los casos extremos, húmedo, medio o seco.

Los resultados que se obtienen del software, además de los gráficos pueden ser encontrados en un texto sumario.

- Datos del sitio.
- Datos del químico.
- Datos atmosféricos.
- Fuente Directa.
- Zona Tratada.

Para la mejor comprensión de los resultados cualitativos de este *software* se hace referencia por NOAA, (2016) a los diferentes *LOC* que se utilizan:

AEGL: Las siglas representan los niveles de *LOC* para una exposición aguda, de ahí la sigla *Acute Exposure Guideline Levels*, son los lineamientos de los niveles de una exposición aguda.

ERPG: Las siglas, se utilizan para la planificación de los planes de emergencia, de ahí *Emergency Response Planning Guidelines*.

ERPG-1: La concentración máxima dispersada bajo la cual es posible creer que los individuos que estén expuestos durante 1 hora pueden sufrir efectos moderados sobre su salud y percibir claramente un olor desagradable.

ERPG- 2: La concentración máxima dispersada bajo la cual es posible creer que los individuos que estén expuestos durante 1 hora pueden experimentar o desarrollar daños irreversibles u otros daños serios para la salud o síntomas que le impiden la habilidad individual para realizar una acción de protección.

ERPG- 3: Es la concentración máxima dispersada bajo la cual es posible creer que los individuos que estén expuestos durante 1 hora sufrirán efectos sobre la salud y puede correr peligro su vida.

TEEL: Las siglas se utilizan cuando no se conocen exactamente los valores de *ERPG* para un compuesto químico, ya que representa los niveles temporales, *Temporal Emergenccy Exposure Levels*.

TEEL-1: Es la concentración en el aire bajo la cual se considera que los individuos expuestos pueden sufrir efectos moderados sobre su salud y percibir claramente un olor desagradable.

TEEL-2: Es la concentración en el aire bajo la cual se considera que los individuos expuestos pueden sufrir efectos irreversibles sobre su salud o síntomas que les impida tomar decisiones para protegerse.

TEEL-3: Es la concentración en el aire bajo la cual se considera que los individuos expuestos a ella se encuentran en condiciones de riesgo para su vida.

IDLH: Las siglas están relacionadas con los niveles permisibles de exposición del hombre a compuestos químicos en zonas de trabajo sin afectar la salud y la vida, de ahí las siglas *Inmediatly Dangerous to Life or Health*. No está designado para ser tomado como un límite de exposición a toda la población ya que no está definido en correspondencia con la sensibilidad de algunas personas como los niños. No deben usarse los valores del *IDLH* para identificar definitivamente condiciones peligrosas en términos generales.

El programa cuenta con una base de datos de compuestos químicos de interés, sobre la base de datos DIPPR (*Department of Chemical Engineering of Brigham Young University for the Design Institute for Physical Property Data (DIPPR) of the American Institute of Chemical Engineers*), donde aparecen las principales propiedades físicas y químicas y tiene en cuenta, a diferencia de versiones anteriores, algunas soluciones, tales como ácidos anhídridos en agua y ácidos fluorhídricos en agua. (NOAA, 2016)

En la siguiente tabla se resumen las diferentes fuentes y escenarios de trabajo del ALOHA.

Tabla 2.5. Escenarios de trabajo del software ALOHA.

Fuente	Escenarios tóxicos	Escenarios incendio	de	Escenarios explosivos
Directa				
Escape directo	Nube tóxica	Llamarada de fuego		Nube explosiva
Charco				
Evaporación	Nube tóxica	Llamarada de fuego		Nube explosiva
Inflamable		Piscina de fuego		
Tanque				
No inflamable	Nube tóxica	Llamarada de fuego		Nube explosiva
Inflamable		Dardo de fuego o Piscina de fuego		
BLEVE		BLEVE (Bola de fuego y piscina de fuego)		
Tubería de gas				
No inflamable	Nube tóxica	Llamarada de fuego		Nube explosiva
Inflamable		Dardo de fuego		

Díaz, A, (2013) demuestra en sus investigaciones que existen escenarios, cuyas características no dependen de las variables climatológicas o sus variaciones son despreciables por lo que es posible evaluar los mismos atendiendo únicamente al dispositivo de almacenamiento y sus condiciones de operación, como son el jet Fire y el BLEVE.

Para el caso de la nube de vapor explosiva y/o tóxica se evalúan atendiendo a las direcciones del viento de más frecuentes en la zona objeto de estudio, con sus respectivas velocidades, el resto de las variables climatológicas se toman según indica Moya, (2010), López, (2010) y Nguyen, (2011).

A continuación, se refleja el resultado de l

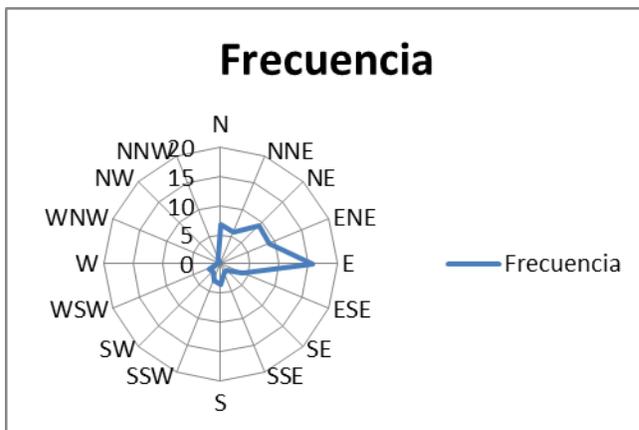


Figura 2.2: Frecuencia de la dirección del viento en la zona de estudio (10 años).

Siendo estas las direcciones más frecuentes y atendiendo a las direcciones más peligrosas para la planta se decide evaluar ALOHA en las direcciones E, W, SW y Calma.

2.5 Método “*Probit*”.

En este método se parte de una manifestación física de un incidente y brinda como resultado, una previsión de los daños a las personas expuestas al incidente, es decir: número de heridos por diferentes lesiones y número de víctimas fatales.

Medina, (2003) y Domínguez, (2014) apuntan que es un método estadístico que nos da una relación entre la función de probabilidad y una determinada carga de exposición a un riesgo, es un método muy destacado entre los modelos de vulnerabilidad, los cuales son basados en experiencias realizadas con animales de laboratorio o estudios de muertes y lesiones de accidentes ocurridos.

La fórmula empleada para este modelo se basa en una función matemática lineal de carácter empírico extraída de estudios experimentales:

$$Pr = a + b \cdot \ln V \quad 2.2$$

Donde:

Pr = *Probit* o función de probabilidad de daño sobre la población expuesta.

a = Constante dependiente del tipo de lesión y tipo de carga de exposición.

b = Constante dependiente del tipo de carga de exposición.

V = Variable que representa la carga de exposición.

Una vez determinado el valor Probit, se busca el porcentaje de personas implicadas en la tabla del anexo 9.

Este método se puede emplear para determinar el porcentaje de personas afectadas por intoxicación, por radiación térmica y por sobrepresión.

2.5.1 Vulnerabilidad a radiaciones térmicas.

Se emplea para determinar el porcentaje de personas afectadas por los efectos de las radiaciones térmicas en función de la intensidad de irradiación recibida y del tiempo de exposición o dosis de radiación calorífica recibida. Para el caso de estudio, se establecen 60 segundos como tiempo de exposición, para actuar en concordancia con ALOHA.

En el caso de fugas de líquidos y gases inflamables y con una ignición inmediata, se podrá generar un charco de fuego, una explosión BLEVE o un dardo de fuego.

Las lesiones ocasionadas serán causadas principalmente por radiaciones térmicas.

