

**Universidad de Matanzas**  
**Sede “Camilo Cienfuegos”**  
**Facultad de Ciencias Técnicas**  
**Departamento de Química**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Químico

**TÍTULO:** Evaluación del efecto sinérgico sobre las personas de accidentes tóxicos, de incendio y explosión desde un punto de vista probabilístico y usando técnicas de inteligencia artificial en un área de almacenamiento de hidrocarburos.

**Autor:**

Claudia Isabel Pablos Medina.

**Tutor:**

M.Sc. Ing. Julio Ariel Dueñas Santana.

Consultante: Dr.C. Ing. Jesús Delfín Luis Orozco

**Matanzas, Cuba 2021**

## *DECLARACIÓN DE AUTORIDAD*

---

Yo, Claudia Isabel Pablos Medina, declaro que soy la única autora de este Trabajo de Diploma y lo pongo a la disposición de la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas y de la Universidad de Matanzas, para hacer uso del mismo con el objetivo y finalidad que se estime conveniente, siempre que se respeten mis derechos como autor.



---

Claudia Isabel Pablos Medina



*“El mundo está en las manos de aquellos que tienen el coraje de soñar y correr el riesgo de vivir sus sueños”.*

**Paulo Coelho**

# DEDICATORIA

---

*A mis padres*

*A mi hermana*

*A mis tíos y abuelos*

*A mi tutor Julio.*

# **AGRADECIMIENTOS**

---

A mis padres **Anneris, Clodi** y al esposo de mi mamá **Arlen** que es un padre más, por el apoyo y la fuerza que me han brindado en todo este proceso; y por ser una pieza clave en mi vida. A mi madre en especial por ser mi motor, la luz de mi vida, mi heroína, por confiar en mí cuando ni yo misma lo hago, gracias **por ser mi todo**.

A mi hermana **Brenda** por su apoyo incondicional, por ser **la mejor hermana** del mundo, por cuidarme, por celarme, por enseñarme, por sus consejos y por siempre protegerme.

A mi tío **Alexander** y a mi abuela **Isabel** por ser mis segundos padres, por criarme y darme los valores y educación que tengo hoy en día; y a mis tíos **Fidel y Alejandro** que a pesar de estar lejos siempre me han apoyado y han confiado en mí.

A mis otros **tíos**, a mis abuelos **Enedina y Alejandro** por el cariño infinito, la comprensión y el apoyo en los momentos difíciles.

A **toda mi familia** por estar siempre presente y brindarme su amor.

A mi novio **Cristhian** por todo el amor y la paciencia, por darme ánimos y nunca rendirse conmigo.

A mi **tutor Julio** por su brillante labor, por ser más que un profesor para todos nosotros, por sus palabras de aliento, por confiar en mí y darme ánimos cuando ya no los tenía, por siempre estar presente y disponible para ayudarnos y aclarar nuestras dudas por más sencillas que fuesen. Por ser un ejemplo de perseverancia y demostrarnos que los sueños y las metas sí se cumplen, pero con mucho esfuerzo y dedicación. Gracias por ser **el mejor tutor**.

A **Dariel** (vida mía) por ser mi otra mitad, mi alma gemela, mi mejor amigo, por ser mi mayor apoyo dentro y fuera de la escuela, también a **Dayamí, Eilyn y Sarahí** por ser las mejores compañeras y amigas que pude tener en la universidad; por todas esas noches de estudio, de risas, de fiesta. Sin mis **Clasaraeidas** no hubiese sido lo mismo.

A mi magnífico equipo de tesis **Dariel, Marynés, Orelvis, Yanelis, Melisa y Diaumary**, por apoyarnos entre todos, por la ayuda desinteresada y por todos nuestros momentos de risas en el grupo de tesis.

A mis **compañeros de la Casa de Cultura** por convertirse en familia, por todas esas tardes de ensayos y nuestras presentaciones, que siempre disfrutamos y le pusimos el corazón.

Al colectivo de **profesores de Ingeniería Química** por su entrega, sus enseñanzas y por su labor en mi formación como profesional.

A la **Universidad de Matanzas** por darme la oportunidad de formarme como profesional, por ser la mejor experiencia de mi vida y permitirme conocer personas maravillosas.

A la ingeniera **Lili** y a **todos los trabajadores** de la DTCCM por su atención en la empresa y su ayuda.

A la vida por este enorme triunfo y a todas las personas que creyeron en mí y en la realización de esta tesis.

*Gracias a todos.*

## Resumen

Esta investigación se realiza en la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas (DTCCM) con el objetivo de cuantificar el efecto sinérgico de accidentes tóxicos, de incendio y explosión sobre las personas. Con esta finalidad se desarrolla una metodología de siete etapas para la cuantificación de los efectos sinérgicos. Primero, se seleccionan las unidades de procesos y se determina el alcance de los escenarios tóxicos, de incendio y explosión, mediante el *software* ALOHA. Luego, se determina la probabilidad de daño sobre las personas de estos escenarios; a continuación, se determinan las probabilidades de escalado de los escenarios de incendio y explosión empleando el análisis histórico, árbol de eventos y ecuaciones Probit, donde se selecciona el tanque 17 como unidad potencialmente peligrosa. Subsecuentemente, se simulan las redes Bayesianas ordinarias para el escenario de explosión, luego se combinan la lógica *Fuzzy* con las redes Bayesianas dinámicas considerando el incendio como escenario primario, las redes se realizan con el objetivo de determinar la probabilidad conjunta del efecto dominó. Posteriormente, se calculan los tres factores determinantes para cuantificar el efecto sinérgico, factores que dependen de la probabilidad de daño generada por los escenarios de incendio, explosión y tóxicos, y la probabilidad conjunta del efecto dominó, luego se emplea nuevamente la lógica difusa para cuantificar los efectos sinérgicos. Los mapas de isorriesgos permiten confirmar que pueden producirse de cinco a siete defunciones hasta 400 metros en solo 10 años, valores que disminuyen hasta llegar a 2000 metros y que se consideran altos.

## **Abstract**

This research is carried out in the Territorial Division of Fuel Marketing of Matanzas (DTCCM) with the aim of quantifying the synergistic effect on people of toxic accidents, fire and explosion. For this purpose, a seven-stage methodology is developed for the quantification of synergistic effects. First, the process units are selected and the scope of the toxic, fire and explosion scenarios is determined, using the ALOHA software. Then, the probability of harm to people in these scenarios is determined. Next, the escalation probabilities of the fire and explosion scenarios are determined using the historical analysis, event tree, and Probit equations, where tank 17 is selected as a potentially hazardous unit. Subsequently, the ordinary Bayesian networks are simulated for the explosion scenario, then the Fuzzy logic is combined with the dynamic Bayesian networks considering the fire as the primary scenario, the networks are made with the objective of determining the joint probability of the domino effect. Finally, the three determining factors are calculated to quantify the synergistic effect, factors that depend on the probability of damage generated by the fire, explosion and toxic scenarios, and the joint probability of the domino effect, then fuzzy logic is used again to quantify synergistic effects. The isorisk maps confirm that five to seven deaths can occur up to 400 meters in just 10 years, values that decrease until reaching 2000 meters and are considered high.

## Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1: Análisis Bibliográfico .....	4
1.1 Definición, características y análisis histórico relacionado al efecto sinérgico de accidentes tóxicos, de incendio y explosión sobre las personas .....	4
1.2 Características de los accidentes tóxicos, de incendio y explosión que pueden ocurrir en almacenamiento y procesamiento de hidrocarburos.....	8
1.3 Métodos o índices que determinan desde una perspectiva probabilística el efecto sinérgico de accidentes tóxicos, de incendio y explosión sobre las personas .....	16
1.4 Conclusiones Parciales.....	23
Capítulo 2: Materiales y métodos .....	24
2.1 Etapa 1: Selección de la Unidad de Proceso .....	26
2.2 Etapa 2: Simulación de escenarios tóxicos, de incendio y explosión.....	26
2.2.1 Simulación de los posibles escenarios tóxicos, de incendio y explosión.....	27
2.2.2 Características y particularidades del software ALOHA.....	27
2.3 Etapa 3: Cuantificación de los efectos sobre las personas debido a toxicidad, radiación térmica y sobrepresión .....	30
2.4 Etapa 4: Valorar la evolución en el tiempo y afectación por cada vector de forma individual.....	31
2.4.1 Determinación de la frecuencia inicial de los accidentes .....	32
2.4.2 Cuantificación de la probabilidad de ignición .....	34
2.5 Etapa 5: Desarrollo de la red Bayesiana dinámica para cuantificar la probabilidad asociada a estos eventos .....	35
2.5.1 Metodología para la elaboración de las redes Bayesianas de probabilidades .....	36
2.5.2 Características del software Hugin .....	37
2.5.3 Cuantificación de probabilidades a partir de las redes Bayesianas .....	38
2.5.4 Uso de las redes Bayesianas dinámicas .....	39
2.5.5 Modelado del efecto dominó aplicando las redes Bayesianas dinámicas .....	40
2.6 Etapa 6: Uso del criterio de expertos a partir de la lógica Fuzzy para determinar el efecto combinado de estos eventos .....	41

2.7 Etapa 7: Cuantificación del efecto sinérgico de accidentes tóxicos, de incendio y explosión .....	48
Capítulo 3: Análisis de Resultados .....	49
3.1 Análisis de resultados de la simulación de escenarios y afectación sobre las personas (Etapas 1-3).....	49
3.1.1 Estimación del alcance del escenario charco de fuego .....	52
3.1.2 Estimación del alcance del escenario BLEVE más bola de fuego .....	54
3.1.3 Estimación del alcance del escenario explosión de una nube de vapor .....	56
3.1.4 Estimación del alcance del escenario nube tóxica.....	58
3.2- Resultados de la valoración de la evolución en el tiempo y afectación por cada vector de forma individual (Etapa 4).....	59
3.2.1 Cuantificación de la probabilidad de escalado de los accidentes .....	62
3.3 Análisis de resultados de las redes Bayesianas ordinarias y dinámicas, y el criterio de expertos a partir de la lógica difusa (Etapas 5-6) .....	66
3.3.1 Análisis de las redes Bayesianas dinámicas y el criterio de expertos a partir de la lógica difusa .....	68
3.4 Análisis de resultados de la cuantificación de los efectos sinérgicos sobre las personas de accidentes tóxicos, de incendio y explosión (Etapa 7) .....	75
3.5 Conclusiones parciales del capítulo .....	78
Conclusiones.....	80
Recomendaciones.....	81
Bibliografía .....	82
Anexos .....	96

## ***Introducción***

Desde el siglo XIX el petróleo y el gas han sido empleados como combustibles en las industrias, en sustitución de los motores de carbón (Q. Wang *et al.*, 2020), con el objetivo de procesar estos componentes con mayor facilidad se crearon instalaciones industriales a nivel mundial para la exploración, extracción, refinación y comercialización del petróleo crudo y sus derivados. En estas instalaciones el petróleo crudo es procesado y se obtienen derivados como por ejemplo diésel, gasolina, gas natural y gas de petróleo, sustancias que mayormente son almacenadas en tanques atmosféricos (Tauseef *et al.*, 2018).

En las industrias petroleras las cantidades de materiales que se producen y almacenan, bajo la condición de que ocurra un derrame o escape (tales incidentes que son causados por diferentes factores que van desde el mal funcionamiento del equipo hasta el error humano) y la existencia de una fuente de ignición, pueden conducir a un incendio, una explosión o descargas tóxicas (Sharma *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2017).

Los accidentes que se desencadenan a partir de sustancias químicas peligrosas suelen incluir reacciones repentinas de alta energía y efectos sinérgicos, debido a sus propiedades inflamables y explosivas. Los incidentes iniciales de un desastre suelen ocurrir a partir de un derrame o fuga de un componente peligroso, y puede ocasionar un accidente secundario más grave teniendo como resultado un entorno caótico e inaccesible (He y Weng, 2019).

Estos incidentes individuales desencadenan otros e interactúan entre sí, formando una situación compleja (He y Weng, 2019), combinando sus efectos en uno solo conocido como efecto sinérgico, que pueden tener consecuencias y un impacto social más graves que los eventos individuales (He y Weng, 2020).

Para la evaluación de riesgo de estos efectos sinérgicos los métodos de evaluación de peligros individuales no son adecuados (He y Weng, 2019); para estudiar estos eventos se emplean técnicas de inteligencia artificial como las redes Bayesianas, las cuales se combinan con los métodos convencionales en el análisis de riesgos

(He y Weng, 2020); las redes Bayesianas son métodos gráficos probabilísticos capaces de razonar en condiciones de incertidumbre (Khakzad, 2015, 2021; Khakzad *et al.*, 2012).

En Cuba hay industrias petroleras que operan y comercializan el petróleo crudo y sus derivados, sustancias que son potencialmente explosivas e inflamables. En la provincia de Matanzas se encuentra ubicada la División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas (DTCCM), empresa la cual se encarga de recepcionar, almacenar y comercializar el crudo tratado de las Empresas de Perforación y Extracción de Petróleo de Occidente y Centro, y los combustibles provenientes de las refinerías. La DTCCM consta de cinco áreas fundamentales: la planta de Gas Licuado del Petróleo, la Terminal 320 (T-320), los muelles (PT1, PC2, PC3, Bayona y FP), la Base en Tierra (Supertanquero) y la Base de Crudos.

A pesar de la tecnología y las herramientas con la que cuenta la DTCCM, no cuenta con herramientas para cuantificar probabilísticamente los efectos sinérgicos sobre las personas de accidentes tóxicos, de incendio y explosión.

Por esta razón se plantea el siguiente **problema** de investigación: Se desconoce el efecto sinérgico que provocan los accidentes tóxicos, de incendio y explosión sobre las personas en el almacenamiento y procesamiento de hidrocarburos.

Para la solución de este problema se presenta la **hipótesis** siguiente: Si se combinan técnicas de inteligencia artificial con otras técnicas clásicas de análisis de riesgos, se podrá cuantificar el efecto sinérgico sobre las personas de accidentes tóxicos, de incendio y explosión desde una perspectiva probabilística en la DTCCM.

Por lo que el **objetivo general** de esta investigación es: Evaluar el efecto sinérgico sobre las personas de accidentes tóxicos, de incendio y explosión desde un punto de vista probabilístico en la DTCCM.

Los **objetivos específicos** son los siguientes:

1. Designar el alcance de los accidentes tóxicos, de incendio y explosión en el área analizada.

2. Definir la combinación más acertada desde una perspectiva probabilística en la cuantificación de efecto sinérgico sobre las personas de accidentes tóxicos, de incendio y explosión.
3. Cuantificar el efecto sinérgico sobre las personas de accidentes tóxicos, de incendio y explosión a partir de la aplicación del modelo definido previamente.

## **Capítulo 1: Análisis Bibliográfico**

En el presente capítulo se desarrollan temáticas relacionadas con el efecto sinérgico de accidentes sobre las personas desde un punto de vista probabilístico. Se consultan los criterios de varios autores para conformar una definición de efecto sinérgico y hacer un análisis histórico de accidentes que han ocurrido a través de los años y relacionarlos con el mismo. Luego se analizan los accidentes tóxicos, de incendio y explosión en almacenamiento y procesamiento de hidrocarburos. Finalmente, se analizan herramientas que determinan desde una perspectiva probabilística el efecto sinérgico de accidentes tóxicos, de incendio y explosión sobre las personas.

### **1.1 Definición, características y análisis histórico relacionado al efecto sinérgico de accidentes tóxicos, de incendio y explosión sobre las personas**

En este epígrafe se define lo que es efecto sinérgico a partir del criterio de varios autores, se exponen algunas características del efecto sinérgico y se analizan algunos casos de accidentes registrados y se relacionan a los efectos sinérgicos sobre las personas. El objetivo del epígrafe es conformar una definición de efecto sinérgico a partir del criterio de varios autores y realizar un análisis de cómo se ha manifestado este efecto sinérgico sobre las personas en los accidentes que han ocurrido a través de los años. Es importante tener claro la definición de efecto sinérgico y ver cómo se manifiesta para el desarrollo de la investigación.

Hay varios autores que dan una definición de efecto sinérgico como son: He y Weng (2019), Acuña (2019), INSHT (1984), Silbergeld (2017). Todos estos criterios se muestran en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1: Definición de efecto sinérgico por varios autores**

Artículos	Definición
Efectos sinérgicos en la evaluación de desastres con acoplamientos de peligros múltiples: incendios, explosiones, y fugas de sustancias tóxicas (He y Weng, 2019)	Representa las interacciones entre incidentes individuales en desastres de combinación de peligros múltiples.
Evaluación de efectos sinérgicos al Estudio de Impacto Ambiental de la PSF (Acuña, 2019)	Aquel que se produce cuando el efecto conjunto de la presencia simultánea de varias actividades supone una incidencia ambiental mayor que el efecto suma de las incidencias individuales contempladas aisladamente. Asimismo, se incluye aquel efecto cuyo modo de acción induce en el tiempo la aparición de otros nuevos.
Criterios toxicológicos generales para los contaminantes químicos (INSHT, 1984)	El efecto combinado es mayor que el de cada uno de los componentes de la mezcla. Los efectos sinérgicos pueden ser de dos clases: aditivos, cuando la magnitud del efecto combinado es igual a la suma de los efectos producidos separadamente por cada uno de los tóxicos, y potenciados, cuando el efecto combinado es más que aditivo.
Toxicología (Silbergeld, 2017)	El efecto combinado es mayor que el de cada agente por separado. Aquí se pueden distinguir dos tipos: a) aditivo, cuando el efecto combinado es igual a la suma de los efectos producidos por separado por cada agente, y b) potenciador, cuando el efecto combinado es mayor que la suma de los efectos individuales

A criterio de la autora de la investigación, todas las definiciones anteriores concuerdan que el efecto sinérgico es la combinación de las interacciones de

incidentes individuales y este efecto es mayor que el de los incidentes por separado; puede ser aditivo y potenciador.