Si el gas no se enciende inmediatamente, se dispersará en la atmósfera. Si la nube de gas formada se encuentra con un foco de ignición en sus proximidades, se supone que cualquier persona presente dentro de la nube de gas ardiendo morirá a consecuencia de quemaduras y asfixia. En la zona externa a la nube de gas, aunque la duración de la radiación térmica generalmente será breve, los daños estarán en función de la distancia y deben ser evaluados en cada caso.

La institución holandesa TNO (Organización holandesa para la investigación científica) presenta las ecuaciones *Probit* siguientes:

Quemaduras mortales:

$$\text{-con ropa de protección: } Pr = -37,23 + 2,56 \cdot \ln(t \cdot I^{4/3}) \quad 2.3$$

$$\text{-sin protección: } Pr = -36,38 + 2,56 \cdot \ln(t \cdot I^{4/3}) \quad 2.4$$

$$\text{Quemaduras de segundo grado: } Pr = -43,14 + 3,0188 \cdot \ln(t \cdot I^{4/3}) \quad 2.5$$

$$\text{Quemaduras de primer grado: } Pr = -39,83 + 3,0186 \cdot \ln(t \cdot I^{4/3}) \quad 2.6$$

Donde:

t =Tiempo efectivo de exposición (s).

I = Intensidad de irradiación (W/m^2).

2.5.2 Vulnerabilidad a explosiones.

Los modelos de consecuencias de explosiones predicen el impacto de la sobrepresión originada por la explosión y la proyección de fragmentos volantes sobre las personas y objetos.

Al considerar las consecuencias de las explosiones sobre las personas, se debe hacer distinción entre consecuencias directas e indirectas. Entre las primeras están las lesiones de los pulmones y los tímpanos. Entre las segundas, se encuentran las lesiones ocasionadas por proyección de fragmentos y por impacto del cuerpo contra obstáculos.

Las ecuaciones *Probit* para estas consecuencias, según Domínguez, (2014), son las siguientes:

✓ Porcentaje de afectados por rotura de tímpano:

$$Pr = -15,6 + 1,93 \cdot \ln(P) \quad 2.7$$

Donde **P** es la sobrepresión máxima expresada en N/m².

✓ Porcentaje de muertes por desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos:

$$Pr = -46,1 + 4,82 \cdot \ln(J) \quad 2.8$$

Donde **J** es el impulso originado por la sobrepresión durante el tiempo de actuación, en N s/m².

✓ Porcentaje de lesionados por desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos.

$$Pr = -39,1 + 4,45 \cdot \ln(J) \quad 2.9$$

Valores de referencia de consecuencias sobre edificios según la sobrepresión alcanzada:

- ✓ Daños importantes en edificios (casi completa destrucción): 0,35 bar.
- ✓ Daños reparables en edificios: 0,10 bar.
- ✓ Rotura de cristales en edificios: 0,05 bar.

Aunque existen modelos de vulnerabilidad para impacto de fragmentos metálicos de los recipientes proyectados en una explosión, no se han considerado suficientemente representativos y fiables para incluirlos. Cabe destacar que los

fragmentos de considerable tamaño pueden alcanzar distancias incluso superiores a 1 kilómetro. TNO, indica que los proyectiles con una energía cinética de 100 J, pueden ocasionar víctimas mortales.

CAPÍTULO 3: Análisis de los resultados.

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos del programa ALOHA, en cuanto a los posibles escenarios de incendio y explosión que se pueden originar por un escape de Bisulfuro de Carbono. Se muestran y comentan los resultados relacionados por el impacto provocado al medio ambiente y a los recursos humanos.

3.1 Análisis para la selección de los escenarios de esta investigación.

De acuerdo al vínculo entre el escenario de incendio y el estado de agregación de la sustancia realizado en el capítulo anterior se considera que los escenarios de incendios y explosión pueden presentarse todos, porque la sustancia es altamente tóxica, inflamable y explosiva, según su caracterización. No se ha encontrado en la literatura un registro histórico lo suficientemente amplio para evaluar la probabilidad de formación de cada escenario, ante un derrame de la misma. Se refleja a continuación los accidentes encontrados.

Tabla 3.1: Accidentes que involucran al Bisulfuro de Carbono

Fecha	País	Origen	Muertos	Lesionados	Evacuados
1967	Guijuelo, España	Explosión	13	>300	>500
1994	Mallorca, España	Explosión		>100	>300

En correspondencia con lo explicado anteriormente los escenarios que serán analizados son:

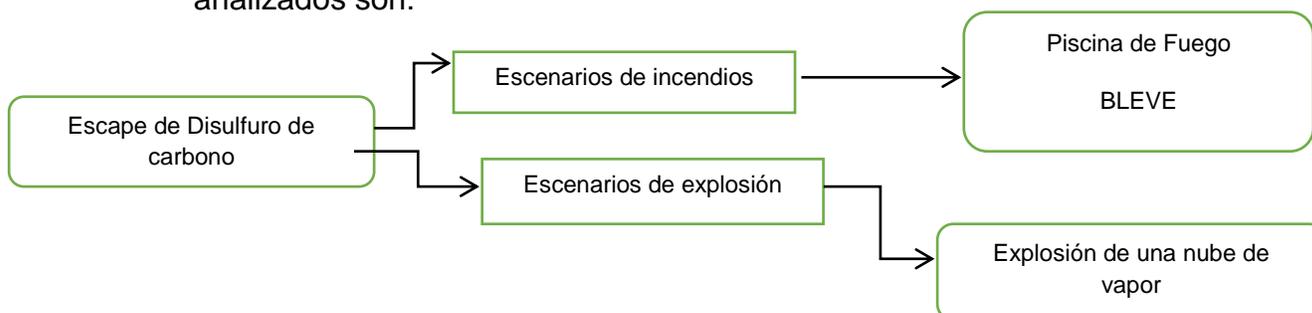


Figura 3.1: Posibles escenarios a partir de un escape de Disulfuro de carbono.

3.2 Establecimiento de las condiciones de trabajo con el *software*.

En esta investigación, para trabajar con el *software* ALOHA, se establecen condiciones, como son:

Trabajar con los valores medios de las variables que caracterizan a la zona analizada, según los estudios realizados por López (2010), Moya (2010) y Nguyen (2011).

1. Evaluar solo los escenarios que se seleccionan en el epígrafe anterior.
2. Se evalúan las direcciones del viento donde se encuentran las áreas con mayor concentración de trabajadores dentro de la UEB.
3. Mediante lo planteado por Díaz (2013) para velocidades del viento superiores a 3 m/s corresponde una estabilidad atmosférica de categoría D y cuando son inferiores a la misma categoría F.
4. Los escenarios BLEVE y *Pool Fire*, se evalúan atendiendo únicamente al dispositivo de almacenamiento y sus condiciones de operación, según Díaz (2013).
5. Se evalúa el escenario de VCE, atendiendo a la segunda condición y para los meses de: Enero, Abril, Julio y Octubre, definidos por Carmentate 2018). y las variables climatológicas de los meses definidas por Moya, 2016.

3.3 Análisis de los resultados del *software* ALOHA.

Los resultados obtenidos del programa ALOHA, brindan con nivel la información necesaria para completar, mediante otras herramientas, el daño material y humano que estos escenarios de incendio y explosión, provocan en dependencia del radio de su alcance. Los resultados del *software* ALOHA son los que se muestran.

Tabla 3.2: Comportamiento de la radiación generada por una piscina de fuego.

Temperatura (°C)		26.15	Calma	
Nubosidad		4		
Humedad (%)		78		
Dirección del viento	Velocidad Media del Viento (m/s)	Radiación (kW/m²)	Largo (m)	Ancho (m)
NNW	1	LOC-3 (10.0)	39.6	40.8
		LOC-2 (5.0)	60.8	60.8
		LOC-1 (2.0)	97.4	98.2

Fuente: Elaboración propia

En cuanto la tabla anterior se observa que, se la radiación mayor que 10 kW / m², potencialmente letal, correspondiente a la zona roja, tiene un alcance longitudinal de 39,6 m y abarca hasta 40,8 m de ancho.

En el área anular de la zona naranja de un ancho de 60.8 m, e igual diámetro donde la radiación es algo mayor que 5 kW / m², debe esperarse el daño por quemaduras de 2do grado.

En el área más exterior, de un ancho de 98.2 m aproximadamente, se alcanza una radiación mayor que 2 kW / m², que puede causar irritación de la piel y dolor.

En el anexo 5, se ofrece las distancias dentro de la planta de Disulfuro de carbono, como segundo aspecto de interés para definir el nivel de afectación en función de las dimensiones del escenario.

3.3.1 Determinación del alcance del escenario *Pool Fire* para el Disulfuro de carbono.

Un resumen de otros de los principales datos de este escenario, se muestran a continuación

Tabla 3.3: Resumen de las extensiones de las áreas de peligro de un *Pool fire* y el nivel de radiación.

Capacidad m ³	Volumen de derramado (m ³)	Diámetro del charco (m)	Duración del escenario (s)	Cantidad combustionada (Kg)	Calor transferido (TJ)
150	58.9	21	3600	57.634	1,060

Fuente: Elaboración propia

La cantidad de combustible que interviene en el fenómeno de combustión no supera las 100 t, por lo que no afecta grandemente al medio ambiente.

Tabla 3.4: Dimensiones del entorno.

Local	Distancia media de la fuente de emisión al área (m).	Nivel de afectación por radiación
Planta de Ácido Sulfúrico	110	Ninguno
Laboratorio y taller	23	letal
Oficinas y garita	65	Bajo
Oficinas Centrales Farma Cuba	226	Ninguno
Almacenes de Farma Cuba	290	Ninguno
Viviendas	333	Ninguno
Aula de capacitación	427	Ninguno
Oficinas Entrada principal	315	Ninguno

Los resultados mostrados anteriormente indican claramente que este escenario de riesgo solo, por sus dimensiones solo afecta en alto grado al personal del laboratorio y el taller, donde las radiaciones llegan a ser muy superiores a 10 kW/m², y afecta al personal de la garita y de las oficinas de forma leve al recibir solo radiaciones menores que 5 kW/m².

En la figura 3.2, se observa que el área con radiaciones mayores a 10 kW/ m² corresponde a la zona roja, la cual presenta un diámetro de cerca de 41 metros, con consecuencias letales. La zona naranja presenta radiaciones mayores a para un diámetro de 60.8 m provocando quemaduras de segundo grado en intervalo de 60 segundos a los trabajadores que se encuentren cerca del escenario. La zona amarilla afecta a los trabajadores de la oficina, presentado dolores en 60 segundos.



Figura 3.2: Comportamiento de la radiación originada por un *pool fire* para el Disulfuro de carbono.

3.3.1.1 Afectación de la radiación de un *Pool Fire* al personal de la planta de Disulfuro de carbono.

En la Empresa Rayonitro de Matanzas donde se analiza la afectación de la radiación emitida por un *pool fire*, según la metodología Probit las afectaciones con un riesgo de muerte de 94 % corresponden al taller y el laboratorio mientras que es menor que 1% en el caso de las oficinas y garita, correspondiendo con los resultados del software ALOHA, cual se considera que no es un peligro potencial para las personas.

3.3.2 Determinación del alcance del BLEVE.

El escenario BLEVE más bola de fuego se puede originar como accidente secundario a partir del escenario dardo de fuego. Los resultados obtenidos mediante el software ALOHA se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.5: Extensiones de las áreas de peligro de un BLEVE en estado de calma para el mes de enero.

Capacidad (m ³)	Velocidad del viento (m/s)	Radiación (kW/m ²)	Radio de la zona(m)	Diámetro de la bola de fuego (m)
150	1	LOC-3 (10.0)	270	1220
		LOC-2 (5.0)	390	
		LOC-1 (2.0)	620	

Fuente: Elaboración propia.

Se muestra que en la zona roja hasta distancias de 270 m se emiten radiaciones superiores a 10 kW/m^2 , estas radiaciones son letales en un intervalo de 60 segundos.

En el área de la zona naranja hasta distancias de 390 m se emiten radiaciones superiores a 5 kW/m^2 provocando daños y quemaduras de segundo grado en un intervalo de 60 segundos.

En el área más exterior, de un ancho de 620 m se emite radiaciones con intensidades superiores a 2 kW/m^2 , las cuales pueden causar irritación de la piel y dolor en menos de 60 segundos.

En la figura que se muestra a continuación se observa que a esta distancia se emiten radiaciones afectando completamente la empresa.

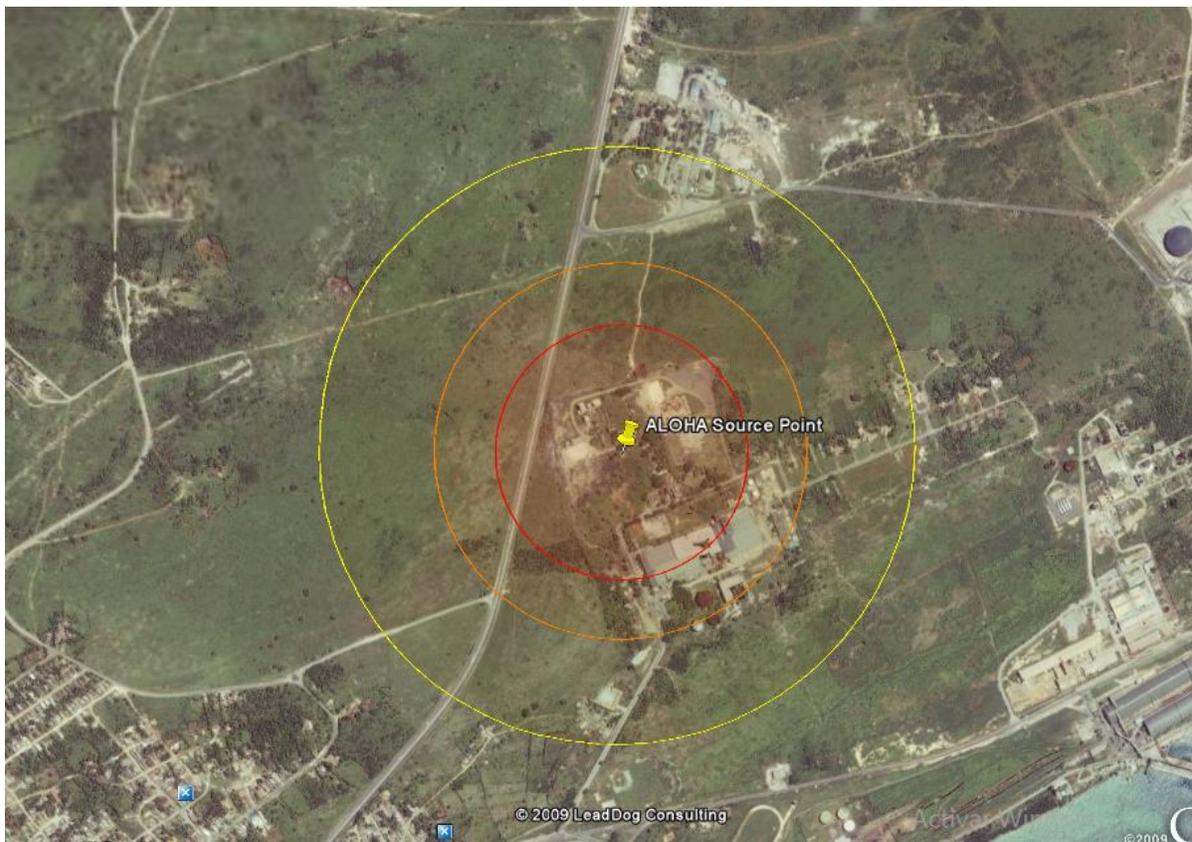


Figura 3.3: Comportamiento de la radiación originada por un BLEVE para el Disulfuro de carbono.