He y Weng (2019) consideran tres tipos de efectos sinérgicos relacionados con incendios, explosiones y fugas de sustancias tóxicas: activación, amplificación de la gravedad y demora en la intervención de los bomberos. En la activación, se analiza si la consecuencia de un incidente inicial puede iniciar un incidente secundario. Cuando el incidente primario es un incendio la temperatura ambiente va aumentando mientras se va desarrollando la combustión. Este aumento de la temperatura puede provocar explosiones o rotura de los tanques de almacenamiento, dejando un ambiente potencialmente tóxico. Al liberarse grandes cantidades de calor y energía en una explosión se pueden desencadenar detonaciones y causar un incendio generalizado. La onda de choque puede ocasionar daños sobre los tanques cercanos provocando la rotura de estos y la liberación de sustancias tóxicas.

El segundo efecto sinérgico es la amplificación de la gravedad. Aquí se utiliza el concepto de severidad para medir la escala del evento y así facilitar la discusión de los efectos sinérgicos. La gravedad puede estar limitada por muchos factores; los efectos sinérgicos alivianan dichas limitaciones y amplifican la gravedad, haciendo que reaccionen elementos que no reaccionaron inicialmente, como por ejemplo: la detonación de explosivos que no detonaron en el incidente inicial, rotura de tanques, posteriores explosiones, propagación del fuego o fuga de sustancias tóxicas (He y Weng, 2019, 2020).

El tercer efecto es la intervención de los bomberos, la cual cumple un papel importante a la hora de controlar la gravedad de los incidentes. La efectividad de la intervención está limitada por los daños, dificultades y amenazas provocadas por incendios, explosiones y la fuga de sustancias tóxicas (He y Weng, 2019).

A criterio de la autora de la investigación, la activación y amplificación son elementos importantes para tener en cuenta a la hora de realizar un estudio sobre efectos sinérgicos debido a las severas consecuencias que provocan, la intervención de los

bomberos también cumple una función importante, pero está limitada por varios factores que no pueden ser controlados.

En el anexo 1 se muestra un análisis que se realiza sobre los accidentes ocurridos a través de los años y sus efectos sinérgicos. Se analiza el accidente del 29 de octubre de 2009 en la terminal de lubricantes *IOC Petroleum Oil* en Jaipur en la India, suceso que se desencadenó a partir de la fuga de gasolina de uno de los tanques de almacenamiento, dejando como resultado 11 muertos y 150 heridos (Mishra *et al.*, 2012; Sharma *et al.*, 2019; Trivedi *et al.*, 2014, Oct-Dec ). El accidente del 11 de diciembre de 2005 en Buncefield, Reino Unido se desarrolla a partir de un desbordamiento de gasolina en el tanque 912 del depósito de almacenamiento, no provocó defunciones, pero sí lesiones considerables como daños pulmonares y problemas auditivos producto de la sobrepresión recibida (Mishra *et al.*, 2012; Sharma y Mishra, 2019); el 23 de octubre de 2009 también se desencadena un accidente por desbordamiento de un tanque de gasolina en *Caribbean Petroleum Corp.* en Bayamon, EE. UU que resulta en una gran explosión dejando consecuencias humanas como: daños pulmonares y auditivos, y daños en órganos sensibles (Mishra *et al.*, 2012; Sharma y Mishra, 2019). El suceso del 2 al 3 de diciembre de 1984 *Union Carbide India Limited (UCIL)* en Bhopal, India, representa uno de los mayores desastres industriales de la historia, las 30 toneladas de isocianato de metilo que se liberaron a la atmósfera dejaron como consecuencia 3800 muertes instantáneas, 600 000 heridos, al pasar de los años murieron 6000 personas más producto de los altos niveles de concentración de gases tóxicos que aún quedaban (Mittal, 2015; Naderpoura *et al.*, 2015).

Con el análisis histórico realizado se evidencia, a criterio de la autora de la investigación, que los efectos de sobrepresión, la radiación, la fuga de gases tóxicos por separado pueden causar consecuencias graves sobre las personas, y la combinación de todos juntos puede causar desde lesiones leves hasta la muerte. Es de suma importancia tener en cuenta la magnitud de estos efectos y la distancia hasta donde pueden incidir porque no solo afectan a las personas, los equipos y el medio que se encuentran dentro de los límites donde ocurre el accidente sino

también los recintos que se encuentran a su alrededor e incluso a kilómetros de distancia, provocando daños no tan graves, pero no menos importantes.

## **1.2 Características de los accidentes tóxicos, de incendio y explosión que pueden ocurrir en almacenamiento y procesamiento de hidrocarburos**

En el presente epígrafe se exponen todos los escenarios de accidentes tóxicos, de incendio y explosión que ocurren cuando se trabaja con hidrocarburos, con el objetivo de conocer que tipos de accidentes pueden ocurrir en el almacenamiento y procesamiento de hidrocarburos y cómo se desarrollan, es de gran importancia conocer todos estos escenarios para poder evitarlos y así preservar la vida, el medio ambiente y la economía de la industria.

En la industria química debido a la cantidad de materiales peligrosos que se producen y se almacenan pueden ocurrir (bajo la existencia de fuentes de ignición) explosiones, incendios y accidentes tóxicos (Assael y Kakosimos, 2010; Baalisampang *et al.*, 2017; Lei y Qi, 2010; Rajeev *et al.*, 2019; Sellami, Manescau, *et al.*, 2018; Sellami, Nait-Said, *et al.*, 2018; Wang y Qian, 2018; Zhang *et al.*, 2017; Q. Zhang *et al.*, 2019), esto puede traer consecuencias graves como: fallas de estructuras, lesiones o muertes humanas (Mehrshad *et al.*, 2019; Rajeev *et al.*, 2019; Sellami, Nait-Said, *et al.*, 2018; Wang y Qian, 2018; Q. Zhang *et al.*, 2019), casi todas las causas fundamentales de accidentes graves son 57% de los incendios, 33% de las explosiones y el 10% nubes de vapor (Chebila, 2020; Mashhadimoslem *et al.*, 2020). Muchos de estos productos inflamables como los hidrocarburos líquidos se almacenan en tanques atmosféricos (Moshashaei *et al.*, 2018; Santos y Landesmann, 2014).

Las principales causas de liberación de hidrocarburos son: fallas técnicas, fallas de diseño, caída de rayos durante tormentas eléctricas, errores en el mantenimiento, rotura o fisura de elementos estructurales, problemas en el sistema eléctrico, acción de desastres naturales, eventos externos, alteraciones de procesos, errores humanos (Abreu y Godoy, 2011; Rozuhan *et al.*, 2020; Taveau, 2011), la aparición de grietas o roturas en tanques o tuberías adjuntas; todo puede ocasionar derrames de hidrocarburos que si no se contienen y controlan se pueden desarrollar incendios

de chorros o explosiones de nube de vapor (VCE) que terminan desencadenando nuevos incendios y explosiones (Tauseef *et al.*, 2018). Aproximadamente el 30% de los accidentes son causados por errores humanos y un 33% causados por rayos (Abreu y Godoy, 2011; Chang y Lin, 2006).

La pérdida y liberación de hidrocarburos inflamables al ambiente circundante podrían causar varios tipos de peligros y diferentes escenarios en evolución (Palazzi *et al.*, 2017; Seo *et al.*, 2017). Según Palacios y Rengel (2020b) los incendios son el tipo de escenario más común que involucran combustibles de hidrocarburos, dependiendo de las propiedades y el estado del combustible liberado se pueden originar escenarios como: incendio de charco (*pool fire*), dardo de fuego (*jet fire*) y llamarada (*flash fire*) (Casal *et al.*, 2002), siendo el más frecuente el incendio de charco (Omran y Bagher, 2019; Palazzi *et al.*, 2017). Los incendios de hidrocarburos son normalmente incendios de combustibles líquidos que causan graves consecuencias como pérdidas humanas, de activos y medio ambiente debido a las explosiones y emisiones tóxicas que lo acompañan (Ding *et al.*, 2020b; Guo *et al.*, 2020).

Un incendio de charco o *pool fire* (cuya geometría normalmente es de forma cilíndrica) es el tipo de escenario térmico de incendio más importante comparado con otros incendios ya que tiene un enorme potencial devastador y gran capacidad para causar el máximo daño en las industrias de procesos (Budd y Ugwu, 2018).

Un incendio de charco puede ocurrir cuando un líquido inflamable se libera accidentalmente en el suelo o el agua (Palazzi *et al.*, 2017). El incendio de charco se caracteriza por la flotabilidad impulsada por las llamas y se forma cuando hay un derrame de combustible líquido y se encuentra una fuente de ignición (Chen *et al.*, 2019; Palacios y Rengel, 2020b) que puede ser una chispa de electricidad estática provocada por el propio vertido, superficies calientes, herramientas de corte, soldadura y llamas (Casal *et al.*, 2002). El charco de fuego es una llama de difusión turbulenta que se produce sobre un charco horizontal de combustible que se vaporiza debido a la aportación calorífica del propio incendio (Liu *et al.*, 2019; Omran y Bagher, 2019).

Cuando el incendio se desarrolla en un espacio limitado se puede decir que el incendio es confinado y cuando se produce en un área abierta es no confinado (Palazzi *et al.*, 2017).

Los dardos de fuego o incendio de chorro se pueden formar inmediatamente cuando hay una fuga de gas a alta velocidad o de dos fases, cuando se forma un agujero en un tanque o cuando hay una fuga de gas de una brida (Kim *et al.*, 2010; Palacios y Rengel, 2020b; Zhou *et al.*, 2019). Los dardos de fuego son llamas no premezcladas en las que el combustible proviene de una fuente en forma de chorro y se mezcla con aire del exterior (Gopalswami *et al.*, 2016; Laboureur *et al.*, 2016). Podemos resumir que es una llama alargada que se produce mediante la ignición de un chorro turbulento de gases o vapores combustibles (Casal *et al.*, 2002; Palacios *et al.*, 2020; Palacios y Rengel, 2020a).

Los dardos de fuego acostumbran a ser más pequeños que los incendios de charcos y la radiación emitida por estos también es menor que la de los charcos de fuego, por lo que los incendios de chorros son más peligrosos y significativos a cortas distancias (Mashhadimoslem *et al.*, 2020).

La llamarada es una llama progresiva con baja velocidad que no produce significativas ondas de presión; está mayormente asociada a la dispersión de vapores inflamables a ras de suelo. Al encontrar un punto de ignición se propaga el frente de la llama generado hasta un punto de emisión, va quemando y barriendo con toda la zona que fue ocupada por los vapores que tenían condiciones de inflamabilidad (Atkinson *et al.*, 2017; Casal *et al.*, 2002)

Los incendios son los escenarios de accidentes más comunes que involucran combustibles de hidrocarburos que ocurren en las industrias de procesos químicos. Debido a las catastróficas y devastadoras consecuencias en cuanto a costo económico, número de víctimas hospitalizadas y fallecidas se debe tener un alto control e implementar medidas de diseño de seguridad innovadoras (Jiang *et al.*, 2020; Palacios y Rengel, 2020b; Yang *et al.*, 2019).

La ignición de una mezcla de aire e hidrocarburos que se produce dentro de los tanques de almacenamiento a presión atmosférica pueden provocar explosiones causando víctimas mortales, daños a las instalaciones y edificios circundantes (Noret *et al.*, 2012; Taveau, 2011). Los hidrocarburos pueden explotar por ignición cuando se mezclan con un oxidante, que generalmente es aire (Li y Zhang, 2020). La combustión ocurre cuando la temperatura comienza a aumentar hasta un punto donde las moléculas de hidrocarburos reaccionan espontáneamente con el oxidante (Paik *et al.*, 2011). Cuando ocurre la explosión de un tanque, las ondas de sobrepresión y los fragmentos proyectados que se generan pueden causar efectos arrasadores (Dobashi, 2017; Taveau, 2011).

Datos sobre accidentes en tanques de almacenamiento (Chang y Lin, 2006) presentaron la evidencia de que casi siempre se formaba una nube de vapor que provocaba una explosión y un incendio (Bonilla *et al.*, 2019; Q. Wang *et al.*, 2020).

Mediante la producción, transporte o almacenamiento de gas o líquido combustible puede ocurrir una fuga, y esta filtrarse y difundirse en la atmósfera, al mezclarse con el aire puede formar una nube de vapor y esta a su vez provocar un accidente, la explosión de gas de este tipo es conocida como explosión de nube de vapor (Liu *et al.*, 2020), que provoca graves consecuencias, usualmente incluye víctimas, pérdidas económicas, agitación política y contaminación ambiental (Bao *et al.*, 2016; Q. Wang *et al.*, 2020).

En condiciones de poco viento o viento nulo una pequeña fuga acompañada de enormes nubes y con posibilidad de ignición pueden resultar en una grave explosión de gas (Atkinson *et al.*, 2017; Gill *et al.*, 2019; Q. Wang *et al.*, 2020).

En dependencia de las condiciones de inflamabilidad y disponibilidad de la fuente de ignición se puede formar lo que se ha denominado como Explosión de Nube de Vapor (Mishra *et al.*, 2012). Este tipo de explosión química puede ser explosión de una nube de vapor inflamable no confinada (UVCE) que es la que se desarrolla y se dispersa por el ambiente exterior o puede ser explosión de vapor confinado (VCE) que se asocia a explosiones derivadas de la combustión de vapores inflamables en recintos cerrados (Casal *et al.*, 2002; Pritchard y Roberts, 1993; S. Wang *et al.*,

2020). La generación de sobrepresión resultante de un VCE se encuentra normalmente en un rango entre 20 y 50 kPa. Los VCE pueden producir nubes de condensación visibles que están relacionadas con la humedad del aire y la subpresión que a su vez está relacionada con la sobrepresión (Birk, 2017). La magnitud del desastre debido a la explosión aumenta cuando hay una transición de deflagración a detonación (DDT) (Bang *et al.*, 2018; Mishra *et al.*, 2012).

La sobrepresión que se genera de un VCE depende de la inflamabilidad y cantidad de combustible involucrado, las condiciones climáticas, la fuerza y la fuente de ignición (Mishra *et al.*, 2012; Qi *et al.*, 2019).

Los accidentes de efecto dominó han tenido como causas más frecuentes las explosiones (57%) y los incendios (43%) (Chen, Reniers, *et al.*, 2020; Jianfeng y Reniers, 2020; M. Zhang *et al.*, 2019; Zhou y Reniers, 2018), dentro de las explosiones el VCE ha sido la causa del 84% de los accidentes (Zhou y Reniers, 2017, 2018). Han ocurrido accidentes catastróficos en los últimos años debido a los VCE como por ejemplo: la explosión de Puerto Rico (2009, EE. UU.), la explosión de Sitapura (2009, India) y la explosión de Amuay (Venezuela, 2012) (Chen, Khakzad, *et al.*, 2020).

Las lesiones de los UVCE están determinadas por tres aspectos: la sobrepresión de la onda de choque de expansión, la lesión causada por la bola de fuego que tiene altas temperaturas y lesiones por gases venenosos y peligrosos (Lei y Qi, 2010).

Existe un tipo de explosión que es conocida como explosión física que son impulsadas por la energía interna acumulada en un gas comprimido o un líquido sobrecalentado, un ejemplo del estallido de un recipiente que contiene sustancias a presión es el BLEVE, los escenarios de BLEVE aunque normalmente se desarrollan con hidrocarburos licuados a presión también pueden ocurrir con sustancias no inflamables como el agua, este fenómeno puede ocurrir siempre y cuando el precalentamiento del recipiente sea lo suficientemente alto como para llevar las sustancias a un estado de sobrecalentamiento (Casal *et al.*, 2002; Hansen *et al.*, 2017; Hematiano *et al.*, 2016; Hemmatian *et al.*, 2018; Li y Hao, 2020; Pinhasi *et al.*, 2007; Yakush, 2016).

El BLEVE es la explosión más devastadora que se puede desarrollar durante la manipulación o el almacenamiento de un líquido de bajo punto de ebullición, causando múltiples pérdidas de vidas humanas, daños económicos y ambientales (Behari y Noga, 2017; Bubbico y Mazzarotta, 2017; Hemmatian *et al.*, 2015), en algunos casos el BLEVE viene acompañado de una bola de fuego (Abbasi y Abbasi, 2007; Casal *et al.*, 2002; Y. Wang *et al.*, 2020).

Hay varias definiciones de BLEVE como por ejemplo la que emite El Centro de Seguridad de Procesos Químicos (1999) que plantea que la explosión de vapor en expansión de un líquido en ebullición (BLEVE) es: “Una liberación repentina de una gran masa de líquido sobrecalentado presurizado a la atmósfera”. Birk y Cunningham (1994) también dan su definición de BLEVE y lo plantean como: “Un BLEVE es una liberación explosiva de vapor en expansión y líquido en ebullición cuando un recipiente que contiene un gas licuado a presión falla catastróficamente (p. 474). Walls (1978) quiso definir el BLEVE como: “Una falla de un recipiente principal en dos o más piezas, que ocurre en un momento en el que el líquido contenido está a una temperatura muy por encima de su punto de ebullición a la presión atmosférica normal” (p. 46) (citados por Abbasi y Abbasi, 2007).

Cuando en un recipiente un líquido es calentado y aumenta la presión en su interior, la parte superior de la pared que no está cubierta por el líquido no está refrigerada, por lo tanto aumenta su temperatura y disminuye la resistencia mecánica, la parte que se encuentra por debajo del nivel del líquido transmite su calor al líquido, la despresurización del líquido hace que este se encuentre a una temperatura superior a la que corresponde, si en el momento de la despresurización la temperatura del líquido es mayor a la temperatura límite de sobrecalentamiento se produce una vaporización instantánea y una parte del mismo es vertido al exterior en forma de mezcla bifásica, la expansión del vapor presente provoca una onda de presión, una bola de fuego y la rotura del recipiente en varios pedazos que son lanzados a una distancia considerable, de esta forma ocurre el BLEVE (Abbasi y Abbasi, 2007; Behari y Noga, 2017; Bubbico y Mazzarotta, 2017; Casal *et al.*, 2002; Duan *et al.*, 2020; Hemmatian *et al.*, 2015; Sellami, Manescau, *et al.*, 2018).

Aunque los accidentes que involucran *boilover* o borbollón tienen baja frecuencia de ocurrencia representan un riesgo importante para los seres humanos y los equipos por su violenta expulsión de combustible en llamas, la formación de una bola de fuego y el incendio en tierra (Ahmadi *et al.*, 2019; Casal *et al.*, 2002; Kamarudin y Buang, 2016).

El *boilover* es un fenómeno de combustión y puede ocurrir en tanques de almacenamiento de hidrocarburos y para que ocurra es necesario la generación de una ola de calor, para ello se necesita una amplia gama de volatilidades en los componentes, la viscosidad de los hidrocarburos debe ser lo suficientemente elevada para evitar el paso del vapor y la existencia de agua en el recipiente (Casal *et al.*, 2002). El agua puede ser resultado de las etapas de la producción de petróleo producto a efectos de la condensación, perforación, transporte o como parte de la composición del petróleo por lo que es muy difícil eliminar esa agua (Kong *et al.*, 2017).

El borbollón se produce cuando la capa superficial del hidrocarburo se calienta con las radiaciones de un incendio, esta capa entra en ebullición y experimenta un proceso de destilación donde los componentes más volátiles pasan a vapor y alimentan las llamas, cuando se va enriqueciendo la llama en los componentes más pesados esta capa va aumentando su temperatura, una onda de calor se propaga hacia la parte inferior del depósito que contiene una capa acuosa y esto provoca la vaporización del agua; la generación casi instantánea de una gran cantidad de vapor provoca una violenta erupción con la formación de una bola de fuego y la proyección de combustible al exterior (Ahmadi *et al.*, 2019; Casal *et al.*, 2002; Hristov *et al.*, 2004; Kamarudin y Buang, 2016; Kong *et al.*, 2017; Nwabueze, 2016; Tseng y Tsai, 2020).

Los gases tóxicos que se liberan accidentalmente han sido un grave peligro en el devenir de los años debido a que son una gran amenaza para los seres humanos. Según datos recopilados a través de los años, durante la década del 2000 hubieron más de 3100 incidentes relacionados con productos químicos teniendo la fuga de

gases tóxicos la mayor probabilidad de tener consecuencias graves (Ni *et al.*, 2019; Q. Wang *et al.*, 2020).

Un accidente natural o industrial o un ataque terrorista pueden tener como consecuencia la dispersión de gases tóxicos, que pueden ser liberados a la atmósfera mediante tres fuentes principales: dispersión de gases tóxicos; dispersión después de una explosión; y dispersión de productos de combustión tras un incendio de productos químicos nocivos. La dispersión de gases tóxicos representa un peligro para las personas, porque dependiendo de las condiciones atmosféricas, puede afectar a personas ubicadas a grandes distancias del punto de origen inicial (Lovreglio *et al.*, 2016).

La dispersión de gases tóxicos y la fuga de estos involucran factores como las condiciones de la fuga y las condiciones meteorológicas (Yang *et al.*, 2020), cuando el gas o el vapor está lo suficientemente diluido y su velocidad es menor que la velocidad del viento se dispersará a corta distancia, ese fenómeno se conoce como chorro gaseoso o *turbulent free jet*; cuando la nube se desplaza y se va diluyendo se le conoce al incidente como dispersión atmosférica, el área que queda comprendida bajo la nube sufre los efectos de los productos contaminantes (Casal *et al.*, 2002).

A criterio de la autora de este trabajo, los incendios son los accidentes más comunes en el almacenamiento y procesamiento de hidrocarburo, se desarrollan con mucha facilidad y pueden causar otros accidentes o un evento de efecto dominó. Dentro de las explosiones los escenarios de VCE y BLEVE son los más comunes y peligrosos porque tienen consecuencias graves como ondas de sobrepresión (VCE), la proyección de fragmentos y bolas de fuego (BLEVE). La dispersión de gases tóxicos no solo afecta a los seres humanos sino también al medio ambiente, como la contaminación del aire y los suelos.

### **1.3 Métodos o índices que determinan desde una perspectiva probabilística el efecto sinérgico de accidentes tóxicos, de incendio y explosión sobre las personas**

Para la realización de este epígrafe se realiza una búsqueda de herramientas que determinan probabilísticamente el efecto sinérgico sobre las personas de accidentes tóxicos, de incendios y explosiones, con el objetivo de conocer y analizar todas las herramientas que se han utilizado para determinar probabilísticamente el efecto sinérgico sobre las personas, es de gran importancia la realización de este epígrafe para la investigación porque constituye una ayuda a la hora de decidir qué herramientas emplear.

En la tabla 1.2 se muestran las herramientas utilizadas por varios autores para la determinación de efecto sinérgico.

En el estudio realizado por He y Weng (2019), utilizaron la simulación de Monte Carlo con la combinación de modelos para accidentes individuales para cumplir el objetivo de evaluar las interacciones de peligros múltiples, debido a que la ocurrencia de cada incidente es aleatoria, las consecuencias de incendios, explosiones y fugas de sustancias tóxicas también son aleatorias.

Los autores en su estudio presentaron un método de Simulación de Monte Carlo para ilustrar efectos sinérgicos, en este método no se exige la precisión de análisis de consecuencias, utilizaron descripciones de eventos y fórmulas empíricas de la vulnerabilidad humana para obtener como resultado una tasa de mortalidad humana (He y Weng, 2019).

He y Weng (2019) combinaron métodos estadísticos con la tasa de mortalidad humana de cada incidente, esto permite hacer una comparación entre la tasa de mortalidad combinada que no tiene en cuenta los efectos sinérgicos y la que sí los tiene en cuenta, pudiendo llegar a la conclusión de que se pueden identificar intuitivamente los efectos sinérgicos mediante la comparación de las tasas de mortalidad combinadas.

He y Weng (2019) emplearon modelos empíricos como modelos de análisis de consecuencias en la simulación numérica, el método empleado por los autores no exige mucha precisión de los métodos de análisis de consecuencias; son necesarias estas fórmulas empíricas porque no existe un modelo concebido de análisis de consecuencias que sea adecuado para los desastres asociados a amenazas múltiples, para respaldar la simulación numérica se emplearon modelos que describen los procesos de propagación de los incidentes y las interacciones entre ellos.

He y Weng (2020) plantearon que un nuevo método basado en simulación de Monte Carlo (MCS) mejora los modelos y algoritmos del método original de MCS, simplifica los cálculos de frecuencia de accidentes que se realizan para la determinación de la frecuencia primaria de accidentes, evita que se tengan que introducir cálculos de probabilidad en el proceso de simulación, siendo ventajoso para cuando haya que estudiar un caso en el que dos o más accidentes secundarios se desencadenen al mismo tiempo; mejora el algoritmo de acuerdo con los problemas generales del análisis cuantitativo de riesgo (QRA, por sus siglas en inglés) para accidentes de efecto dominó, utiliza MCS y teoría de campo para calcular los efectos físicos y la probabilidad de escalado de accidentes permitiendo que los resultados de QRA contengan los efectos sinérgicos, los efectos sinérgicos de los efectos físicos no lineales y la vulnerabilidad humana también pueden considerarse utilizando este método.

Para verificar la eficiencia de este nuevo método se utilizan las redes Bayesianas. Aplicando la teoría de campo se compensan las desventajas generales que presenta el método QRA, que son el descuido de los efectos sinérgicos y la brecha de tiempo. Este nuevo método no está concentrado solamente en los efectos físicos en ubicaciones específicas, sino que también muestra en forma de campo los efectos físicos y los factores ambientales. Se puede emplear un campo para simular el escalado del accidente y tener en cuenta los efectos sinérgicos de los efectos físicos y los factores ambientales a pequeña escala para un área de la planta química y a gran escala para el área afectada por accidentes y así poder calcular la

mortalidad humana y tener en cuenta los efectos sinérgicos de la vulnerabilidad humana. La distribución de la mortalidad cambia con el tiempo debido a los campos de efectos físicos dinámicos. Con este método se obtuvieron resultados de QRA que tienen en cuenta el intervalo de tiempo (He y Weng, 2020).

Debido a la escasa investigación sobre efectos sinérgicos He y Weng (2020) muestran las influencias de los efectos sinérgicos en los resultados de QRA mediante la realización de un análisis de sensibilidad sobre los coeficientes de efectos sinérgicos.

Según He y Weng (2020) en los accidentes químicos, dos tipos principales de efectos sinérgicos están relacionados con los efectos físicos y la vulnerabilidad humana. Al ocurrir un accidente de incendio, explosión y liberación tóxica simultáneamente, cada efecto físico estará magnificado por el efecto de sinergia aumentando así la vulnerabilidad del cuerpo humano provocando un aumento de la mortalidad; introduciendo estos coeficientes de aumento se permite el análisis cuantitativo de la sensibilidad de los efectos sinérgicos. Mostraron por los cambios de las curvas de riesgos individuales bajo diferentes coeficientes de magnificación los efectos sinérgicos de los efectos físicos y la vulnerabilidad.

Khakzad *et al.* (2012) realizaron un análisis del efecto dominó mediante las redes Bayesianas y plantearon que la incorporación de unidades secundarias en el efecto dominó no solo va a intensificar el accidente, ocasionando consecuencias más severas, sino que además ayuda al efecto dominó a escalar al siguiente nivel al impactar a unidades terciarias. Debido a los efectos de un accidente o por los efectos sinérgicos, los vectores de escalado que son producidos en accidentes secundarios van a desencadenar otros accidentes en unidades terciarias.

Khakzad *et al.* (2012) analizaron los efectos sinérgicos en el efecto dominó mediante la interacción de las radiaciones de calor de los incendios, las ondas de choque producto de las explosiones que son responsables de los daños por sobrepresión; para estimar el efecto sinérgico de la sobrepresión es esencial la presunción de la concurrencia de eventos del mismo orden.

Los autores introdujeron una nueva metodología basada en redes Bayesianas para analizar probabilísticamente el efecto dominó en plantas de procesos. Desarrollaron mediante las redes Bayesianas un patrón de propagación probable del efecto dominó a partir de un evento primario; después modificaron aún más las redes Bayesianas para tener en cuenta la probabilidad del efecto dominó en los niveles posteriores. Para considerar las interacciones complejas entre los equipos adyacentes se poblaron las tablas de probabilidad condicional (CPTs) asignadas a los eventos para analizar los efectos sinérgicos y las probabilidades ruidosas (Khakzad *et al.*, 2012).

En el estudio se analizaron desde un enfoque cuantitativo en el que las redes Bayesianas aprovechan las CPTs robustas para modelar diferentes tipos de relaciones causales entre eventos. Se emplean CPTs para tener en cuenta el efecto sinérgico de los eventos contribuyentes, agregando vectores de escalado similares o usando probabilidades ruidosas en el caso de diferentes vectores de escalado (Khakzad *et al.*, 2012).

Khakzad (2015) realizó un estudio que tuvo como objetivo examinar la aplicabilidad de las redes Bayesianas dinámicas en el modelado de verosimilitud y el análisis de riesgo del efecto dominó en plantas químicas, para el desarrollo de la investigación utiliza como ayuda la capacidad de evitar el problema de la explosión del espacio de estados de los modelos Markov.

En el estudio realizado por Khakzad (2015) hizo referencia a los efectos sinérgicos como: “La colaboración de accidentes primarios y secundarios concurrentes para desencadenar otro accidente en una unidad terciaria y así sucesivamente, haciendo que continúe un efecto dominó ya iniciado” (p. 3).

La autora plantea en su investigación que los factores como: el tipo e intensidad de los vectores de escalado emitidos por cada tanque, los efectos sinérgicos, tipo y cantidad de sustancias químicas involucradas, y especialmente la secuencia temporal de accidentes en un efecto dominó debe tenerse en cuenta (Khakzad, 2015).

La metodología utilizada en el estudio de Khakzad (2015) plantea explícitamente las dependencias del tiempo para reconocer la secuencia más probable de accidentes, reflejando las características del efecto dominó aún mejor que la combinación más probable de accidentes que ofrece las redes Bayesianas ordinarias. Se toma en consideración el tiempo en que hay un fallo y el tiempo hasta que ocurre el agotamiento de las unidades involucradas, también plantea que “la superposición de los vectores de escalado de accidentes no concurrentes a través del efecto sinérgico puede obstaculizarse efectivamente, lo que a su vez evita la sobreestimación de la probabilidad del efecto dominó” (p. 18).

Ding *et al.* (2019) plantearon un nuevo enfoque basado en la superposición, el modelo de efecto sinérgico de incendio (FSEM, por sus siglas en inglés) para modelar la contribución de los efectos sinérgicos del incendio para el efecto dominó en plantas químicas y desarrollaron la solución numérica de dicho enfoque. La modelación del efecto sinérgico se realiza dinámicamente a través de la temperatura de la pared de la unidad objetivo variable en el tiempo y el flujo térmico recibido; se ofrece un criterio de falla y se modela la dosis térmica que se recibe, y la falla de la unidad objetivo se modela superponiendo el flujo térmico recibido de las unidades de combustión. Evalúan mediante el tiempo de falla y la probabilidad de escalado de la unidad objetivo la contribución que tienen los efectos sinérgicos del incendio para el efecto dominó.

Los autores desarrollaron una solución numérica para determinar el tiempo de falla y la probabilidad de escalado y para cuantificar la influencia de los efectos sinérgicos en los parámetros antes mencionados. El FSEM también puede ser utilizado para comprender la evolución de los efectos sinérgicos temporales cuando ocurren accidentes de orden superior (Ding *et al.*, 2019).

En el estudio los autores plantearon un nuevo enfoque novedoso basado en FSEM para estudiar la evolución espacio-temporal de efectos dominó y analizar el riesgo asociado en plantas químicas; dicho enfoque tiene en cuenta incendios, evidencia del accidente, el efecto sinérgico de las unidades en llamas y la acumulación de

energía térmica durante el accidente para modelar el proceso de propagación de accidentes (Ding *et al.*, 2020a).

**Tabla 1.2: Herramientas utilizadas para la determinación de efecto sinérgico sobre las personas de accidentes tóxicos, de incendios y explosiones**

<b>Autor(s)</b>	<b>Revista</b>	<b>Estudio de:</b>	<b>Técnicas utilizadas</b>	<b>Principales Aportes</b>
He y Weng (2019)	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	Efectos sinérgicos en la evaluación de desastres con acoplamientos de peligros múltiples: incendios, explosiones, y fugas de sustancias tóxicas	Simulación de Monte Carlo basada en el análisis de consecuencias y modelos de proceso de difusión para explicar cuantitativamente los efectos sinérgicos.	Este método elimina la incertidumbre introducida por factores subjetivos al considerar todos los escenarios creíbles.
He y Weng (2020)	<i>Process Safety and Environmental Protection</i>	Un método dinámico y basado en simulación para la evaluación cuantitativa del riesgo de accidentes de dominó en la industria química	Método QRA basado en teoría de campo y MCS.	Las distribuciones dinámicas del riesgo individual se presentan de forma intuitiva. Los efectos sinérgicos de los efectos físicos no lineales y la vulnerabilidad humana se consideran con la utilización de este método.
Khakzad, Khan, Amyotte y Cozzani (2012)	<i>Risk Analysis</i>	Análisis del efecto dominó mediante redes Bayesianas	Redes Bayesianas.	Analizan los efectos dominó a través de un marco probabilístico, considerando efectos sinérgicos,

				probabilidades ruidosas y fallas de causa común.
Khakzad (2015)	<i>Reliability Engineering and System Safety</i>	Aplicación de la red Bayesiana dinámica al análisis de riesgos de efectos dominó en infraestructuras químicas	Redes Bayesianas dinámica y el modelo Markov	Modelan el escalado espacial y temporal de los efectos dominó teniendo en cuenta los efectos sinérgicos de los accidentes.
Ding, Khan, Abbassi y Ji (2019)	<i>Reliability Engineering and System Safety</i>	FSEM: un enfoque para la contribución del modelo del efecto sinérgico del incendio para el efecto dominó	Un nuevo enfoque basado en la superposición, FSEM	Un modelo basado en la superposición para la contribución de los efectos sinérgicos del incendio para el efecto dominó.
Ding, Khan y Ji (2020a)	<i>Reliability Engineering and System Safety</i>	Un nuevo enfoque para el modelado de efectos dominó y el análisis de riesgos basado en el efecto sinérgico y la evidencia de accidentes	Un enfoque novedoso basado en FSEM	Modelo para la evolución espacio temporal y un análisis de riesgo de los efectos dominó inducidos por incendios basado en el efecto sinérgico y la evidencia de accidentes.

A criterio de la autora de este trabajo, para la determinación de los efectos sinérgicos es importante tener en cuenta la tasa de mortalidad, la vulnerabilidad humana, la secuencia en que ocurren los accidentes, los efectos físicos, el vector de escalado y la probabilidad de escalado de los accidentes. Las redes Bayesianas son de gran importancia para la investigación, son utilizadas por los autores para verificar la eficacia de los métodos planteados y también para la cuantificación del

efecto sinérgico de accidentes, expresado como efecto conjunto producto de accidentes. Hay necesidad de investigar aún más sobre los efectos sinérgicos causados por incendios, explosiones y accidentes tóxicos sobre las personas debido a que existe una escasa fuente de información sobre efecto sinérgico y su determinación.

#### **1.4 Conclusiones Parciales**

1. El efecto sinérgico es la combinación de la interacción de incidentes individuales con un efecto mayor al de cada incidente por separado.
2. El efecto sinérgico de accidentes se puede clasificar en aditivo y potenciador, hay tres tipos principales: activación, amplificación de la gravedad y demora en la intervención.
3. Entre los escenarios que se pueden desarrollar en el almacenamiento y procesamiento de hidrocarburos los que pueden ocurrir con mayor frecuencia son: el incendio de charco, explosión de nube de vapor (VCE) y la dispersión tóxica; siendo devastadoras sus consecuencias.
4. La combinación de técnicas de inteligencia artificial como redes Bayesianas ordinarias y dinámicas y los métodos de análisis de riesgo, es un paso importante para la determinación de efectos sinérgicos, aunque se ha evidenciado que hay escasos estudios en este campo.