3.3.2.1 Afectación de la radiación de un BLEVE.

El escenario BLEVE más bola de fuego se considera como el escenario de menor duración, pero enormemente desbastador por la radiación de su bola de fuego, esto sin incluir la sobrepresión que genera y que el programa ALOHA no mide.

Tabla 3.6: Resultados de la afectación de la radiación de un BLEVE, en estado de calma para el Disulfuro de carbono.

Lugar	Radiación (kW/m ²), que alcanza al lugar	Afectaciones							
		Quemaduras mortales (con ropas de protección)		Quemaduras mortales (sin protección)		Quemaduras de segundo grado		Quemaduras de primer grado	
		Valor Pr	% afect.	Valor Pr	% afect..	Valor Pr	% afec.	Valor Pr	% afec.
Planta de Ácido Sulfúrico	15	6.07	86	6.92	97	7.92	99.8	11.23	99.7
Laboratorio y taller	25	7.81	99.8	8.66	100	9.98	100	13.28	100
Oficinas y garita	22.3	7.42	99.2	8.27	100	9.52	100	12.82	100
Oficinas Centrales Farma Cuba	12.5	5.45	67	6.30	90	7.19	99	10.49	100
Almacenes de Farma Cuba	8.37	4.08	18	4.93	47	5.57	72	8.88	100
Viviendas	6.56	3.25	4	4.10	18	4.59	34	7.90	99.8
Aula de capacitación	4.12	1.66	0	2.51	0	2.72	1	6.03	85

Oficinas Entrada principal	7.24	3.58	8	4.43	28	4.99	50	8.29	100
Promedio		4.91	46	5.76	78	6.56	94	9.86	100

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla anterior, la cual corresponde a las afectaciones de la radiación de un BLEVE bajo condiciones de calma nos indica, de acuerdo con los valores de Probit y en correspondencia con el anexo 9 que se produce un 46% de afectaciones a personas por quemaduras mortales (con ropas de protección) y un 78% (con ropas sin protección), se produce además un 94% de afectaciones por quemaduras de segundo grado y un 100% de afectación en todos los sentidos de quemaduras de primer grado. Con estos resultados se aprecia la peligrosidad de este tipo de accidente.

Nuevamente considerando que local de almacenaje es al aire libre y que puede haber personal de la misma y ajena a ella, en diferentes puntos de ubicación en el presunto momento del accidente, se muestra un resumen de la afectación a diferentes distancias de la fuente de emisión en la siguiente tabla.

Tabla 3.7: Porcentaje de muertes probables por efecto de la radiación térmica generada por un BLEVE.

Distancia (m)	Radiación (kW/m ²)	Probit Y	% de Muertes
120	28.5	6.54	94
140	22.7	5.53	70
160	19.8	4.92	47
180	17.2	4.29	24

Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse este escenario tiene un gran impacto ya que para 120 m de distancia muere una gran cifra de personas, lo cual resulta significativo ya que para dicha distancia se emite una radiación de 28.5 kW/m^2 , con un 94% de porcentaje de muertes debido a las altas radiaciones que emite el Disulfuro de carbono.

3.3.3 Determinación del alcance del escenario de una nube de vapor.

La nube de vapor que puede formarse por un escape de Disulfuro de Carbono puede trasladarse a la vez que se dispersa (aumentando su área y disminuyendo su concentración) en función de la dirección y la velocidad del viento. Ambos factores climatológicos influyen considerablemente sobre las características de este escenario. Otro escenario se origina si esta nube se encuentra con una fuente de ignición fija o eventual, conocido como nube de vapor explosiva por sus iniciales en inglés, VCE (*Vapour Explosion Could*). Díaz A, (2019)

Este escenario se caracteriza por originar una sobrepresión cuando la nube de gas explota, los resultados obtenidos para las diferentes direcciones del viento reportan en el anexo 7.

Tabla 3.8: Resumen de las extensiones de las áreas de peligro de una nube de vapor de Disulfuro de Carbono en el mes de enero.

Temperatura (°C)		26.15	Enero	
Nubosidad		4		
Humedad (%)		78		
Dirección del viento	Velocidad Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (Psi)	Largo (m)	Ancho (m)
N	3.47	LOC-3. (8.0)	-	-

		LOC-2 (3.5)	109.17	43.2
		LOC-1 (1.0)	166.7	153.4
NNW	3.72	LOC-3 (8.0)	-	-
		LOC-2 (3.5)	99.11	43.2
		LOC-1 (1.0)	156.3	148.2
S	2.94	LOC-3 (8.0)	-	-
		LOC-2 (3.5)	118	49.4
		LOC-1 (1.0)	191.3	176.6
SW	2.42	LOC-3 (8.0)	-	-
		LOC-2 (3.5)	138	57.2
		LOC-1 (1.0)	210.5	197.4

Fuente: Elaboración propia.

La zona de riesgo de mayor dimensión se reporta para la dirección del viento SW. Esto indica que esta variable ejerce gran influencia en las dimensiones de las zonas de peligro, y se debe a que en esta dirección del viento las velocidades que se reportan son bajas y cercanas a la calma. Como se observa no se alcanza sobrepresiones correspondientes al LOC-3, no legando a ser este escenario tan desbastador.

Se analizó además el comportamiento de la sobrepresión generada por la explosión de una nube de vapor para los meses de abril, julio y octubre siendo en el mes de julio la mayor extensión del área de peligro de la nube de vapor, como se puede observar en el anexo 7c. Las diferencias se deben a las condiciones climatológicas.



Figura 3.4: Comportamiento de la sobrepresión originada por una nube de vapor para el Disulfuro de carbono.

3.3.3.1 Afectación de la sobrepresión de una nube de vapor en la empresa Rayonitro de Matanzas.

La afectación por la sobrepresión originada, al explotar una nube de Disulfuro de Carbono, a cada local ubicado en el entorno más cercano de la fuente de emisión se ofrece a continuación.

Tabla 3.9: Resultados de la afectación por sobrepresión de una nube de vapor.

Lugar	Sobre presión (psi), que alcanza al lugar	Afectaciones. Calma			
		Rotura de tímpano	Muerte por impacto cuerpo	Lesiones por impactos sobre el cuerpo	Lesiones por impacto del cuerpo.

		Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.
Planta de Ácido Sulfúrico	6.36	5.02	51	5.41	66	8.46	100	15.54	100
Laboratorio y taller	6.36	5.02	51	5.41	66	8.46	100	15.54	100
Oficinas y garita	6.36	5.02	51	5.41	66	8.46	100	15.54	100
Oficinas Centrales Farma Cuba	0.356	-0.53	0	-8.47	0	-4.36	0	3.94	14
Almacenes de Farma Cuba	0.257	-1.16	0	-10.04	0	-5.81	0	2.63	0
Viviendas	0.228	-1.39	9	-10.62	0	-6.34	0	2.15	0
Aula de capacitación	0.167	-1.99	0	-12.12	0	-7.73	0	0.89	0
Oficinas Entrada principal	5.44	4.72	39	4.66	37	7.76	99.7	14.91	100

Fuente: Elaboración propia.

Se encuentran afectados por el mismo nivel de radiación 6.36 psi, la planta de ácido sulfúrico, el laboratorio y taller, las oficinas y garita. Estas personas están 100% afectadas por las lesiones por impactos sobre el cuerpo de elementos y por lesiones por impacto del cuerpo a la vez que todas puede ser proyectadas por la

onda expansiva debido a la alta sobrepresión, mientras que el 66% pueden morir por impacto del cuerpo y el 51% sufrirá rotura de tímpano.