## Capítulo 2: Materiales y métodos

En este capítulo se desarrolla una metodología, con una secuencia lógica que consta de siete etapas, para cuantificar el efecto sinérgico sobre las personas de accidentes tóxicos, de incendio y explosión. Se realiza la caracterización del proceso tecnológico que se desarrolla en el área seleccionada y luego la selección de las unidades de procesos a analizar, se realiza la simulación de los posibles escenarios en el *software* ALOHA y la cuantificación de los efectos de dichos escenarios sobre las personas mediante las ecuaciones de Lees (2012) para determinar la vulnerabilidad sobre las personas, también analizan las ecuaciones Probit y se desarrollan los árboles de eventos. Se analizan las metodologías para desarrollar las redes Bayesianas ordinarias y dinámicas; también se analiza el criterio de expertos a través de la lógica difusa. A partir de lo expuesto anteriormente, se establece una secuencia de pasos para cumplir el objetivo de la investigación. La metodología para desarrollar consta de siete etapas, que se mencionan a continuación:

- Etapa 1: Selección de la Unidad de Proceso.
- Etapa 2: Simulación de escenarios tóxicos, de incendio y explosión.
- Etapa 3: Cuantificar los efectos sobre las personas debido a toxicidad, radiación térmica y sobrepresión.
- Etapa 4: Valorar la evolución en el tiempo y afectación por cada vector de forma individual.
- Etapa 5: Desarrollo de la red Bayesiana dinámica para cuantificar la probabilidad asociada a estos eventos.
- Etapa 6: Uso del criterio de expertos a partir de la lógica *Fuzzy* para determinar el efecto combinado de estos eventos.
- Etapa 7: Cuantificación del efecto sinérgico de accidentes tóxicos, de incendio y explosión.

Cada resultado de las etapas antes mencionadas se analiza y verifica con los resultados obtenidos en otras investigaciones realizadas por expertos y con los criterios expuestos en el capítulo anterior.

En la figura 2.1 se muestra un esquema de la metodología basado en la secuencia lógica.

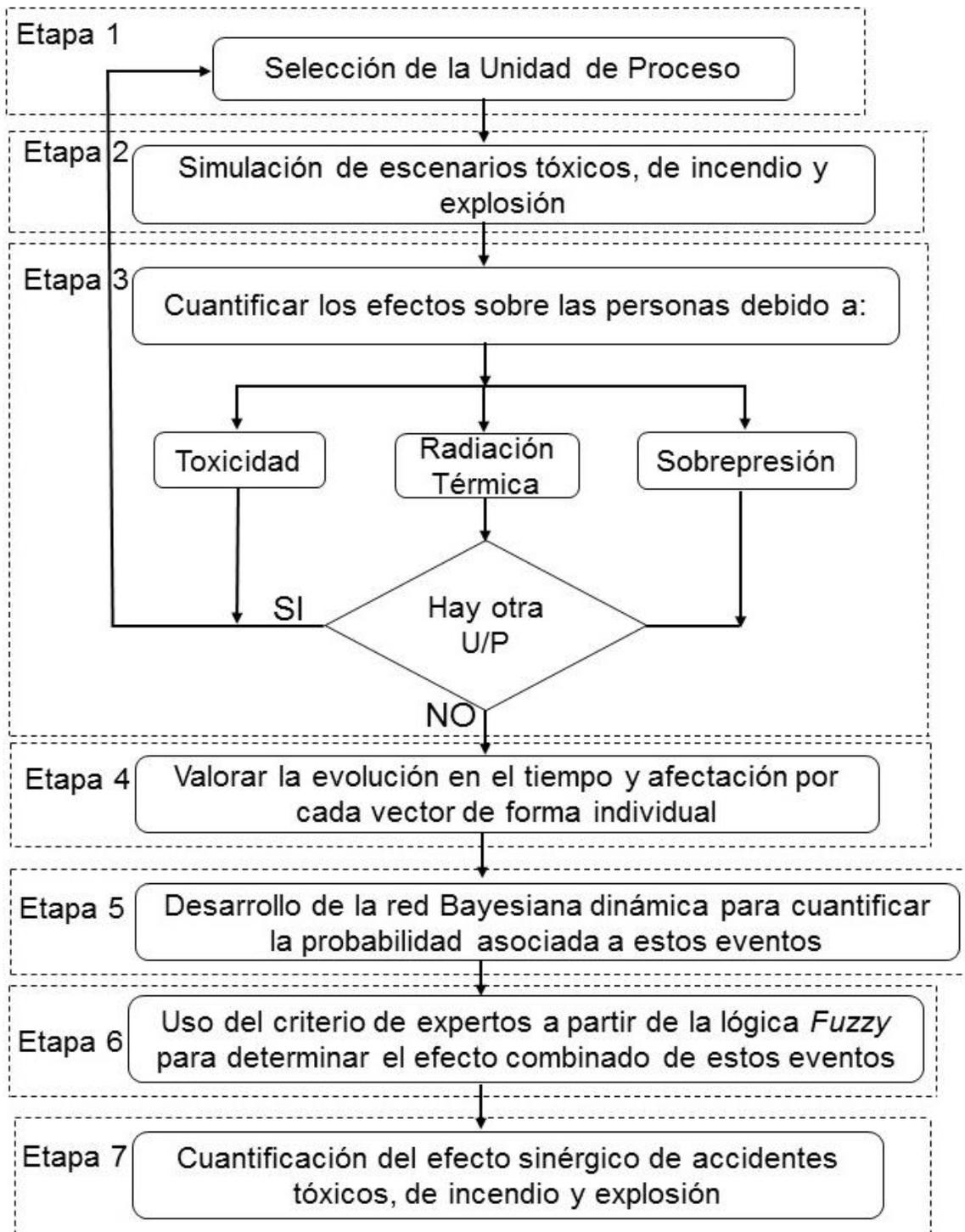


Figura 2.1: Esquema de la metodología basado en la secuencia lógica

## **2.1 Etapa 1: Selección de la Unidad de Proceso**

En el presente epígrafe se proporciona una breve descripción del proceso que se lleva a cabo en el área estudiada y una caracterización de los tanques involucrados en dicho proceso; con el objetivo de conocer las unidades de procesos de interés para la investigación.

La T-320 es un área diseñada para el almacenamiento y entrega de productos claros y oscuros, se distribuyen a través: de camiones cisternas, de tanques cisternas a buques en los muelles, de oleoductos para a la CTE José Martí y las operaciones de carga de productos se realizan a través del transporte ferrocarril. Para garantizar la disponibilidad de los diferentes combustibles se ejecutan operaciones de preparación de mezclas y trasiegos entre los tanques. La terminal cuenta con un área de tanques de almacenamiento para los diferentes productos.

En el anexo 2 se muestra la enumeración de estos tanques, características de los mismos y el producto que contienen; también se muestran las mismas características para dos tanques (30 y 38) del área Base de Crudo y Suministro por la cercanía que tienen con el área analizada, pudiendo así, ser gravemente afectados por los posibles escenarios que se pueden desarrollar (DTCCM, 2021).

## **2.2 Etapa 2: Simulación de escenarios tóxicos, de incendio y explosión**

En este epígrafe se describe el proceso de simulación de los posibles escenarios a desarrollarse y una caracterización del *software* utilizado; con el objetivo de cuantificar el alcance de los escenarios.

Para la simulación de los posibles escenarios se emplea el *software* ALOHA (2016) (Ubicaciones Zonales de Atmósferas Peligrosas), que ha sido reconocido por el Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente de Cuba (CITMA) como el simulador más adecuado para expresar el comportamiento de accidentes tóxicos, de incendio y explosión, *software* de gran prestigio internacional, muy utilizado y recomendado para la evaluación de consecuencias en el proceso de análisis de riesgos (Orozco *et al.*, 2019).

### **2.2.1 Simulación de los posibles escenarios tóxicos, de incendio y explosión**

Como primer paso para la simulación es vital introducir datos como: ubicación geográfica de las unidades de procesos, seleccionar el producto químico liberado, condiciones climatológicas, características de dichas unidades y la forma de descarga del producto.

Luego de introducir todos estos datos el simulador muestra resultados gráficos del alcance del accidente en un tiempo determinado, dichos resultados dependen de la forma en que se desarrollen estos accidentes, que puede ser de la forma siguiente:

- El compuesto químico vertido se dispersa y se forma una nube tóxica y no arde.
- El compuesto químico está ardiendo debido a alguna chispa ocurrida durante el accidente, y se forma un charco de fuego o un chorro de fuego.
- BLEVE, una explosión que formará una bola de fuego, mientras el producto restante se acumula en un charco que arde.

ALOHA simula un escenario de BLEVE asumiendo que la totalidad o parte del compuesto químico liberado forma una bola de fuego y la cantidad restante se acumula en un charco que está ardiendo, esta información se debe introducir o permitir que el programa haga su estimación.

### **2.2.2 Características y particularidades del software ALOHA**

ALOHA fue desarrollado conjuntamente por las agencias norteamericanas NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) y EPA (*Environmental Protection Agency*), y es capaz de resolver problemas de manera rápida, presentando resultados gráficos; de tal forma que es utilizado para dar respuestas en situaciones de emergencias, planificación e investigación de accidentes (Márquez, 2016).

El programa para la realización de sus cálculos emplea dos modelos de dispersión: para gases ligeros que ascienden rápidamente (Modelo Gaussiano), y para gases densos que se dispersan a ras de suelo (Modelo Degadis). También permite estimar el movimiento y concentración de atmósferas de gases peligrosos, obtener los

valores de sobrepresión de una nube de vapor explosiva o el área de inflamabilidad de una nube de vapor inflamable o las radiaciones térmicas que emite un charco o chorro de fuego, situaciones que se originan a partir de la liberación o fuga de sustancias con características toxicológicas o que tienden a producir incendios y explosiones (Jones *et al.*, 2013; Meteogalicia, 2011; Mohammad Al-Sarawi, 2017).

El *software* contiene una biblioteca química con información sobre las propiedades físicas de unos 1000 productos químicos peligrosos, también posee una base de datos de propiedades químicas *online* y una herramienta que predice las reacciones que podrían ocurrir si varios compuestos se mezclasen.

ALOHA muestra gráficamente zonas de amenazas, que contienen una o más áreas de peligros por toxicidad, inflamabilidad, radiación térmica y sobrepresión, que pudieran exceder el nivel de preocupación (LOC); el cual se define como el valor umbral a partir del cual se considera que los seres vivos y bienes materiales dentro de dicha zona se encuentren en peligro. Estas zonas de amenaza son desplegadas en tres colores: el rojo representa el área de mayor peligro mientras que el naranja y amarillo las de menor peligro.

Para la radiación térmica se establecen tres valores de LOC:

- Rojo: 10 kW/m<sup>2</sup>: potencialmente letal en el intervalo de 60 segundos.
- Naranja: 5 kW/m<sup>2</sup>: quemaduras de segundo grado en el intervalo de 60 segundos.
- Amarillo: 2 kW/m<sup>2</sup>: dolor en 60 segundos.

Para los escenarios de explosión también se sugieren tres valores de sobrepresión por defecto:

- Rojo: 8,0 psi (55 158,06 Pa): destrucción de edificios.
- Naranja: 3,5 psi (24 131,65 Pa): probables lesiones graves.
- Amarillo: 1,0 psi (6 894,75 Pa): rotura de cristales.

Se pueden emplear diferentes niveles de preocupación para las descargas accidentales de compuestos tóxicos cuando no es inflamable, entre ellos están: AEGLs (*Acute Exposure Guideline Levels*) que representan el umbral límite de

exposición para la población en general, expresada en ppm o mg/m<sup>3</sup>, están definidos para tres niveles de daño (AEGL-1, AEGL-2 y AEGL-3), y cada uno se caracteriza por un grado distinto de toxicidad:

- AEGL-1: representa la concentración de una sustancia química en el aire por encima de la cual se predice que la población, incluyendo individuos susceptibles pueden experimentar molestias notables, irritación o ciertos efectos sintomáticos; efectos que son transitorios, no producen incapacidad en las personas y son reversibles una vez que cesa el periodo de exposición.
- AEGL-2 es la concentración de una sustancia química en el aire por encima de la cual se predice que la población, incluyendo los individuos susceptibles pueden experimentar efectos duraderos serios o irreversibles o ver impedida su capacidad para escapar.
- AEGL-3: representa la concentración de una sustancia química en el aire por encima de la cual se predice que la población en general, incluyendo individuos susceptibles pueden experimentar efectos amenazantes para la vida o incluso provocar la muerte.

ERPGs (*Emergency Response Planning Guidelines*) que también representan un umbral límite de exposición para la población general, y de igual forma está definido para tres niveles de daño (ERPG-1, ERPG-2 y ERPG-3) en el que cada uno expresa valores de concentración de una sustancia química en el aire por encima de la cual se predice que la población, incluyendo individuos susceptibles, podrían experimentar; TEELs (*Temporary Emergency Exposure Limits*) son niveles de preocupación temporales similares a los ERPG, y se utilizan cuando estos no están disponibles para el compuesto químico liberado, pero se diferencian en el tiempo de duración de la exposición, también consta con tres niveles de daño (TEEL-1, TEEL-2 y TEEL-3); IDLH (*Inmediately Dangerous to Life or Health*) que se define como la concentración en la atmósfera de cualquier sustancia tóxica, corrosiva o asfixiante que suponga un riesgo inmediato para la vida, que pueda causar efectos adversos irreversibles o interfiera con la capacidad de cada individuo para escapar de un ambiente peligroso (Meteogalicia, 2011).

El simulador presenta algunas restricciones para su trabajo, entre las que se encuentran:

- Velocidades del viento muy bajas.
- Condiciones atmosféricas muy estables.
- Irregularidades de la concentración del compuesto químico particularmente cerca de la fuente.
- Cambios de viento y efectos de conducción del terreno.

### 2.3 Etapa 3: Cuantificación de los efectos sobre las personas debido a toxicidad, radiación térmica y sobrepresión

En el presente epígrafe se describe como se realiza la cuantificación de los efectos productos de la toxicidad, radiación térmica y sobrepresión sobre las personas.

Para cuantificar los efectos sobre las personas se necesita calcular previamente el riesgo individual que genera cada efecto dominó, el cual se calcula mediante la ecuación 2.1.

$$R_{i,de}^{(k,m)} = f_{de}^{(k,m)} \cdot V_{de}^{(k,m)} \quad (2.1)$$

Donde:

$R_{i,de}^{(k,m)}$  : Riesgo individual.

$f_{de}^{(k,m)}$  : Probabilidad de efecto dominó.

$V_{de}^{(k,m)}$  : Vulnerabilidad debido al efecto dominó.

También se necesita calcular la vulnerabilidad debido al efecto dominó, que no es más que la suma de las probabilidades de muerte de todos los escenarios que se desarrollan en la secuencia dominó, con límite inferior 1.

$$V_d^{(k,m)} = \min \left[ \left( V_p + \sum_{i=1}^n \delta(i, J_m^k) \cdot V_{d,i} \right), 1 \right] \quad (2.2)$$

En la tabla 2.1 se muestran las ecuaciones para determinar la vulnerabilidad de las personas.

**Tabla 2.1: Ecuaciones para determinar la vulnerabilidad de las personas**

Efectos	Ecuaciones	Número de ecuación
Radiación	$Y = -10,7 - 1,99 \cdot \ln(I^{4/3} \cdot t)$	2.3
Sobrepresión	$Y = 5,3 + 1,37 \cdot \ln(P)$	2.4
Concentración	$Y = -9,82 + 0,71 \cdot \ln(C^2) \cdot t$	2.5

*I* : Radiación (kW/m<sup>2</sup>); *t* tiempo de exposición (s) (Ec: 2.3); *P* : Sobrepresión (bar);  
*C* : Concentración (ppm); *t* tiempo de exposición (min)

Para la determinación de la vulnerabilidad de las personas producto de los efectos por radiación y sobrepresión (incluido la rotura de tímpanos) se emplean las ecuaciones descritas por Lees (2012) y para la concentración de sustancias tóxicas se emplea la ecuación descrita por Lees (1996).

#### **2.4 Etapa 4: Valorar la evolución en el tiempo y afectación por cada vector de forma individual**

En este epígrafe se explica la metodología para la valoración en el tiempo que está directamente vinculada al efecto dominó de los posibles accidentes que pueden ocurrir.

Luego de simular los escenarios en ALOHA y obtener las zonas de riesgo, se procede a obtener los valores de radiación térmica y sobrepresión, los cuales permiten calcular los valores Probit, valores que se introducen en el programa *Matlab* para obtener la probabilidad. Estos valores Probit se obtienen a partir de las ecuaciones descritas por Mukhim *et al.* (2017) y Reniers y Cozzani (2013).

En la tabla 2.2 se muestran las ecuaciones de Mukhim *et al.* (2017) y Reniers y Cozzani (2013)

**Tabla 2.2: Ecuaciones de Mukhim *et al.* (2017) y Reniers y Cozzani (2013)**

Autores	Escenario	Modelo de probabilidad	Número de ecuación
Reniers y Cozzani (2013)	Pool Fire BLEVE	$\ln(ttf) = -1,13 \ln(I) - 2,667 \cdot 10^{-5}V + 9,887$ $Y = 9,25 - 1,847 \ln(ttf/60)$	2.6 2.7
	VCE	$Y = -18,96 + 2,44 \ln(Ps)$	2.8
Mukhim <i>et al.</i> (2017)	VCE	$Y = -15,79 + 2,02 \ln(\Delta P)$	2.9
$t_{tf}$ : tiempo de falla (s); $I$ : intensidad de la radiación (kW/m <sup>2</sup> ); $V$ : volumen de la unidad secundaria (m <sup>3</sup> ); $P_s$ : pico de sobrepresión (Pa); $\Delta P$ : pico de sobrepresión (Pa)			

Para la realización de estos cálculos se necesita saber previamente si el equipo analizado trabaja en condiciones atmosféricas o presurizado (Mukhim *et al.*, 2017; Reniers y Cozzani, 2013) (en el caso analizado en la investigación se trabaja en condiciones atmosféricas), y cuál sería el escenario que puede desarrollarse, también es necesario calcular el tiempo de falla para el incendio y el BLEVE, variable que depende del volumen del recipiente, de las radiaciones y sobrepresión emitidas por cada escenario según corresponda, la evolución en el tiempo está directamente vinculada al efecto dominó de los posibles accidentes que pueden ocurrir.

#### 2.4.1 Determinación de la frecuencia inicial de los accidentes

Es de vital importancia incluir en la metodología un análisis histórico de accidentes con el objetivo de determinar la frecuencia con la que ocurren estos accidentes en el área seleccionada.

El análisis histórico es un antecedente que permite la elaboración de los árboles de eventos que a su vez permite conocer la secuencia de ocurrencia más probable, la probabilidad de que sucedan y la frecuencia con la que previamente han ocurrido

estos accidentes (Gómez, 2009). A continuación, se plantean las etapas para construir el árbol de eventos para la cuantificación de la frecuencia inicial de cada escenario (BEVI, 2009).

1. Identificación del evento inicial: Evento de falla que corresponde a menudo al vertido de un material peligroso.
2. Identificación del desarrollo del accidente: Se considera el control sobre la situación y la posible mitigación.
3. Construcción del árbol de eventos: A cada nodo de falla, los eventos alternativos que afectan materialmente el escenario:
  - Construir el árbol de eventos de izquierda a derecha.
  - A cada nodo de falla, se muestran los eventos alternativos que materialmente afecten el escenario.
  - El evento que se sitúa en la rama superior es el afirmativo.
4. Clasificación del escenario del incidente: Desarrollar el árbol de eventos hasta conocer el escenario objetivo de análisis. El final del árbol de eventos debería ser hasta llegar a un accidente mayor.
5. Estimación de la probabilidad de cada rama en el árbol: A cada rama le corresponde una probabilidad condicional que suma 1.
6. Cuantificación de la probabilidad de los escenarios y revisión de su exactitud: Para determinar la frecuencia de cada escenario se multiplica la frecuencia del evento inicial por las probabilidades condicionales de cada rama hasta llegar al escenario.

El árbol de eventos también sirve para analizar la funcionalidad y la falla de subsistemas de seguridad, con una lógica consecuente desde el suceso inicial, que resulta en una estructura en forma de árbol con sus ramas de izquierda a derecha. Luego de asignarle la probabilidad a cada rama, ya se puede determinar luego de ocurrir el evento inicial la probabilidad de cada escenario posible.

## 2.4.2 Cuantificación de la probabilidad de ignición

En este epígrafe se plantea la metodología para la cuantificación de la probabilidad de ignición y su estimación, es un paso importante en el análisis de riesgo cuantitativo (QRA) que se emplea para analizar instalaciones donde hay líquidos y gases inflamables que son almacenados o transportados.

Cuando se habla de probabilidad de ignición se hace referencia a la probabilidad que existe de que se incendie un material inflamable cuando ocurre un derrame o fuga.

Esta probabilidad de ignición se calcula multiplicando la máxima de las probabilidades por el factor de control (Changlong *et al.*, 2012).

$$P_{IP} = \text{máximo}(P_{MP}, P_Q, P_{IS}) \cdot K_{IC} \quad (2.10)$$

Leyenda:

$P_{IP}$  : Probabilidad de ignición.

$P_{MP}$  : Probabilidad de ignición debido al material derramado.

$P_Q$  : Probabilidad de ignición debido al flujo.

$P_{IS}$  : Probabilidad de ignición en función de la fuente y características de los alrededores.

$K_{IC}$  : Factor decidido por los controles de ignición.

Todas las probabilidades de ignición que componen la ecuación 2.10 son determinadas de diferentes formas como se muestra a continuación:

Debido a la sustancia derramada: se determina categorizando las sustancias inflamables por las categorías que ofrece BEVI (2009).

Debido al flujo: se determina dividiendo el valor en segmentos de intervalos de acuerdo con los flujos máxicos, el logaritmo de dicha probabilidad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\log P_{ign} = \log P_{ign.lower} + \frac{(\log Q - \log Q_{lower}) \cdot (\log P_{ign.upper} - \log P_{ign.lower})}{\log Q_{upper} - \log Q_{lower}} \quad (2.11)$$

Leyenda:

$P_{ign}$  : Probabilidad de ignición en función del flujo.

$P_{ign,lower}$  : Probabilidad de ignición correspondiente al flujo inferior (0,001).

$P_{ign,upper}$  : Probabilidad de ignición correspondiente al flujo superior (0,13).

$Q$  : Flujo másico real de operación (kg/s) el cual depende del bombeo.

$Q_{lower}$  : Flujo másico inferior (0,1 kg/s).

$Q_{upper}$  : Flujo másico superior (109,99 kg/s).

En función de la fuente y características de los alrededores: se determina por la ecuación 2.12

$$P_{IS} = 1 - (1 - s^2) \cdot e^{-(0,015 \cdot s)t} \quad (2.12)$$

Leyenda:

$s$ : Probabilidad de ignición según la fuente en un minuto.

$t$  : Tiempo que dura el derrame en minutos.

Se toma el valor de 0,8 para un fallo eléctrico y para un incendio se toma el valor de 1.

El factor decidido por los controles de ignición (parámetro de modificación): se determina por clasificación de algunos controles; se propone un factor de 0,25 para un control típicamente bueno en el área.

## **2.5 Etapa 5: Desarrollo de la red Bayesiana dinámica para cuantificar la probabilidad asociada a estos eventos**

En este epígrafe se plantea la metodología para el desarrollo de las redes Bayesianas de probabilidades, se dan a conocer las características del *software* Hugin; se da una explicación de cómo se cuantifican las probabilidades una vez construidas las redes Bayesianas; también se explica en qué consisten las redes Bayesianas dinámicas y cómo se emplean en el modelado de efecto dominó.

### **2.5.1 Metodología para la elaboración de las redes Bayesianas de probabilidades**

Las redes Bayesianas son representaciones gráficas de cantidades y decisiones inciertas que revelan explícitamente las dependencias probabilísticas entre las variables y flujos de información relacionados (Kabir y Papadopoulos, 2019; Khakzad *et al.*, 2018); puede funcionar con diferentes distribuciones de tiempo, lidiar con incertidumbre y usarse para un razonamiento robusto (Dueñas *et al.*, 2021). Para elaborar las redes Bayesianas de probabilidades se sigue la metodología planteada por Reniers y Cozzani (2013), que se muestra en el anexo 3.

Las redes Bayesianas han demostrado ser una técnica robusta muy útil para modelar efectos dominó debido a su capacidad para considerar incertidumbres, considerar interdependencias e interacciones no lineales y realizar actualizaciones de probabilidad (Khakzad, 2021). Siguiendo los siguientes pasos se puede modelar el patrón de propagación probable de un efecto dominó:

1. Asignar un nodo a cada unidad de proceso de acuerdo con el diseño de la planta de proceso de estudio, estas unidades deben ser susceptibles al accidente o ser capaces de intensificarlo.
2. Determinar la unidad primaria potencial donde sería probable que comenzara el accidente dominó.
3. Evaluar los vectores de escalado dependiendo de los resultados finales que seguirían al escenario primario: radiación, onda expansiva o proyección de fragmentos.
4. Identificar las unidades secundarias potenciales al comparar los vectores de escalado con los valores umbrales. Luego seleccionar los modelos de daño probabilísticos y de ser necesario se deducen los valores Probit. Calcular la probabilidad de escalado de unidades secundarias potenciales dado el evento primario y elegir como unidades secundarias aquellas con valor de probabilidad mayor. Las unidades se relacionan con un arco causal debido a que los eventos secundarios son causados por el evento primario.

5. Especificar los escenarios y probabilidades de ocurrencia de accidentes para las unidades secundarias.
6. Para la determinación de las unidades terciarias se repiten los pasos del 3 al 5 sustituyendo las unidades secundarias por la unidad primaria, considerando los efectos sinérgicos.

### **2.5.2 Características del *software* Hugin**

La simulación de las redes Bayesianas se realiza por medio del *software* Hugin que permite al usuario el uso de funciones del motor de decisión para construir modelos que se pueden usar en variadas aplicaciones (Hugin, 2019). En este epígrafe se da una breve caracterización de este programa.

Los métodos de Hugin fueron programados en un sistema general de desarrollo y tiempo de ejecución, lo que facilita su uso para cualquier persona que desee construir un sistema experto basado en redes Bayesianas (Hugin, 2019).

El *software* tiene tres componentes principales en su entorno de desarrollo: el motor de decisión, una colección de interfaces de programa de aplicación y la interfaz gráfica de usuario (Jensen, 2001; Lauritzen y Nilsson, 2001; Spirtes *et al.*, 2000). El motor de decisión de Hugin (HDE) ejecuta el razonamiento en una base de conocimiento representada como una red Bayesiana o como diagramas de influencia (memoria limitada) (LIMID) y realiza todo el procesamiento de datos y el mantenimiento de almacenamiento asociado con el proceso de razonamiento. La Interfaz de Programas de Aplicación (API) permite crear aplicaciones basadas en el conocimiento, utilizando el poder del motor de decisión para razonar. La interfaz gráfica de usuario puede funcionar de dos modos diferentes: modo de edición en el que los nodos se pueden crear y vincular, los estados y las acciones se pueden especificar y las tablas de probabilidad condicional y las de utilidad se pueden ingresar mediante una interfaz controlada por ventanas, menús y ratones; y modo de ejecución donde se pueden mostrar las creencias y utilidades para nodos individuales; además permite construir modelos de dominio basados en la tecnología de red Bayesiana, específicamente se emplea una interfaz construida

sobre la API de Java provista con el paquete de desarrollador de Hugin (Jensen, 2001; Lauritzen & Nilsson, 2001; Spirtes *et al.*, 2000).

Hugin puede representar dos tipos de variables aleatorias: nodos aleatorios discretos que tienen un espacio de estado finito discreto y nodos aleatorios continuos que tienen un espacio de estado infinito continuo (Spirtes *et al.*, 2000).

La inferencia de Hugin es esencialmente una aplicación inteligente del Teorema de Bayes (Lauritzen y Nilsson, 2001) por eso es seleccionado como el *software* más adecuado para la simulación de las redes Bayesianas.

### **2.5.3 Cuantificación de probabilidades a partir de las redes Bayesianas**

En este epígrafe se plantea la metodología a seguir para cuantificar las probabilidades en las diferentes unidades luego de estar construidas las redes Bayesianas.

Una vez desarrolladas las redes Bayesianas se procede a determinar la probabilidad conjunta del efecto dominó para cada unidad de proceso primaria y la probabilidad de ocurrencia del efecto dominó para cada nivel de propagación. Para la determinación de estas probabilidades se introduce en la red los nodos auxiliares  $L_i$  (la probabilidad de propagación del accidente primario a las posibles iésimas unidades) y el nodo  $P(DL_i)$  (la probabilidad del efecto dominó del nivel iésimo). Las tablas de probabilidad son la vía para introducir los nodos auxiliares (anexo 4).

Para la elaboración de la tabla de probabilidad del nodo auxiliar  $L_i$  se debe tener en cuenta que para considerar el efecto dominó es necesario que exista una unidad secundaria, no importa cuál sea. La tabla de probabilidad del nodo auxiliar  $DL_i$  se construyen a partir del criterio de ocurrencia de un accidente en una unidad primaria ( $X_1$ ) y en alguna otra unidad (secundaria).

$$P_{DE} = \sum_{i=1}^n DL_i \quad (2.13)$$

Para el cálculo de la probabilidad conjunta del efecto dominó hasta el último nivel de escalado se emplea la ecuación 2.13.

#### 2.5.4 Uso de las redes Bayesianas dinámicas

Las redes Bayesianas ordinarias se pueden extender a redes Bayesianas dinámicas (DBN), que en comparación con las ordinarias estas facilitan el modelado explícito de la evolución temporal de variables aleatorias en una línea de tiempo discretizada, también se puede utilizar para identificar las unidades más críticas que contribuyen a los escenarios de dominó (Khakzad, 2021; Khakzad *et al.*, 2016). Al dividir la línea de tiempo en varios intervalos de tiempo, las redes Bayesianas dinámicas permiten que un nodo en el segmento de tiempo  $i$ -ésimo sea condicionalmente de sus padres y de sí mismo en el segmento de tiempo anterior (Khakzad *et al.*, 2016).

Cuando se modelan las DBN solo se tienen en cuenta dos intervalos de tiempo, esto implica que la distribución de la probabilidad conjunta de un grupo de variables aleatorias en el tiempo  $t + \Delta t$  se pueda expandir a  $P(U^{t+\Delta t})$  como se muestra en la ecuación 2.14

$$P(U^{t+\Delta t}) = P(X_1^{t+\Delta t}, X_2^{t+\Delta t}, \dots, X_n^{t+\Delta t}) = \prod_{i=1}^n P(X_i^{t+\Delta t} | X_i^t, pa(X_i^t), pa(X_i^{t+\Delta t})) \quad (2.14)$$

Leyenda:

$X_1^{t+\Delta t}$  y  $X_i^t$ : Copias de  $X_i$  en dos porciones de tiempo consecutivas con un intervalo de tiempo de  $\Delta t$ .

$pa(X_i^{t+\Delta t})$ : Padres de  $X_i$  en el intervalo de tiempo  $t + \Delta t$ .

$pa(X_i^t)$ : Padres de  $X_i$  en el intervalo de tiempo  $t$ .

La red Bayesiana dinámica al replicar una red Bayesiana ordinaria en tres segmentos de tiempo consecutivo presenta dos tipos de arcos: arcos intra-corte que son los arcos dirigidos que conectan los nodos en los mismos cortes de tiempo y los arcos temporales o entre cortes que son los arcos que unen los nodos en cortes de tiempo consecutivos (Khakzad *et al.*, 2016).

En el anexo 5 se muestra una red Bayesiana dinámica en forma abstracta donde los arcos rojos representan la evolución temporal del nodo durante intervalos de tiempo.

### **2.5.5 Modelado del efecto dominó aplicando las redes Bayesianas dinámicas**

Cuando se utilizan las redes Bayesianas ordinarias para la modelación del efecto dominó, estas pueden arrojar resultados contrarios a la intuición (cabe señalar que no siempre pasa esto) producto que la red Bayesiana ordinaria no es capaz de considerar todas las posibles interacciones mutuas entre las unidades involucradas. Para darle solución a este problema se modificaron las redes Bayesianas a través del uso de las DBN, donde el modelo ya es capaz de identificar la secuencia más probable de estos eventos considerando todas las interacciones posibles entre las unidades de procesos (Khakzad, 2021).

Como parte de la metodología planteada por Khakzad (2021) para simular los efectos dominó en plantas de procesos, se enumeran los siguientes pasos para confeccionar las redes Bayesianas dinámicas:

1. Se presentan las unidades de procesos como los nodos de las redes Bayesianas en intervalos de tiempo.
2. Se determina unidad o unidades primarias potenciales donde se podría desencadenar el efecto dominó, considerando la ocurrencia de incendios simultáneos.
3. Se determinan las probabilidades condicionales de los nodos mediante la relación dosis-respuesta (funciones Probit), que determinarían la probabilidad de daño a la que estarían expuestas las unidades con respecto al flujo de calor y la onda de choque.
4. Se eligen las posibles unidades secundarias que estarían implicadas en la cadena de accidentes basados en el criterio de cual tiene la probabilidad de escalada (condicional) más alta, considerando los posibles efectos sinérgicos entre las unidades primarias y secundarias, de igual forma se determinarían las unidades terciarias.
5. Se plantea la posibilidad de propagación de accidentes entre los nodos con arcos, que denotarían la incertidumbre sobre si el fuego se propagaría a una dirección u otra, porque se consideran todas las interacciones posibles entre las unidades de procesos.
6. Se construyen las tablas de probabilidad condicional de los nodos del DBN.

En el primer intervalo de tiempo las probabilidades de los nodos son iguales, excepto el de la unidad o unidades primarias, porque aún no ha transcurrido el tiempo suficiente para tener en cuenta todas las posibles interacciones del fuego, al transcurrir el tiempo estas probabilidades cambian evidenciando el aumento de unas con respecto a otras, mostrando cuales podrían ser las unidades secundarias y cuales terciarias, pudiendo así plantear la secuencia dominó.

## **2.6 Etapa 6: Uso del criterio de expertos a partir de la lógica *Fuzzy* para determinar el efecto combinado de estos eventos**

En el presente epígrafe se plantea la metodología para el uso del criterio de expertos en la investigación a partir de la lógica difusa, se emplean los términos: criterio de expertos, posibilidad difusa, defuzzificación y probabilidad difusa, y la vía para obtener cada término; con el objetivo de poder emplearlos en la determinación del efecto combinado de los eventos estudiados.

Específicamente el criterio de expertos es una metodología de consenso científico, esta metodología es una respuesta de cómo hacer frente a la incertidumbre y a la falta de datos suficientes y brinda información útil para la evaluación de riesgos (Zarei *et al.*, 2018).

Se plantea el término de variable lingüística, que no es más que una variable cuyos valores son palabras u oraciones en lenguaje natural o artificial; además se han desarrollado ocho escalas de conversión diferentes. Para el desarrollo de este estudio se selecciona la Escala 7, que incluye 9 (para la estimación de la probabilidad de ocurrencia de un evento) y 5 (para estimar la gravedad de un evento) términos lingüísticos con forma de números difusos trapezoidales. Se selecciona la Escala 7 debido a que la capacidad de los humanos es siete más menos dos partes, lo que supone que el número adecuado a comparaciones que los humanos pueden juzgar a la vez debe estar entre 5 y 9 (Dueñas *et al.*, 2020; Zarei *et al.*, 2018).

En las tablas 2.3 y 2.4 se muestran los términos lingüísticos (Dueñas *et al.*, 2020; Zarei *et al.*, 2018).

**Tabla 2.3: Términos lingüísticos y números difusos para describir la probabilidad de un evento**

Términos lingüísticos	Descripción	Conjuntos difusos (escala 7)
Muy alto (VH)	Una vez en un mes	(0,8; 1; 1; 1)
Alto-Muy Alto (HVH)	Una vez cada 1-3 meses	(0,7; 0,9; 1; 1)
Alto (H)	Una vez cada 3-6 meses	(0,6; 0,8; 0,8; 1)
Bastante alto (FH)	Una vez cada 6-12 meses	(0,5; 0,65; 0,65; 0,8)
Medio (M)	Una vez cada 1- 5 años	(0,3; 0,5; 0,5; 0,7)
Bastante bajo (FL)	Una vez cada 5-10 años	(0,2; 0,35; 0,35; 0,5)
Bajo (L)	Una vez cada 10 -15 años	(0; 0,2; 0,2; 0,4)
Bajo-Muy bajo (LVL)	Una vez cada 15- 20 años	(0; 0; 0,1; 0,3)
Muy bajo (VL)	Durante el ciclo de vida del sistema no se ha producido / observado	(0; 0; 0; 0,2)

**Tabla 2.4: Términos lingüísticos y sus correspondientes números difusos para describir la gravedad de un evento**

Términos lingüísticos	Conjuntos difusos
Muy bajo (VL)	(0; 0; 0; 0,25)
Bajo (L)	(0; 0,25; 0,25; 0,50)
Medio (M)	(0,25; 0,50; 0,50; 0,75)
Alto (H)	(0,50; 0,75; 0,75; 1,0)
Muy alto (VH)	(0,75; 1; 1; 1)

En el anexo 6 se muestra la escala de conversión seleccionada para estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento (Zarei *et al.*, 2018).