Las personas que se encuentran en las oficinas y almacenes de Farma Cuba, en el aula de capacitación, así como las que habitan en las viviendas no son afectadas por lo que se encuentra fuera de peligro ya que no presentan afectaciones por rotura de tímpano, ni por muerte por impacto del cuerpo y tampoco están expuestos a lesiones por impacto de cuerpo.

En la oficina de entrada principal se afecta el 39% de las personas por rotura de tímpano, el 37% y el 99.7% de los trabajadores están expuestos a muerte y lesiones por impacto del cuerpo; el 100% de los trabajadores que se encuentran en dicha oficina están afectados por lesiones por impacto de cuerpo.

Tabla 3.10: Efectos de la sobrepresión de la nube de vapor sobre los equipamientos y las edificaciones de la planta.

Locales cercanos	Sobrepresión (psi)	Afectación
Planta de Ácido Sulfúrico	6.36	Destrucción completa de las estructuras cercanas
Laboratorio y taller	6.36	Destrucción completa de las estructuras cercanas
Oficinas y garita	6.36	Destrucción completa de las estructuras cercanas
Oficinas Centrales Farma Cuba	0.356	95% de probabilidad de que no ocurran serios daños.
Almacenes de Farma Cuba	0.257	Umbral para la pérdida temporal de la audición
Viviendas	0.228	Umbral para la pérdida

		temporal de la audición
Aula de capacitación	0.167	Presión típica de rotura de cristales
Oficinas Entrada principal	5.44	Destrucción completa de las estructuras cercanas

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se reflejan las afectaciones que presenta la sobrepresión sobre cada estructura según el criterio de Wells, (2003) que se encuentra en el anexo 3.

Los locales cercanos como la planta de ácido sulfúrico, el laboratorio y el taller, las oficinas y garita, debido a la sobrepresión de 6.36 psi se ven afectados con la destrucción completa de estas estructuras. Las personas que se encuentren en estos locales pueden resultar heridas con mayor o menor gravedad.

Las oficinas de Farma Cuba al poseer una sobrepresión de 0.356 psi tienen un 95% de probabilidad de que no sufran serios daños, por lo que las consecuencias para las personas en esos locales serán menores.

Los almacenes de Farma Cuba y las viviendas al llegar a ellas 0.257 psi y 0.228 psi de sobrepresión provoca la pérdida temporal de la audición, mientras que el aula de capacitación y la oficina de entrada principal se afectan con una sobrepresión de 0.167 psi y 5.44 psi respectivamente ocurriendo una rotura en los cristales y la destrucción completa de la estructura de la oficina de entrada principal.

3.4 Conclusiones Parciales.

1. De todos los escenarios provocados por un escape de Disulfuro de carbono, el BLEVE es el que presenta mayor radio de afectación.
2. Mediante las ecuaciones Probit se determinó que el mayor número de muertes se puede producir bajo los efectos de un BLEVE.

3. La explosión de una nube de vapor de Disulfuro de carbono, bajo condiciones de calma, provoca las mayores afectaciones a las edificaciones tanto de la planta como de las zonas urbanas cercanas a la misma.

Conclusiones.

1. Se definieron los escenarios de riesgo más probables y se determinaron las áreas de atmosferas peligrosas de dichos escenarios, así como la afectación sobre los recursos humanos y materiales.
2. Para cada escenario de riesgo se evaluaron las áreas de atmósferas asociadas, siendo el BLEVE el de mayor extensión.
3. De todos los escenarios analizados mediante Probit, la mayor cantidad de muertes es provocada por el BLEVE.

Recomendaciones.

1. Ofrecer y discutir los resultados de este trabajo con la dirección de la Empresa Rayonitro de Matanzas.
2. Capacitar a todo el personal vinculado a la planta estudiada sobre la base de los resultados obtenidos en la presente investigación.

Bibliografía.

- Aboud, Alyaa. (2008). Planning of petrochemical industry under environmental risk and safety considerations. Waterloo, Ontario, Canadá. 200 p. Tesis en opción al grado de Máster de Ciencias Aplicadas en Ingeniería Química. Universidad de Waterloo.
- Blengini, G.A., Blagoeva, D., Dewulf, J., Torres de Matos, C., Nita, V., VidalLegaz, B., Latunussa, C.E.L., Kayam, Y., Talens Peirò, L., Baranzelli, C., Manfredi, S., Mancini, L., Nuss, P., Marmier, A., Alves-Dias, P., Pavel, C., Tzimas, E., Mathieux, F., Pennington, D. and Ciupagea, C. (2017). Assessment of the Methodology for Establishing the EU List of Critical Raw Materials, Publications Office of the European Union, Luxemburg. 978-92-7969612-1, doi:10.2760/73303, JRC106997.
- Castro, D. y Castro, K. (2014). Evaluación de atmósferas peligrosas en la Central Termoeléctrica Antonio Guiteras de Matanzas. Universidad de Matanzas.
- CASAL, J. Análisis del riesgo en instalaciones industriales. Edicions UPC. 2001.
- Casal, Joaquín; Montiel, Helena; Planas, Eulalia; Vílchez, Juan. (2002). Análisis del riesgo en instalaciones industriales. 2da ed. Barcelona: Ediciones UPC. 362 p.
- Casal, J.; Montiel, H.; Planas E. y Vílchez J.A. (1999). Análisis del Riesgo en Instalaciones Industriales. Ediciones UPC, Barcelona.
- Chen, Qinqin; Jia, Qian; Yuna, Zengwei; Huang, Lei. (2013). Environmental risk source management system for the petrochemical industry. Process Safety and Environmental Protection [en línea]. PSEP-343. [citado 25 enero 2019]. DOI: 10.1016/j.psep.2013.01.004. Disponible en: www.elsevier.com/locate/psep.
- Conesa, V. (2000). Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. Madrid. 3ra ed. Edición Mundi-prensa. 401 p.

- Darbra, R.M.; Palacios, A.; Casal, J., 2010. "Domino effect in chemical accidents: Main features and accident sequences". *Journal of Hazardous Materials*, 183, pp. 565-573, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.07.061.
- Denat, Tom. (2017). Creation of a Biodiversity Severity Index to evaluate the risks of accidental pollutions in the industry: a multi-criteria sorting approach. París. 270 p. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias. Universidad de París.
- Domínguez, J.R. (2014). Análisis Cuantitativo de Riesgos en el ámbito de la Protección Civil: aplicación a una instalación de almacenamiento de productos químicos. Trabajo Fin de Grado. Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales. Universidad de Sevilla. Sevilla. España.
- Editores: Elvers B, Hawkins S y otros; Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry; Volumen 5; Quinta edición completamente revisada; Editorial VCH; New York, U.S.A.; 2000
- EPA (2016). Guía del Usuario del Modelo SCREEN 3 U.S. Agencia de Protección Ambiental (EPA). [en línea]. [Consulta: 6 Febrero 2019] Disponible en: www.epa.gov/ttn/catc/dir2/scrn3ds.pdf.
- Fabbri, L Binda, M Bruinen de Bruin, Y. (2017). *Accident Damage Analysis Module (ADAM) – Technical Guidance*, EUR 28732 EN, 2017, ISBN 978-92-79-71879-3, doi: 10.2760/719457.
- Fernández, P (2008). Módulo: Gestión medioambiental y técnicas afines. Modelos de cálculo de efectos y análisis de consecuencias.78 p.
- Ferrero, F (2006). Incendios de hidrocarburos: Estudio de la formación y evolución del *boilover* capa fina. Barcelona.61 p. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Gilman: *The Pharmacological Basis of Therapeutics*. 2018. E.U.A.
- Gunasekera, M y Edwards, D. (2003). Estimating the Environmental Impact of Catastrophic Chemical Release to the Atmosphere, An Index Method for Ranking Alternative Chemical Process Routs. *Trans IChemE*. Vol. 81. P 463474.