El criterio de expertos debe ser llevado a un número difuso llamado posibilidad difusa (Dueñas *et al.*, 2020), se transforma de la expresión lingüística a números difusos y luego se agrega a este número difuso. Se pueden emplear varios métodos

para esto, pero el más recomendable es el grupo de opinión lineal, que se determina mediante la ecuación 2.15.

$$M_i = \sum_{j=1}^m W_j A_{ij}, j = 1, 2 \dots, n \quad (2.15)$$

Leyenda:

$M_i$ : Posibilidad de falla difusa, valor difuso del evento.

$W_j$ : Puntuación de ponderación del experto.

$A_{ij}$ : Valor lingüístico obtenido del experto sobre el evento.

$m$ : Número total de eventos.

$n$ : Número total de expertos.

$i$ : Representa el evento.

$j$ : Representa el experto.

Para el cálculo del factor de ponderación del experto hay que revisar primeramente la tabla 2.5, si un experto es considerado mejor que otros se le da un mejor peso. El factor de ponderación se determina por la ecuación 2.17 y las ponderaciones de los expertos no es más que la estimación de las puntuaciones de ponderación (ecuación 2.16) (Zarei *et al.*, 2018).

$$\text{Puntuación de ponderación del experto } i = PP + ET + EL + A \quad (2.16)$$

Leyenda:

PP: Puntaje del puesto profesional del experto  $i$ .

ET: Puntaje de tiempo de experiencia del experto  $i$ .

EL: Puntaje de nivel educativo del experto  $i$ .

A: Puntaje de edad del experto del experto  $i$ .

$$\text{Factor de ponderación} = \frac{\text{Puntuación de ponderación del experto } i}{\sum_{i=1}^n \text{Puntuación de ponderación del experto } i} \quad (2.17)$$

**Tabla 2.5: Puntaje de ponderación de diferentes expertos**

Constitución	Clasificación	Puntaje	Constitución	Clasificación	Puntaje
Posición profesional	Académico superior	5	Nivel de Educación	Doctor	5
	Académico principiante	4		Máster	4
	Ingeniero	3		Bachiller	3
	Técnico	2		Técnico medio o superior	2
Experiencia	obrero	1	Edad (años)	Nivel escolar	1
Horas/año	≥30	5		≥50	4
	20-29	4		40-49	3
	10-19	3		30-39	2
	6-9	2		≤30	1
	≤5	1			

**Fuente: Zarei et al. (2018)**

Para producir resultados cuantificables en lógica difusa se utiliza el proceso llamado defuzzificación; para representar las variables lingüísticas en este proceso se utilizan las funciones difusas trapezoidales. Se escoge como técnica de defuzzificación: el centro de área (centro de gravedad), que se determina por las siguientes ecuaciones:

$$X^* = \frac{\int \mu_i(x)x dx}{\int \mu_i(x)} \quad (2.18)$$

Leyenda:

$X^*$ : Salida defuzzificada.

$\mu_i(x)$ : Función de membresía agregada.

x: Variable de salida.

La función de membresía se define como:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ \frac{a_4-x}{a_4-a_3}, & a_3 \leq x \leq a_4 \\ 0, & x > a_4 \end{cases} \quad (2.19)$$

Combinando las ecuaciones anteriores se puede calcular  $\tilde{A}$  mediante el método centro de área.

$$X^* = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} x dx + \int_{a_2}^{a_3} x dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4-x}{a_4-a_3} x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4-x}{a_4-a_3} dx} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{(a_4 + a_3)^2 - a_4 a_3 - (a_1 + a_2)^2 + a_1 a_2}{(a_4 + a_3 - a_1 - a_2)} \quad (2.20)$$

Para culminar la conversión de la posibilidad difusa a la probabilidad difusa se utiliza la siguiente función:

$$FPr = \begin{cases} \frac{1}{10^k} & \text{si } FPS \neq 0 \\ 0 & \text{si } FPS = 0 \end{cases} \quad K = \left[ \left( \frac{1-FPS}{FPS} \right) \right]^{\frac{1}{3} * 2.031} \quad (2.21)$$

Leyenda:

K: Valor Constante.

FPS: Posibilidad difusa.

FPr: Probabilidad difusa.

Para calcular la probabilidad de evolución en el tiempo de las unidades de procesos en las redes Bayesianas dinámicas se calculan tres factores:

### 1. TTF-TACC:

TTF: tiempo de falla de la unidad que se analiza respecto a las otras a las que está enlazada en ese tiempo.

TACC: Tiempo de duración del accidente.

### 2. PERAD: Probabilidad de escalado.

### 3. MIT: Acciones de mitigación.

El primer factor se calcula dividiendo el TACC entre el menor tiempo de falla y se obtiene W, si el resultado de W da mayor que 2 el valor de F es 1, si da menor que 2 se calcula por la ecuación 2.22 descrita por Dueñas *et al.* (2020):

$$F = -0,0129 + 0,6718 \cdot W - 1,1487 \cdot W^2 - 2,3351 \cdot W^3 + 9,0746 \cdot W^4 - 8,5519 \cdot W^5 + 3,2134 \cdot W^6 - 0,4239 \cdot W^7 \quad (2.22)$$

Después de obtener el valor de F se aplica la ecuación 2.23:

$$TTF - TACC = F \cdot 100 \quad (2.23)$$

El segundo factor es la mayor probabilidad de escalado que genera la unidad de proceso analizada respecto al resto de las unidades que está enlazada en ese tiempo, ese valor se multiplica por 100 y es el valor del factor PERAD.

El tercer factor se refiere a las acciones de mitigación, y se considera un valor de 50 para todos los casos.

Para cuantificar el efecto sinérgico sobre las personas mediante el criterio de expertos a partir de la lógica difusa se crean tres factores que permiten cuantificar dichos efectos sinérgicos para dos momentos: primero con los valores previos de probabilidad de accidentes resultantes de las redes Bayesianas y luego activando el nodo de unidad primaria en la red como accidente 100%, para de esta forma cuantificar la probabilidad conjunta sin y con accidentes.

Factores para calcular los efectos sinérgicos:

1. DPFIRE: Es el factor de probabilidad de afectación real por incendios.
2. DPEXP: Es el factor de probabilidad de afectación real por explosiones.
3. DPTOX: Es el factor de probabilidad de afectación real por toxicidad.

Para determinar los factores se necesita conocer los siguientes parámetros:

- X: Distancia en metros del origen del accidente.
- DPTR: Probabilidad de daño por las radiaciones térmicas.
- JPF1: Probabilidad conjunta del efecto dominó por incendio (previa).
- JPF2- Probabilidad conjunta del efecto dominó por incendio (si se conoce que hay un accidente real en la unidad primaria).
- DPOV: Probabilidad de daño por la sobrepresión.
- JPE1: Probabilidad conjunta del efecto dominó por explosión (previa).
- JPE2- Probabilidad conjunta del efecto dominó por explosión (si se conoce que hay un accidente real en la unidad primaria).
- DPC: Probabilidad de daño debido a la concentración de la nube tóxica.

Para calcular los tres factores se emplean las ecuaciones siguientes:

Factor 1: DPFIRE

Las ecuaciones 2.24 y 2.25 se aplican para calcular el DPFIRE sin accidente y con accidente, respectivamente.

$$DPFIRE = DPTR \cdot JPF1 \cdot 100 \quad (2.24)$$

$$DPFIRE = DPTR \cdot JPF2 \cdot 100 \quad (2.25)$$

Factor 2: DPEXP

El factor DPEXP se calcula empleando la ecuación 2.26 para antes del accidente y la ecuación 2.27 para el caso de ocurrir el accidente:

$$DPEXP = DPOV \cdot JPE1 \cdot 100 \quad (2.26)$$

$$DPEXP = DPOV \cdot JPE2 \cdot 100 \quad (2.27)$$

Factor 3: DPTOX

$$DPTOX = DPC \cdot 100 \quad (2.28)$$

Este factor cuantifica la probabilidad de daño para dar un criterio de probabilidad de afectación real debido a la toxicidad, y se calcula de igual forma para antes y en caso de ocurrir el accidente.

## **2.7 Etapa 7: Cuantificación del efecto sinérgico de accidentes tóxicos, de incendio y explosión**

En el presente epígrafe se expone la metodología general para llegar al objetivo de la investigación que es la cuantificación del efecto sinérgico de accidentes tóxicos, de incendio y explosión, mediante la combinación de las técnicas artificiales y las ecuaciones presentadas durante todo el capítulo.

A lo largo de la investigación se ha mostrado la metodología a seguir, la simulación de los escenarios permite conocer las unidades de procesos más peligrosas del área estudiada y el alcance que tienen los escenarios analizados. Al realizar la cuantificación de los efectos producidos por los escenarios se obtiene un valor de vulnerabilidad de las personas ante la radiación térmica, la sobrepresión y concentración de sustancias tóxicas. Las ecuaciones Probit brindan como resultado la probabilidad de escalado de los accidentes, el desarrollo del árbol de eventos permite conocer la probabilidad de que suceda cada escenario luego de desarrollarse el evento inicial, otro paso importante es el cálculo de la probabilidad de ignición de las sustancias almacenadas. El desarrollo de las redes Bayesianas y su extensión a las redes Bayesianas dinámicas dan como resultado la cuantificación de la probabilidad conjunta del efecto dominó. Con el criterio de expertos y la combinación de las redes Bayesianas con la lógica difusa se obtiene la cuantificación de los efectos sinérgicos sobre las personas de accidentes tóxicos, de incendio y explosión.

## Capítulo 3: Análisis de Resultados

En presente capítulo se analizan los resultados de la metodología antes expuesta en el capítulo 2, con el fin de lograr el objetivo de la investigación. Primeramente, se analizan los resultados obtenidos con el *software* ALOHA y los resultados de las ecuaciones descritas por Lees (1996, 2012), para determinar las unidades de procesos que representan un mayor riesgo sobre las personas. Mediante el análisis histórico, el árbol de eventos y las probabilidades de escalado de los escenarios se determina la unidad primaria potencial para el desarrollo de las redes Bayesianas ordinarias y dinámicas. La combinación de la probabilidad conjunta del efecto dominó obtenido en las redes con el criterio de expertos a partir de la lógica difusa permite la cuantificación del efecto sinérgico sobre las personas de accidentes tóxicos, de incendio y explosión, que luego son reflejados mediante los mapas de isorriesgos.

### 3.1 Análisis de resultados de la simulación de escenarios y afectación sobre las personas (Etapas 1-3)

En este epígrafe se analizan los resultados que arroja el *software* ALOHA en la simulación de escenarios tóxicos, de incendio y explosión que pueden desarrollarse en la industria; con el objetivo de obtener los valores de vectores de escalado: intensidad de la radiación, sobrepresión y concentración de la nube tóxica, para dichos escenarios.

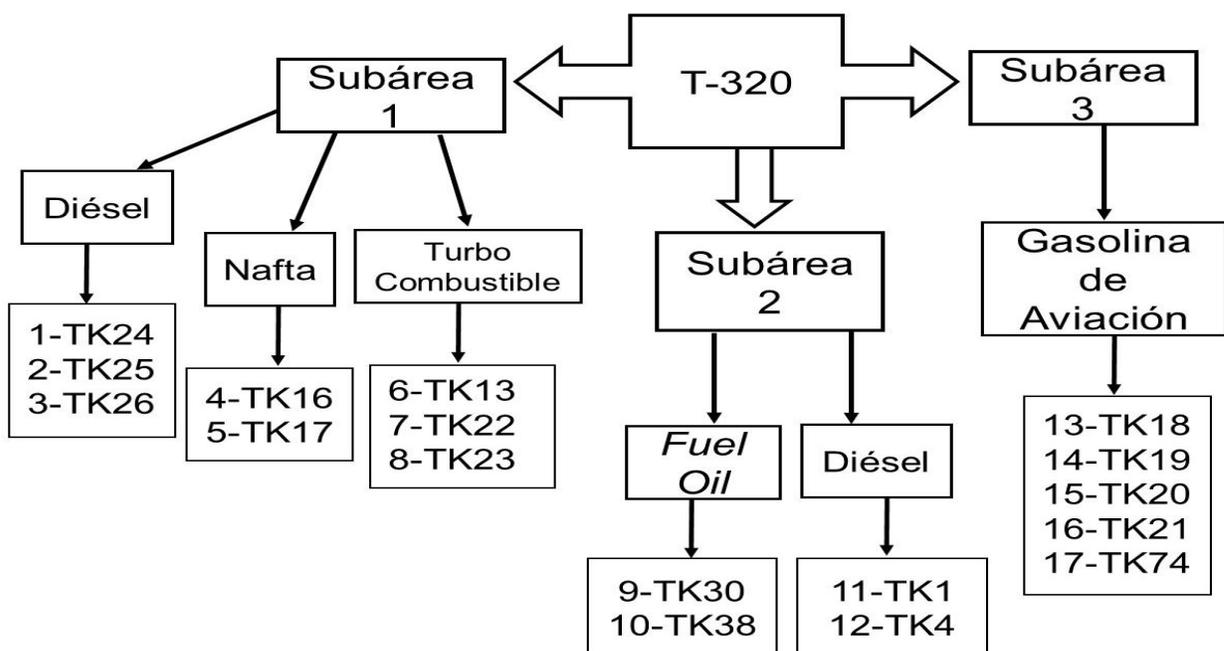
En la figura 3.1 se muestra una imagen satelital del área seleccionada para la investigación.



Figura 3.1: Imagen satelital del área T-320

El área T-320 fue seleccionada para la simulación de los escenarios, de la cual fueron escogidos 15 tanques de interés para la investigación (1, 4, 13, 16,17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 74) y además se escogieron 2 tanques (30 y 38) del área Base de Crudo y Suministro, debido a su cercanía con la T-320; dichos tanques contienen: diésel, nafta, gasolina de aviación, turbo combustible y *fuel oil*.

Para la realización de un mejor estudio y una mayor comprensión de la investigación se divide el área seleccionada en tres subáreas, las cuales se muestran la figura 3.2.



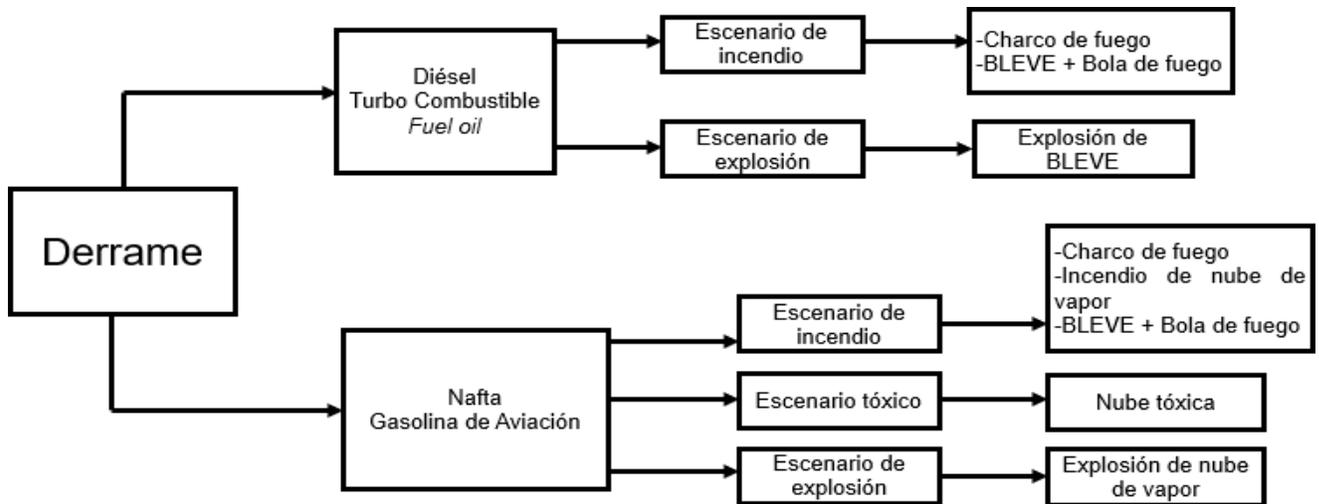
**Figura 3.2: Subáreas de la T-320 en el marco de esta investigación**

El área se divide para un mejor manejo en la investigación, los tanques se distribuyen por cercanía. Se escogen tres tanques (17, 18 y 30) para analizar sus resultados, uno de cada subárea, porque presentan mayor probabilidad de escalado en sus áreas, afectan la mayor cantidad de equipos, sus zonas de preocupación abarcan mayores distancias, contienen sustancias inflamables y explosivas, y en el caso del tanque 30 presenta el mayor diámetro de charco de fuego, estas unidades de procesos son consideradas las más peligrosas en caso de que se desarrollen los escenarios simulados.

Para simular estos escenarios en el *software* ALOHA se tienen en cuenta las siguientes condiciones:

- Trabajar con valores medios de las variables climatológicas.
- Para el escenario del BLEVE realizar una sola corrida por unidad de proceso, ya que este fenómeno depende de la geometría del recipiente y la cantidad de sustancia involucrada, y no de las condiciones climatológicas.
- Para el escenario de *pool fire* realizar cuatro corridas por unidad de proceso, una para cada momento extremo: día a temperatura máxima y mínima y noche (condiciones de calma, 1 m/s de velocidad del viento) a temperatura máxima y mínima.
- Para el escenario de nube de vapor, explosiva o tóxica realizar cuatro corridas (igual que el *pool fire* para los cuatro momentos extremos) por cada dirección del viento.

En la figura 3.3 se muestran los posibles escenarios de accidentes que se pueden desarrollar a partir de un derrame de las sustancias almacenadas en el área, los escenarios son distribuidos en consecuencia con la sustancia más propensas a provocar dichos accidentes. Al ocurrir un derrame y haya una fuente de ignición en el caso del diésel, el turbo combustible y el *fuel oil* se desarrollan los escenarios: charco de fuego y BLEVE más bola de fuego; para la nafta y la gasolina de aviación se desarrollan los escenarios: charco de fuego, BLEVE más bola de fuego, explosión de nube de vapor y en caso de no ocurrir la ignición se forma una nube tóxica, concordando con lo expuesto por Casal *et al.* (2002).

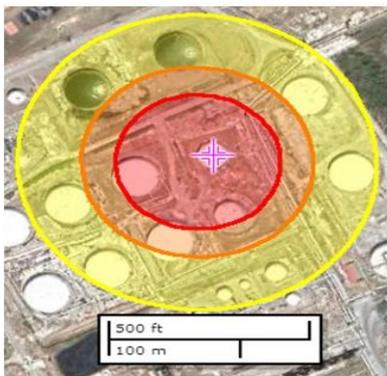


**Figura 3.3: Posibles escenarios de accidentes a partir de un derrame de las sustancias almacenadas.**

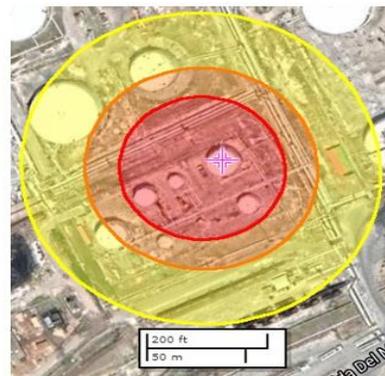
### 3.1.1 Estimación del alcance del escenario charco de fuego

En el presente epígrafe se analizan los resultados obtenidos en la simulación del escenario charco de fuego, el cual se desarrolla cuando se produce un derrame de un líquido combustible inflamable sobre el suelo y acto seguido se produce la ignición, obteniendo como resultado dicho accidente.

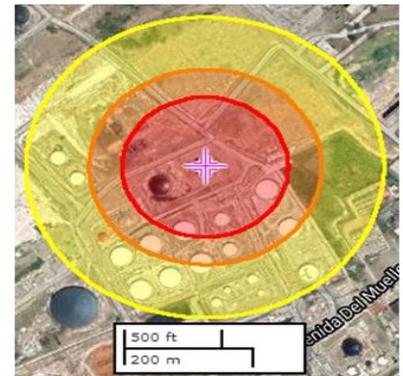
En las figuras 3.4a, 3.5a y 3.6a se muestra el alcance que tienen las radiaciones emitidas desde los tanques 17, 18 y 30 respectivamente, se muestra que en caso de producirse dicho accidente puede alcanzar distancias de hasta 279 m.



**Figura 3.4a: Alcance del escenario charco de fuego en el taque 17**



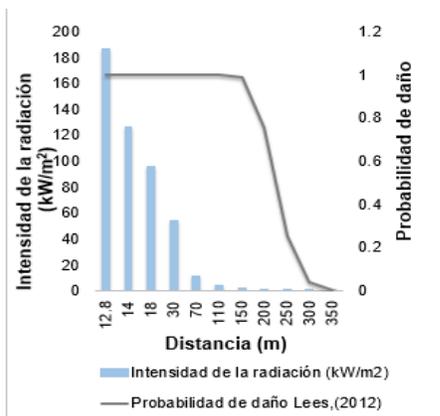
**Figura 3.5a: Alcance del escenario charco de fuego en el taque 18**



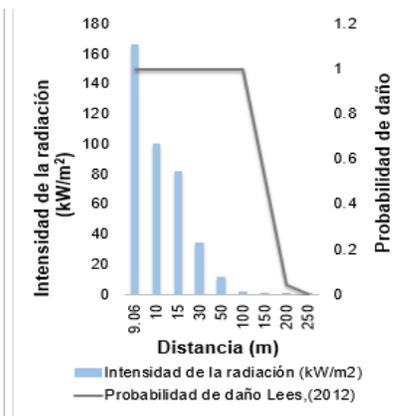
**Figura 3.6a: Alcance del escenario charco de fuego en el taque 30**

En el tanque 17 se observa que la zona de preocupación roja ( $10 \text{ kW/m}^2$ ) alcanza una distancia hasta de 76 m aproximadamente pudiendo causar la muerte en un

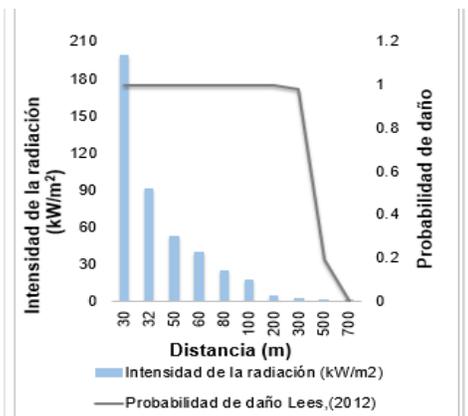
intervalo de 60 segundos, la zona naranja ( $5 \text{ kW/m}^2$ ) comprende una distancia de 102 m provocando quemaduras de segundo grado en un intervalo de 60 segundos y la zona amarilla ( $2 \text{ kW/m}^2$ ) se obtiene hasta los 150 m causando dolor en un intervalo de 60 segundos. En el tanque 18 se muestran que a una distancia de hasta 53 m alcanzan radiaciones de  $10 \text{ kW/m}^2$ , radiaciones superiores a los  $5 \text{ kW/m}^2$  y  $2 \text{ kW/m}^2$  alcanzan distancias hasta de 60 m y 103 m respectivamente. El tanque 30 emite radiaciones letales hasta a una distancia de 130 m, a distancias de 181 m y 279 m las personas recibirían quemaduras de segundo grado y dolor en un intervalo de 60 segundos, causando daños también a los equipos comprendidos dentro de estas distancias.



**Figura 3.4b: Intensidad de la radiación y Distancia vs Probabilidad de daño en el tanque 17**



**Figura 3.5b: Intensidad de la radiación y Distancia vs Probabilidad de daño en el tanque 18**



**Figura 3.6b: Intensidad de la radiación y Distancia vs Probabilidad de daño en el tanque 30**

En las figuras 3.4b, 3.5b y 3.6b se muestran gráficos de valores de distancias contra intensidad de la radiación y probabilidad de daño planteados por Lees (2012), en el gráfico de la figura 3.4b se puede observar que a una distancia de 70 m hay un 100% de probabilidad de daño, en la 3.5b y 3.6b se observa que a distancias de 50 m y 100 m respectivamente hay una probabilidad de daño de un 100% para los valores de intensidad de radiación correspondientes, esto significa que todas las personas que se encuentren dentro de estos radios de distancias podrían ser afectados con la muerte, quemaduras y dolor. También se evidencia que la intensidad de la radiación y la distancia son inversamente proporcionales, la radiación va disminuyendo a medida que va aumentando la distancia, esta observación coincide con lo expuesto por Behesht *et al.* (2018); Hosseinnia *et al.* (2018) y Khakzad *et al.* (2017).

El *software* ALOHA limita su simulación para un período de tiempo de una hora, por lo que se puede observar que el comportamiento de los escenarios es similar y pueden provocar terribles daños a las personas y equipos que se encuentren dentro del radio de las distancias mencionadas anteriormente. Los valores de radiación de todas las unidades de procesos obtenidos en la simulación para charco de fuego se muestran en el anexo 7.

### 3.1.2 Estimación del alcance del escenario BLEVE más bola de fuego

En este epígrafe se analizan los resultados obtenidos por el *software* ALOHA en la simulación del escenario BLEVE más bola de fuego con el objetivo de conocer el alcance que tiene este accidente.

El escenario BLEVE tiene un gran alcance y consecuencias devastadoras, en las figuras 3.7a, 3.8a y 3.9a se muestra el alcance de las radiaciones emitidas y el comportamiento del escenario. En el anexo 8 se muestran los resultados de la simulación del BLEVE.



Figura 3.7a: Alcance del escenario BLEVE más bola de fuego en el ataque 17



Figura 3.8a: Alcance del escenario BLEVE más bola de fuego en el ataque 18



Figura 3.9a: Alcance del escenario BLEVE más bola de fuego en el ataque 30

En las figuras se muestran las distancias que alcanza la zona de preocupación amarilla, afectando parte de la zona de Versailles y la zona Playa causando dolor en un intervalo de 60 segundos, también se observa que la zona de preocupación roja envuelve toda la empresa con radiaciones superiores a los  $10 \text{ kW/m}^2$  que provocarían la muerte de los trabajadores en un intervalo de 60 segundos, la zona

de preocupación naranja se extiende hasta los poblados cercanos con radiaciones superiores a los 5 kW/m<sup>2</sup>.

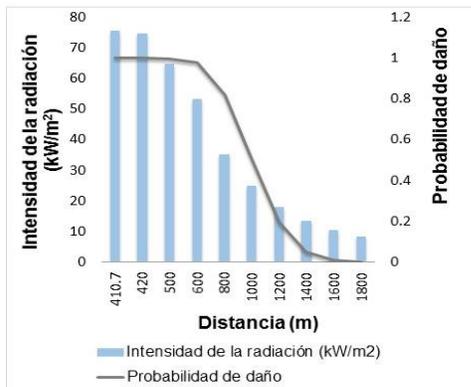
En la tabla 3.1 se muestran resultados obtenidos en la simulación del BLEVE como: las distancias que alcanza, el diámetro de la bola de fuego y la duración, en las unidades de procesos seleccionadas.

**Tabla 3.1: Resultados de la simulación de ALOHA del escenario BLEVE**

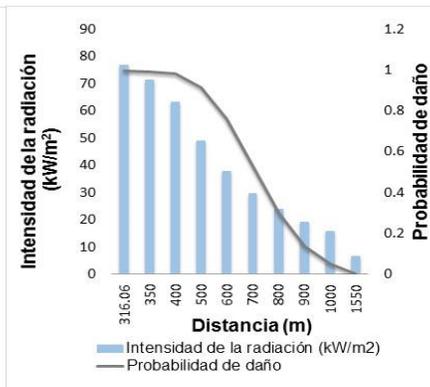
Tanques	Diámetro de la bola de fuego (m)	Duración (s)	Distancias alcanzadas por las radiaciones (m)		
			Zona Roja 10 kW/m <sup>2</sup>	Zona Naranja 5 kW/m <sup>2</sup>	Zona Amarilla 2 kW/m <sup>2</sup>
17	821	37	1 600	2 300	3 600
18	632	30	1 300	1 800	2 800
30	992	43	1 900	2 700	4 200

En la tabla 3.1 se muestra que el tanque 18 presenta menor alcance en las zonas de preocupación y menor tiempo de duración del accidente, debido a su tamaño y volumen de almacenamiento, las mayores distancias y mayor tiempo de duración lo alcanza el tanque 30 debido a que su capacidad de almacenamiento es mayor que la del tanque 17 y 18, concordando con lo planteado por Abbasi y Abbasi (2007), por sus características el escenario del BLEVE más bola de fuego se clasifica como accidente mayor a pesar de su corta duración, según Casal *et al.* (2002).

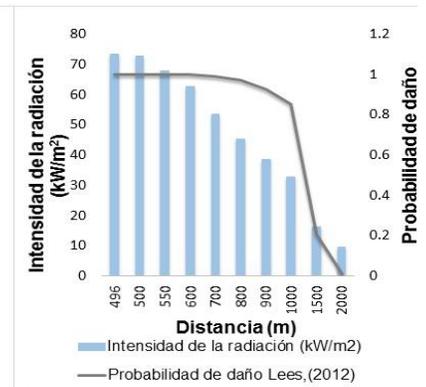
En las figuras 3.7b (tanque17), 3.8b (tanque 18) y 3.9b (tanque 30) se muestran gráficos confeccionados con los valores de radiación contra distancia y probabilidad de daño planteadas por Lees (2012).



**Figura 3.7b: Intensidad de la radiación y Distancia vs Probabilidad de daño en el taque 17**



**Figura 3.8b: Intensidad de la radiación y Distancia vs Probabilidad de daño en el taque 18**



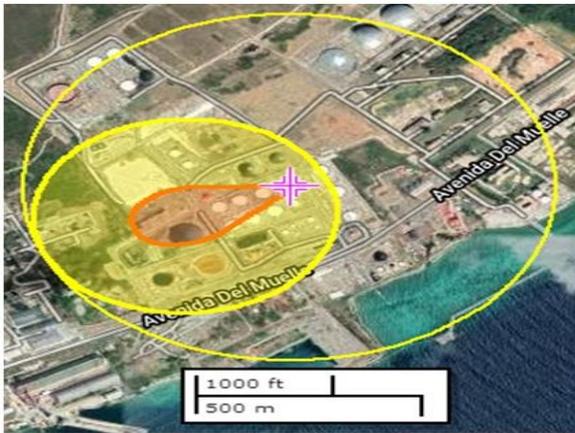
**Figura 3.9b: Intensidad de la radiación y Distancia vs Probabilidad de daño en el taque 30**

En la figura 3.7b se observa que a distancias de 410,7 m se obtiene una probabilidad de daño de 99% y a distancias de 1800 m se obtiene baja probabilidad de daño, pero igual emiten radiaciones con valores altos para las personas. En la figura 3.8b se evidencia que a distancias de 316,6 m hay una alta probabilidad de daño de 99% y esta disminuye a una distancia de 1550 m. En la figura 3.9b se muestra un 99% de probabilidad de daño para una distancia de 496 m y una baja probabilidad para distancias de 2000 m. Se evidencia una vez más la inversa proporcionalidad entre la distancia y la intensidad de la radiación, como lo plantean Behesht *et al.* (2018) y Hosseinnia *et al.* (2018), pero aunque las radiaciones disminuyan no dejan de ser peligrosas.

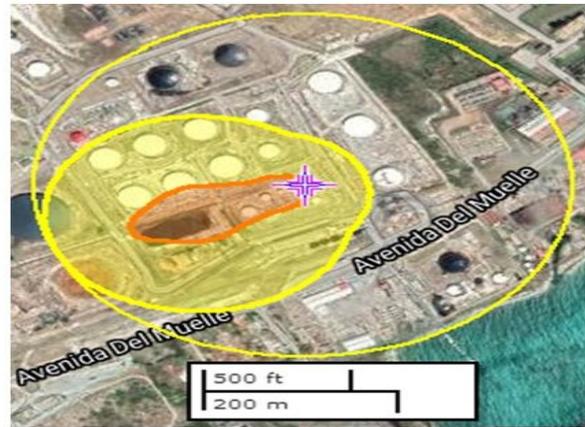
### 3.1.3 Estimación del alcance del escenario explosión de una nube de vapor

En este epígrafe se analiza la explosión de una nube de vapor en las unidades de procesos seleccionadas, la velocidad y dirección del viento ejercen influencia sobre la nube de vapor, por lo que se realiza un análisis con todas las direcciones del viento que más acercarían la nube a todos los equipos, los resultados se muestran en el anexo 9.

En las figuras 3.10a y 3.11a se muestra el comportamiento de la explosión de la nube de vapor en los tanques 17 y 18 respectivamente.

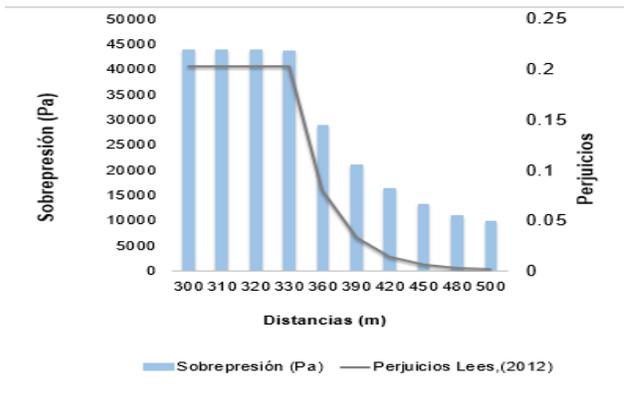


**Figura 3.10a: Alcance del escenario nube de vapor en el tanque 17**

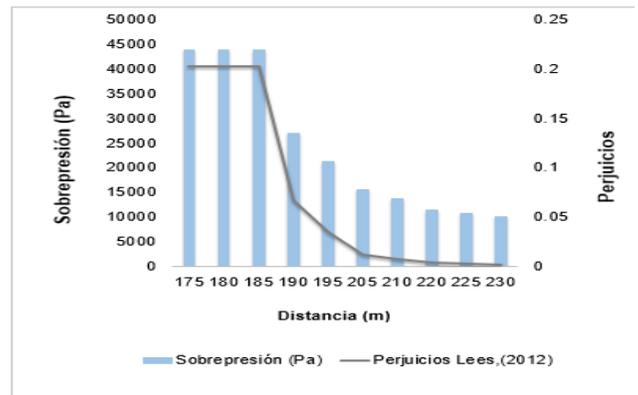


**Figura 3.11a: Alcance del escenario nube de vapor en el tanque 18**

En el caso del tanque 17 (figura 3.10a) a una distancia de 376 m se recibe una sobrepresión de 3,5 psi (24131,65 Pa), causando lesiones graves y a una distancia de 592 m se recibe una sobrepresión de 1,0 psi (6894,75 Pa) que afecta buena parte de la empresa, provocando rotura de cristales dañando a las personas que se encuentren cerca. En la figura 3.11a que corresponde al tanque 18 los valores de sobrepresión de 3,5 psi (24131,65 Pa) alcanzan distancias de 192 m y la zona de preocupación amarilla (1,0 psi; 6894,75 Pa) alcanza distancias 277 m y abarca toda el área seleccionada. El tanque 17 tiene mayor alcance que el 18 como se observa en las figuras, esto puede deberse a que tiene mayor capacidad de almacenamiento, dichos resultados concuerdan con el planteamiento de Djelosevic y Tepic (2019), también alcanza en menor tiempo el 60% del LEL.