- Hadjisophocleous y Benichou. (2016). Fire safety design guidelines for federal buildings. [en línea]. NRC Publications Archive. [citado 20 junio 2017]. Disponible en <https://nparc.nrc-cnrc.gc.ca/eng/view/fulltext/?id=063cc389d483-4a62-aa43-b163cf01138d>.
- HERNÁNDEZ M.C. Determinación y evaluación de riesgos en la Planta de Procesamiento de Crudo de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos. Cuba. 2017.
- HSE. (2018). Annual Science Review. Helping Great Britain work we. Disponible en: <http://www.hse.gov.uk/horizons/>.
- Kehoe, Robert A; M. D.: Critería for the diagnosis of occupational illnes. Industrial Medicina and Surgery, October, 2006, P:427. 9.
- Major hazard control. A practical manual (ISBN 92-2-106432-8), Ginebra, 1988.
- Occupational Safety & Health Administration (OSHA). Chemical Sampling Information, Carbon Disulfide [en línea]. Fecha de publicación desconocida, revisado febrero de 2000 [citado julio 4 de 2003]. Disponible en http://www.osha.gov/dts/chemicalsampling/data/CH_225500.html.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). International Chemical Safety Cards, Carbon Disulfide [en línea]. Octubre de 2000 [citado en julio 4 de 2003]. Disponible en http://www.ilo.org/public/english/protection/safework/cis/products/icsc/dtasht/_icsc00/icsc0022.htm
- Piedra, G. y Valdivieso, T. (2013). *Evaluación del riesgo de incendio y explosión en una línea de extrusión de polietileno expandido* (Tesis de pregrado inédita). Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador.
- PLANAS-CUCHI, E., MONTIEL, H., CASAL, J. A survey of de origin, type and consequences of fire accidentes in process plants in the transportations of Hazardous materials. Universidad Politécnica de Cataluña. 1997.
- Robert A. Kehoe, M. D.: Critería for the diagnosis of occupational illnes. Industrial Medicina and Surgery, October, 1955, P:427.

- RODRÍGUEZ D., QUINTERO A., GONZÁLEZ Y., CUESTA O., SÁNCHEZ A. Variación de la estabilidad y altura de la capa de mezcla en la ciudad de Pinar del Río: su relación con condiciones sinópticas. *Revista Brasileira de Meteorología*. 2014.
- Sanmiquel, Lluís; Bascompta, Marc; Rossell; Antiocoi, Hernán; Guash, Eduard. (2018). Analysis of occupational accidents in underground and surface mining in Spain using data-mining techniques. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. [en línea]. Vol.15. No. 462. [citado 16 mayo 2018]. DOI: 10.3390/ijerph15030462. Disponible en: www.mdpi.com/journal/ijerph.
- Sharma, Vaibhav; Nandan, Abhishek; Anwar, Nihal. (2018). Study and analysis of storage tank hazards and its mitigation measures using bow tie diagram. *Research and Reviews: Journal of Engineering and Technology*. Vol. 7. Marzo. e-ISSN: 2319-9873.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). Chemicals in the Environment. Carbon Disulfide [en línea]. Agosto de 1994 [citado julio 4 de 2003]. Disponible en http://www.epa.gov/opptintr/chemfact/s_carbds.txt.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). Chemicals in the Environment. Carbon Disulfide [en línea]. Agosto de 2003 [citado julio 4 de 2009]. Disponible en http://www.epa.gov/opptintr/chemfact/s_carbds.txt.
- VIATELA I. Análisis comparativo de diferentes modelos para los coeficientes de dispersión atmosférica y su efecto en el cálculo de dosis. Caso de aplicación: reactor experimental RA-6. Universidad Nacional de Cuyo. San Carlos de Bariloche. Argentina. 2007.
- Wells, Geoff. (2003). *Major Hazards and their management*. Gulf Publishing Company. Houston, Texas. 315 p.

Anexos.

Anexo 1: Caracterización del CS₂.

Nombre del producto:

Disulfuro de Carbono.

Formula Química: CS₂.

Etiquetado de peligro (frases R y S) así como las que la identifican por otros efectos:

R2/R3/R5/R6/R7/R12/R17/R20/R21/R22/R23/R24/R26/R28/R36/R38/R41/R44/R48/R50/R52/R54/R55/R59

Datos físicos:

- ✓ Masa molecular: 76.14 g/mol.
- ✓ Apariencia: Líquido incoloro, insoluble en agua y más denso que está, inflamable, de olor desagradable.
- ✓ Punto de ebullición: 46.5 °C.
- ✓ Punto de fusión: - 11.5 °C.
- ✓ Solubilidad: Soluble en cloroformo, Alcohol, Éter y benceno.
- ✓ Densidad: 1.22632 g/cm³ a 20 °C.
- ✓ Umbral de olores: 0.1 - 0.2 ppm.
- ✓ Descripción: Comercialmente puro tiene un aromático olor dulce, a escala industrial tiene un olor aproximado a col podrida o a rábano.
- ✓ Presión a vapor: 297mm Hg a 20 °C.
- ✓ Factor de convección: 1ppm=3.11mg/m³ a 25 °C.
- ✓ TL V -límite superior de inflamabilidad: no se tiene información.
- ✓ IPVS - Límite inferior de explosividad: no se tiene información.
- ✓ Punto de congelación: no se tiene información.
- ✓ Temperatura de auto ignición: no se tiene información.

- ✓ Coeficiente de expansión: no se tiene información. Temperatura de inflamación: no se tiene información
- ✓ Biodegradabilidad: no se tiene información.
- ✓ Corrosión: Si
- ✓ Formas de control y mitigación en casos de desastres. Productos o técnicas empleados en el control y mitigación en caso de desastre: Agua.
- ✓ Existencia del producto de control y mitigación en la entidad (especificar cantidad y capacidad de mitigación): existen carros para el traslado y tiro de Agua en caso de desastre en áreas grandes.

Peligros para la salud.

- ✓ Concentración permisible: no se tiene información.
- ✓ Exposición permisible: no se tiene información
- ✓ Emergencias: Partes del cuerpo que afecta: ojos, Piel y Tubo respiratorio.
Forma de entrada al organismo: Por inhalación, a través de la piel o por ingestión.

Toxicidad

Sustancia	Toxicidad							
	TA	I	SB	TDR	MG	CG	C	TR
Disulfuro Carbono.	X	ROP	X				X	X

Nota: En el caso de la irritación debe aclararse si es a los ojos (O), piel (P) o respiratoria (R).

1. Datos de reactividad.

Reacción principal y reacciones secundarias: Mareos, Fatigas, Falta de conciencia.

- ✓ Cinética de reacción: no se tiene información.
- ✓ Contaminantes producidos: SO₂.
- ✓ Reacciones de descomposición: no se tiene información.

2. Condiciones de almacenamiento y manipulación.

- ✓ Capacidad del recipiente de almacenamiento: 150 ton.
- ✓ Forma del recipiente: cilíndrico, horizontal.
- ✓ Dimensiones del recipiente: 2.5 m de diámetro, 12 m de largo.
- ✓ Tipo de soldadura: Automática.
- ✓ Material de construcción: acero al carbono.
- ✓ Protección del recipiente (interior o exterior): Pintura impermeabilizante.
- ✓ Existencia de accesorios en el recipiente y su localización: válvula, se encuentra ubicada en la parte inferior del tanque. Fecha de fabricación del recipiente: 1948.

3. Condiciones de almacenamiento de la sustancia.

- ✓ Estado: Líquido
- ✓ Presión = 1kg/cm².
- ✓ Temperatura =25 a 36°C.

4. Tipo de averías producidas

- ✓ Ninguna.

5. Características de los alrededores del recipiente.

- ✓ Se encuentran dentro una piscina con agua para recoger cualquier derrame que ocurra, a condiciones ambientales.

6. Condiciones para su uso en el proceso.

- ✓ Se encuentra ocioso.

Condiciones en las que se usa la sustancia.

- ✓ Condiciones: Atmosférica.

7. Fallos ocurridos en estos equipos al operar con estas sustancias.

- ✓ Ninguno.

8. Material de construcción de los equipos donde es usada.

- ✓ Acero al carbono.

9. Protección del sistema de tuberías.

- ✓ Pintura según las normas y protección catódica.

Anexo 2: Comportamiento de las variables climatológicas para la zona objeto de estudio.

Tabla 2a: Comportamiento de los valores medio de la **nubosidad** para la zona estudiada.

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
Media	4	4	4	3	4	5
coef.variac	17.9967	17.9967	13.845	15.1882	21.356	15.7135
desv.estand	0.7378	0.7378	0.5676	0.5163	0.8755	0.7071

MES	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Media	4	4	4	3	4	5
coef.variac	17.9967	17.9967	13.845	15.1882	21.356	15.7135
desv.estand	0.7378	0.7378	0.5676	0.5163	0.8755	0.7071

Tabla 2b: Comportamiento de los valores medio de la **temperatura máxima** para la zona estudiada.

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
Media	26.15	25.92	28.2	29.71	30.94	30.54
coef.variac	2.6448	2.7808	1.3056	2.3929	2.1177	2.3972
desv.estand	0.6916	0.7208	0.3681	0.7109	0.6552	0.7321

MES	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Media	31.43	31.3	30.82	29.54	27.32	26.54
coef.variac	1.3668	1.5506	2.4842	2.3572	2.9726	2.6949
desv.estand	0.4295	0.4853	0.7656	0.6963	0.8121	0.7152

Tabla 2c: Comportamiento de los valores medio de la **temperatura media** para la zona.

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
Media	20.6	20.5	22.5	24.2	25.4	25.7

coef.variac	5.8109	3.5618	6.9811	4.9603	3.8464	4.3965
desv.estand	1.1361	0.6958	1.4942	1.1402	0.9288	1.0745

MES	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Media	26.3	26.1	25.5	24.6	22.7	21.2
coef.variac	2.6557	2.6354	3.7117	3.4507	6.3009	4.5940
desv.estand	0.6637	0.6546	0.8982	0.806	1.3587	0.9235

Fuente: Moya, (2010).

Anexo 3: Afectaciones de la sobrepresión sobre las estructuras.

Sobrepresión (psi)	Daño
0.005	Se escucha un sonido que denota la ocurrencia de un suceso inusual.
0.02	Ruido molesto
0.03	Rotura ocasional de ventanas de vidrio bajo tensión.
0.04	Ruido fuerte
0.10	Rotura de ventanas pequeñas bajo tensión.
0.15	Presión típica de rotura de cristales
0.20	Umbral para la pérdida temporal de la audición
0.30	95% de probabilidad de que no ocurran serios daños.

0.4	Daños estructurales limitados menores como rotura de ventanas, rotura de losas y crujidos de los techos y las paredes.
0.7	Daños menores a la estructura de las casas.
1.0	Demolición parcial de las casas
1.2	40 % de daño en las estructuras
2	Colapso parcial de las paredes y los techos.
3	Edificios con marcos de acero torcidos y empujados fuera de sus lugares.
3.3	80 % de daños en las estructuras
3-4	Ruptura de los tanques de almacenamiento de combustibles.
5	Rotura de postes de electricidad y teléfono.
5-7	Destrucción completa de las estructuras cercanas
7	Se vuelcan los carros de tren cargados
10	100 % de daños

Fuente: Wells, (2003).

Anexo 4: Comportamiento de los valores medio de la velocidad y frecuencia de ocurrencia de los vientos para la zona estudiada.

Rumbos	Frecuencia (%)	Velocidad media (m/s)
N	6,7	3,47
NNE	5,8	4,08

NE	9,4	4,17
ENE	9,1	4,69
E	15,7	4,28
ESE	4,0	3,97
SE	1,5	3,53
SSE	1,5	3,03
S	3,5	2,94
SSW	3,0	2,78
SW	1,8	2,42
WSW	2,1	2,33
WSW	0,7	2,75
WNW	0,7	3,33
NW	0,4	3,47
NNW	1,1	3,72
Calma	33	≤ 1

Anexo 5: Distancia media de la fuente de emisión al área

Local	Distancia media de la fuente de emisión al área (m).	Dirección de donde viene el Viento
Planta de Ácido Sulfúrico	110	SW

Laboratorio y taller	23	S
Oficinas y garita	65	NNW
Oficinas Centrales Farma Cuba	226	NNW
Almacenes de Farma Cuba	290	NNW
Viviendas	333	N
Aula de capacitación	427	N
Oficinas Entrada principal	315	NNW

Anexo 6: Comportamiento de la radiación generada por una piscina de fuego en el estado de calma.

Temperatura (°C)		26.15	Calma	
Nubosidad		4		
Humedad (%)		78		
Dirección del viento	Velocidad Media del Viento (m/s)	Radiación (kW/m²)	Largo (m)	Ancho (m)
NNW	1	LOC-3 (10.0)	39.6	40.8
		LOC-2 (5.0)	60.8	60.8
		LOC-1 (2.0)	97.4	98.2

Anexo 7a: Comportamiento de la sobrepresión generada por la explosión de una nube de vapor en las direcciones de interés. Enero, Abril, Julio y Octubre para los tanques de almacenamiento de Disulfuro de carbono en la Empresa Rayonitro de Matanzas.

Temperatura (°C)		26.15	Enero	
Nubosidad		4		
Humedad (%)		78		
Dirección del viento	Velocidad Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (Psi)	Largo (m)	Ancho (m)
N	3.47	LOC-3 (8.0)	-	-
		LOC-2 (3.5)	109.17	43.2
		LOC-1 (1.0)	166.7	153.4
NNW	3.72	LOC-3 (8.0)	-	-
		LOC-2 (3.5)	99.11	43.2
		LOC-1 (1.0)	156.3	148.2
S	2.94	LOC-3 (8.0)	-	-
		LOC-2 (3.5)	118	49.4
		LOC-1 (1.0)	191.3	176.6
SW	2.42	LOC-3 (8.0)	-	-
		LOC-2 (3.5)	138	57.2
		LOC-1 (1.0)	210.5	197.4

Anexo 7b:

Temperatura (°C)		29.71	Abril	
Nubosidad		3		
Humedad (%)		73		
Dirección del viento	Velocidad Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (Psi)	Largo (m)	Ancho (m)
N	3.47	LOC-3 (8.0)	-	-
		LOC-2 (3.5)	111.17	44.8
		LOC-1 (1.0)	168.8	160.4
NNW	3.72	LOC-3 (8.0)	-	-
		LOC-2 (3.5)	104.33	44.8
		LOC-1 (1.0)	158.2	153.4

S	2.94	LOC-3 (8.0)	-	-
		LOC-2 (3.5)	236	88.4
		LOC-1 (1.0)	329.5	306
SW	2.42	LOC-3 (8.0)	-	-
		LOC-2 (3.5)	142	57.2
		LOC-1 (1.0)	215.5	206

Anexo 7c:

Temperatura (°C)		31.43	Julio	
Nubosidad		4		
Humedad (%)		81		
Dirección del viento	Velocidad Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (Psi)	Largo (m)	Ancho (m)
N	3.47	LOC-3 (8.0)	-	-
		LOC-2 (3.5)	112.31	46.6
		LOC-1 (1.0)	168.9	162
NNW	3.72	LOC-3 (8.0)	-	-
		LOC-2 (3.5)	108.17	44.8
		LOC-1 (1.0)	163.1	155.2
S	2.94	LOC-3 (8.0)	-	-
		LOC-2 (3.5)	134.19	52
		LOC-1 (1.0)	196.6	179.2
SW	2.42	LOC-3 (8.0)	-	-
		LOC-2 (3.5)	148.19	62.4

		LOC-1 (1.0)	215.2	206
--	--	-------------	-------	-----

Anexo 7d:

Temperatura (°C)		29.54	Octubre	
Nubosidad		3		
Humedad (%)		84		
Dirección del viento	Velocidad Media del Viento (m/s)	Sobrepresión (Psi)	Largo (m)	Ancho (m)
N	3.47	LOC-3 (8.0)	-	-
		LOC-2 (3.5)	113.03	48.2
		LOC-1 (1.0)	166.8	160.4
NNW	3.72	LOC-3 (8.0)	-	-
		LOC-2 (3.5)	101.71	43.2
		LOC-1 (1.0)	159.2	153.4
S	2.94	LOC-3 (8.0)	-	-
		LOC-2 (3.5)	126.19	52
		LOC-1 (1.0)	194.6	179.2
SW	2.42	LOC-3 (8.0)	-	-
		LOC-2 (3.5)	145.19	57.2
		LOC-1 (1.0)	214.5	202

Anexo 8: Comportamiento de la radiación generada por un BLEVE.

Estado	Velocidad del Viento (m/s)	Radiación (kW/m ²)	Radio de la zona (m)	Diámetro de la bola de fuego (m)
Calma	1	LOC-3 (10.0)	270	1220
		LOC-2 (5.0)	390	
		LOC-1 (2.0)	620	

Anexo 9: Equivalencia entre valores Probit y porcentaje de la población afectada.

Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%
0	0	3,72	10	4,16	20	4,48	30	4,75	40	5,00	50	5,25	60	5,52	70	5,84	80	6,28	90	7,33	99,0
2,67	1	3,77	11	4,19	21	4,50	31	4,77	41	5,03	51	5,28	61	5,55	71	5,88	81	6,34	91	7,37	99,1
2,95	2	3,82	12	4,23	22	4,53	32	4,80	42	5,05	52	5,31	62	5,58	72	5,92	82	6,41	92	7,41	99,2
3,12	3	3,87	13	4,26	23	4,56	33	4,82	43	5,08	53	5,33	63	5,61	73	5,96	83	6,48	93	7,46	99,3
3,25	4	3,92	14	4,29	24	4,59	34	4,85	44	5,10	54	5,36	64	5,64	74	5,99	84	6,55	94	7,51	99,4
3,36	5	3,96	15	4,33	25	4,61	35	4,87	45	5,13	55	5,39	65	5,67	75	6,04	85	6,64	95	7,58	99,5
3,45	6	4,01	16	4,36	26	4,64	36	4,90	46	5,15	56	5,41	66	5,71	76	6,08	86	6,75	96	7,65	99,6
3,52	7	4,05	17	4,39	27	4,67	37	4,92	47	5,18	57	5,44	67	5,74	77	6,13	87	6,88	97	7,75	99,7
3,59	8	4,08	18	4,42	28	4,69	38	4,95	48	5,20	58	5,47	68	5,77	78	6,18	88	7,05	98	7,88	99,8
3,66	9	4,12	19	4,45	29	4,72	39	4,97	49	5,23	59	5,50	69	5,81	79	6,23	89	7,33	99	8,09	99,9

Anexo 10: Daño según flujo térmico recibido.

Radiación térmica kW · m ²	Efecto.
1,4	Se considera inofensivo para las personas sin ningún tipo de protección.
1,7	Mínimo necesario para causar dolor.
2,1	Mínimo necesario para causar dolor después de 1 minuto.
4,0	Suficiente para causar dolor con una exposición de 20 s; quemaduras de primer grado.

4,7	Causa dolor en 15-20 s, heridas después de 30s.
11,7	El acero fino parcialmente aislado puede perder la integridad mecánica.
12,5	100 % letal. La madera prende tras una larga exposición. Fusión del plástico en los cables eléctricos.
25	El acero fino aislado puede perder la integridad mecánica.
37,5	Suficiente para causa daño en cualquier equipo. Colapso de estructuras.

Anexo 11: Porcentaje de afectaciones obtenidos por *Probit* para el escenario *Pool Fire* ante un escape de Disulfuro de carbono en la Empresa Rayonitro de Matanzas.

Lugar	Radiación (kW/m ²), que alcanza al lugar	Afectaciones							
		Quemaduras mortales (con ropas de protección)		Quemaduras mortales (sin protección)		Quemaduras de segundo grado		Quemaduras de primer grado	
		Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.
Planta de Ácido Sulfúrico	0.35	-14.75	0	-5.90	0	-7.20	0	-3.89	0
Laboratorio y taller	8	3.92	14	4.77	41	5.39	65	8.70	100
Oficinas y garita	2	-2.27	0	-1.42	0	-1.91	0	1.38	0
Oficinas Centrales	0.088	-12.24	0	-11.39	0	-13.67	0	-10.37	0

Farma Cuba									
Almacenes de Farma Cuba	0.045	-14.15	0	-13.30	0	-15.93	0	-12.62	0
Viviendas	0.032	-15.13	0	-14.28	0	-17.08	0	-13.78	0
Aula de capacitación	0.02	-16.88	0	-16.03	0	-19.14	0	-15.83	0
Oficinas Entrada principal	0.037	-14.61	0	-13.76	0	-16.46	0	-13.16	0

Anexo 12: Porcentaje de afectaciones obtenidos por *Probit* para el escenario BLEVE ante un escape de Disulfuro de carbono en la Empresa Rayonitro de Matanzas.

Lugar	Radiación (kW/m ²), que alcanza al lugar	Afectaciones							
		Quemaduras mortales (con ropas de protección)		Quemaduras mortales (sin protección)		Quemaduras de segundo grado		Quemaduras de primer grado	
		Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.
Planta de Ácido Sulfúrico	15	6.07	86	6.92	97	7.92	99.8	11.23	99.7
Laboratorio y	25	7.81	99.8	8.66	100	9.98	100	13.28	100

taller									
Oficinas y garita	22.3	7.42	99.2	8.27	100	9.52	100	12.82	100
Oficinas Centrales Farma Cuba	12.5	5.45	67	6.30	90	7.19	99	10.49	100
Almacenes de Farma Cuba	8.37	4.08	18	4.93	47	5.57	72	8.88	100
Viviendas	6.56	3.25	4	4.10	18	4.59	34	7.90	99.8
Aula de capacitación	4.12	1.66	0	2.51	0	2.72	1	6.03	85
Oficinas Entrada principal	7.24	3.58	8	4.43	28	4.99	50	8.29	100
Promedio		4.91	46	5.76	78	6.56	94	9.86	100

Anexo 13: Porcentaje de afectaciones obtenidos por *Probit* para el escenario explosión de la nube de vapor ante un escape de Disulfuro de carbono en la Empresa Rayonitro de Matanzas.

Lugar	Sobre presión (psi), que alcanza al lugar	Afectaciones. Calma							
		Rotura de tímpano		Muerte por impacto del cuerpo		Lesiones por impactos sobre el cuerpo		Quemaduras de primer grado	
		Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.	Valor Pr	No. afect.
Planta de Ácido Sulfúrico	6.36	5.02	51	5.41	66	8.46	100	15.54	100
Laboratorio y taller	6.36	5.02	51	5.41	66	8.46	100	15.54	100
Oficinas y garita	6.36	5.02	51	5.41	66	8.46	100	15.54	100
Oficinas Centrales Farma Cuba	0.356	-0.53	0	-8.47	0	-4.36	0	3.94	14
Almacenes de Farma Cuba	0.257	-1.16	0	-10.04	0	-5.81	0	2.63	0
Viviendas	0.228	-1.39	9	-10.62	0	-6.34	0	2.15	0
Aula de	0.167	-1.99	0	-12.12	0	-7.73	0	0.89	0

capacitación									
Oficinas Entrada principal	5.44	4.72	39	4.66	37	7.76	99.7	14.91	100