**Figura 3.10b: Sobrepresión y Distancia vs Perjuicios en el tanque 17**



**Figura 3.11b: Sobrepresión y Distancia vs Perjuicios en el tanque 18**

Se realizaron gráficos de sobrepresión contra distancias y perjuicios, en las figuras 3.10b y 3.11b se muestran los resultados de dichos gráficos que fueron elaborados

para los tanques 17 y 18. Se observa en ambas figuras el máximo valor de perjuicio es de 0,2, que es alcanzado en el tanque 17 a los 330 m y en el 18 a los 185 m, también se evidencia la inversa proporcionalidad entre la sobrepresión y la distancia, como muestran los resultados obtenidos por Behesht *et al.* (2018) y Márquez (2016).

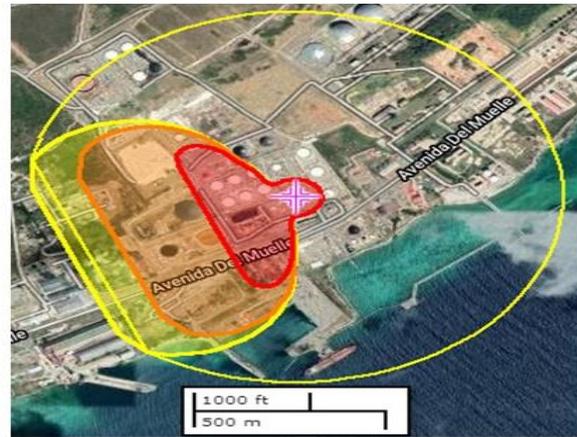
### 3.1.4 Estimación del alcance del escenario nube tóxica

El objetivo de este epígrafe es analizar el comportamiento de una nube tóxica en el área de estudio por su alto nivel de peligrosidad para las personas y el medio ambiente. En el anexo 9 se muestra los resultados obtenidos para todas las unidades de procesos del área de estudio.

Se muestra en las figuras 3.12a y 3.13a la propagación de la nube tóxica a partir de los tanques analizados, 17 y 18 respectivamente.



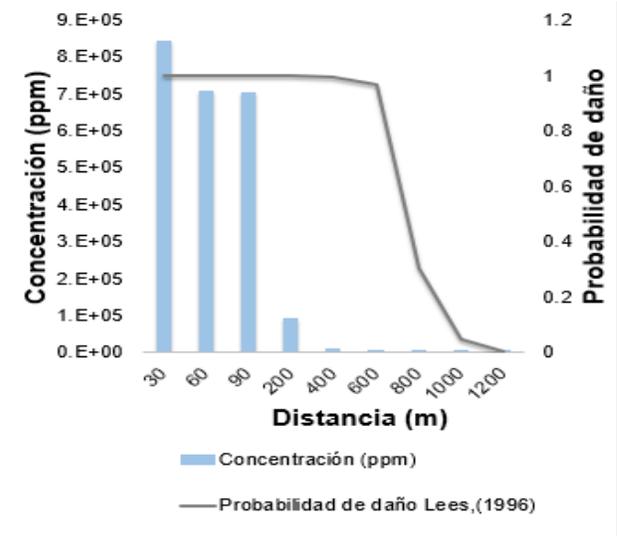
**Figura 3.12a: Alcance del escenario nube tóxica en el taque 17**



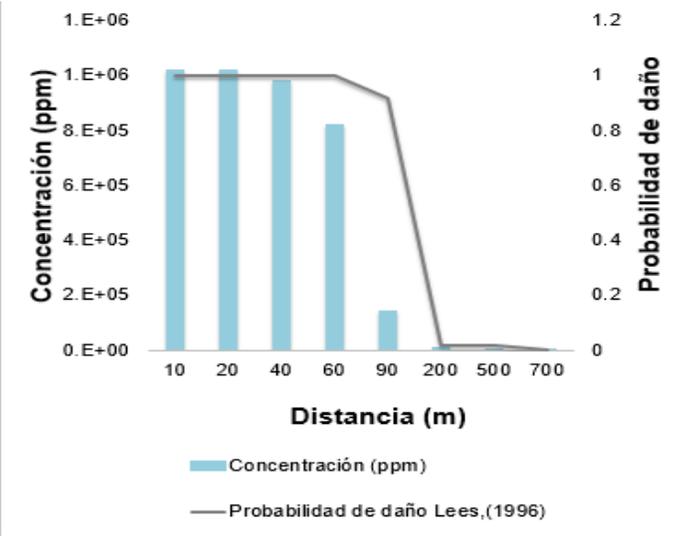
**Figura 3.13a: Alcance del escenario nube tóxica en el taque 18**

En el tanque 17 la zona de preocupación roja alcanza distancias hasta de 466 m con una concentración de la nube de 8600 ppm pudiendo experimentar efectos amenazantes para la vida o incluso provocar la muerte a todas las personas que se encuentren dentro de este radio, la zona naranja alcanza distancias de 718 m con una concentración de 2900 ppm provocando la incapacidad para escapar de las personas dentro de ese radio. En la figura 3.13a correspondiente al tanque 18 se observa que AEGL-3 que establece efectos amenazantes para la vida alcanza una distancia de 236 m con una concentración de 5000 ppm, AEGL-2 tiene un alcance

de 494 m y una concentración de 830 ppm de nube tóxica a partir del cual se puede experimentar efectos duraderos serios o irreversibles o ver impedida la capacidad de las personas para escapar del lugar y el AEGL-1 que provoca molestias notables alcanza los 624 m con una concentración de 500 ppm. Aunque ambas nubes tóxicas afectan una parte de la bahía, la nube tóxica que se forma a partir del tanque 17 se propaga a una mayor distancia que la del tanque 18 y con mayor concentración causando efectos duraderos serios o irreversibles a los trabajadores que se encuentren dentro de su radio de propagación.



**Figura 3.12b: Concentración y Distancia vs Probabilidad de daño en el tanque 17**



**Figura 3.13b: Concentración y Distancia vs Probabilidad de daño en el tanque 18**

En las figuras 3.12b y 3.13b se muestra la relación entre la distancia, la probabilidad de daño y la concentración de los tanques 17 y 18 respectivamente. En el tanque 17 se observa que hasta una distancia de 400 m hay una probabilidad de daño alta de 99% y para el tanque 18 la probabilidad de daño de 100% se mantiene hasta los 60 m. En ambas figuras se evidencia la inversa proporcionalidad entre la distancia y las concentraciones como plantearon Behesht *et al.* (2018) en sus investigaciones.

**3.2- Resultados de la valoración de la evolución en el tiempo y afectación por cada vector de forma individual (Etapa 4)**

En el presente epígrafe se analizan los resultados obtenidos en el análisis histórico donde se determina la frecuencia inicial de los accidentes, la probabilidad de ignición, el árbol de eventos y los resultados del cálculo de probabilidad de escalado

de los escenarios analizados, con el objetivo de determinar las unidades primarias potenciales y el posterior desarrollo de las redes Bayesianas ordinarias y dinámicas.

Mediante el análisis histórico realizado en el área de estudio en los últimos 10 años se obtiene un valor de frecuencia inicial de los accidentes con base de cálculo años a la menos 1 ( $a^{-1}$ ), el análisis se realiza clasificando la cantidad de derrames por sustancias y dividiéndola entre la cantidad de tanques que almacenan dichas sustancias, ese valor obtenido se divide entre los 10 años para obtener el valor de frecuencia inicial con el que se inicia el árbol de eventos. En la tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos en el análisis histórico y en la tabla 3.3 los obtenidos en los árboles de eventos.

**Tabla 3.2: Resultados obtenidos en el análisis histórico**

Sustancias	Derrames	Cantidad de tanques	Frecuencia inicial ( $a^{-1}$ )
Diésel	3	9	0,0333
Turbo Combustible	1	3	0,0333
<i>Fuel Oil</i>	16	8	0,2000
Nafta	3	5	0,0600
Gasolina de Aviación	2	5	0,0400

**Tabla 3.3: Resultados de los árboles de eventos**

Sustancias	Charco de fuego	Explosión de nube de vapor	Llamarada	Nube tóxica
Diésel	0,0083	0	0	-
Turbo Combustible	0,0083	0	0	-
<i>Fuel Oil</i>	0,0500	0	0	-
Nafta	0,0150	0,0135	0,0202	0,0112
Gasolina de Aviación	0,0100	0,0090	0,0135	0,0075

Como se muestra en la tabla 3.2 la mayor cantidad de derrames a lo largo de 10 años se produce a partir del *fuel oil* que consecuentemente presenta la mayor frecuencia inicial de eventos, y las sustancias con menor frecuencia son el diésel que ha tenido un valor bajo de derrames a pesar de ser la sustancia con mayor cantidad de tanques de almacenamiento, y el turbo combustible con un derrame. Los valores de frecuencia inicial obtenidos en el análisis histórico son altos comparados con los reportados por BEVI (2009); Dueñas *et al.* (2021); Reniers y Cozzani (2013). Con los valores de frecuencia inicial obtenidos se inicia el árbol de eventos. En la tabla 3.3 se observa que las sustancias con mayor frecuencia inicial para charco de fuego son el *fuel oil* y la nafta con valores de 0,0500 y 0,0150 respectivamente, la nafta también reporta altos valores de frecuencia para la explosión de nube de vapor, llamarada y nube tóxica, valores semejantes a los reportados por Dueñas *et al.* (2021); los resultados obtenidos en los árboles de eventos son elevados comparados con los reportados por BEVI (2009); Reniers y Cozzani (2013). A partir de los valores de frecuencia inicial obtenidos en los árboles de eventos para cada escenario se inician las redes Bayesianas, dándole un carácter de confiabilidad y ajuste de realidad a las redes (Dueñas *et al.*, 2021).

En el anexo 10 se muestra de forma general la estructura de los árboles de eventos desarrollados para cada sustancia, el árbol 1 es diferente al árbol 2 porque la nafta

y la gasolina de aviación en caso de ocurrir la ignición retardada pueden producir escenarios como la explosión de una nube de vapor y la llamarada, y en caso de que no ocurra la ignición formarse una nube tóxica, debido al carácter explosivo, tóxico y la capacidad de combustión de estas sustancias; mientras que a partir del derrame de diésel, *fuel oil* o turbo combustible, de no ocurrir la ignición directa no se desarrollan los escenarios antes mencionados debido a que estas sustancias son menos inflamables y volátiles.

Para determinar la probabilidad de ignición directa se emplea la ecuación de Changlong *et al.* (2012), se toma el valor de 0,25 al determinar que hay un buen control de la seguridad del proceso, aunque hay evidencias de que se pueden producir incendios en áreas verdes y fallos eléctricos, por lo que se plantea que hay fuente de ignición segura a consecuencia de estos eventos.

Según BEVI (2009) la probabilidad de ignición retardada se determina como todo lo que no fue probabilidad de ignición directa, corresponde para este caso 0,75, también acorde a lo planteado por este mismo autor la probabilidad de explosión es 0,4 por tratarse de combustibles líquidos.

### **3.2.1 Cuantificación de la probabilidad de escalado de los accidentes**

En este epígrafe se analizan los resultados obtenidos en la cuantificación de la probabilidad de escalado de los accidentes. La probabilidad de escalado de los accidentes es esencial en la elaboración de las redes Bayesianas. Para determinar la probabilidad de escalado primeramente se debe determinar los vectores de escalado de cada una de las unidades de procesos estudiadas, para ellos es de vital importancia conocer las distancias entre estas y qué escenarios se podrían desarrollar en cada una.

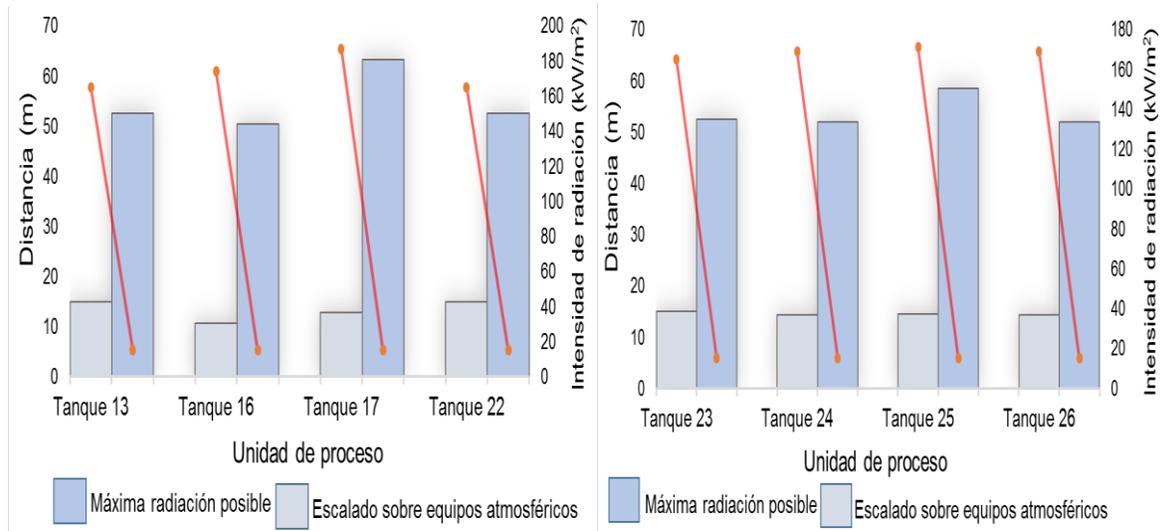
Las distancias entre los equipos se encuentran en el anexo 11, los valores de vectores de escalado de radiación térmica y sobrepresión de las unidades de procesos, así como sus valores de probabilidad de escalado se muestran en el anexo 12.

La unidad de proceso de la subárea 1 que emite el más alto valor de radiación es la 17, con valor de  $20 \text{ kW/m}^2$  con respecto al tanque 16; los tanques 22 y 23 también emiten un alto valor de radiación de  $15,8 \text{ kW/m}^2$ , afectándose entre sí con la misma intensidad de radiación. Estos altos valores de intensidad de radiación se deben a la corta distancia que hay entre ellos. Para el caso de la nube de vapor solo se analizaron los tanques 16 y 17, que son las unidades en las que se puede generar dicho escenario; ambos equipos generan el mismo valor de sobrepresión de  $6,36 \text{ psi}$  ( $43\,850,65 \text{ Pa}$ ) y la misma probabilidad de escalado  $0,9830$ ; valores de sobrepresión que concuerdan con lo planteado por Dueñas *et al.* (2021).

En la subárea 2, el equipo que genera la mayor intensidad de radiación es el tanque 30 con respecto al tanque 38, con un valor de  $26,1 \text{ kW/m}^2$ ; también afecta al tanque 17 ubicado en otra subárea a una distancia de  $101 \text{ m}$  con un valor de radiación de  $16,3 \text{ kW/m}^2$ , esto se debe a su capacidad de almacenamiento y a la cercanía con los equipos; lo siguen los tanques 1 y 4 afectándose entre ellos con el mismo valor de intensidad ( $7,91 \text{ kW/m}^2$ ). Comparando los valores de probabilidad de escalado de la subárea 2 se obtiene que la mayor probabilidad de escalado con un valor de  $0,8200$  corresponde al tanque 30, concordando con lo planteado por Dueñas *et al.* (2021).

Los tanques 18 y 20 de la subárea 3 son los equipos que generan mayor intensidad de radiación con valores de  $45 \text{ kW/m}^2$  y  $37,8 \text{ kW/m}^2$  respectivamente. El tanque 18 genera ese valor con respecto al tanque 20 debido a la corta distancia entre ellos ( $25 \text{ m}$ ), también genera un alto valor con respecto al tanque 19 de  $36,1 \text{ kW/m}^2$ . El equipo 20 emite una intensidad de radiación de  $37,8 \text{ kW/m}^2$  con respecto a la unidad de proceso 21 debido a la cercanía entre ellos. El tanque 19 también emite un alto valor de  $25,5 \text{ kW/m}^2$  con respecto al tanque 20. Para el caso de la explosión de una nube de vapor el mayor valor generado de sobrepresión por todos los equipos es de  $6,36 \text{ psi}$  ( $43\,850,65 \text{ Pa}$ ), esto se debe a la semejante proximidad entre ellos; a pesar de presentar valores semejantes de sobrepresión, el mayor valor de probabilidad de escalado es de  $0,8600$  correspondiente al tanque 18.

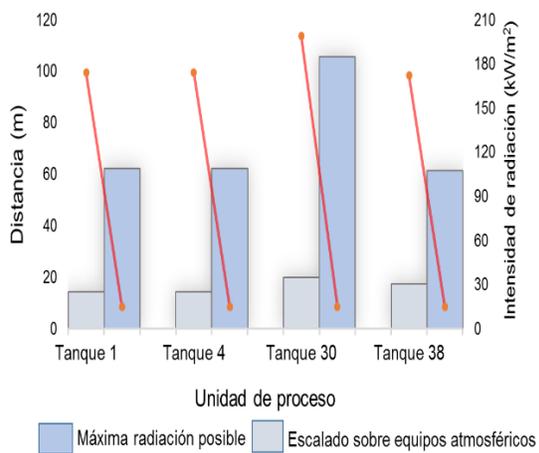
También se analiza el escalado en todas las unidades de procesos del área estudiada, partiendo de los valores de vectores de intensidad de radiación y sobrepresión en función de la distancia, igualándolos a los umbrales plateados por Reniers y Cozzani (2013), en este caso para equipos atmosféricos. En las figuras 3.14 se muestran los gráficos desarrollados para los vectores de intensidad de radiación y las figuras 3.15 los gráficos de sobrepresión.



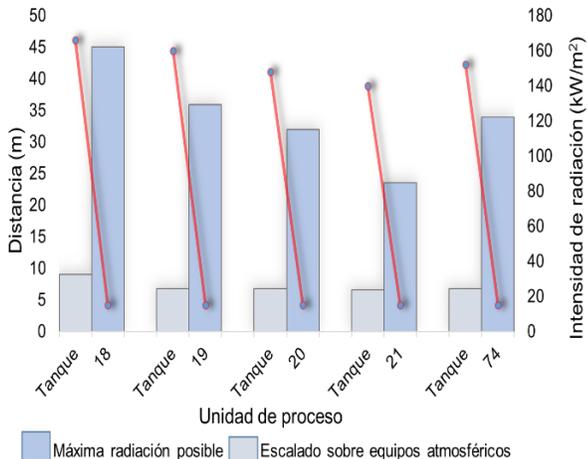
**Figura 3.14a: Unidad de proceso y Distancia vs Intensidad de radiación en la subárea 1**

**Figura 3.14b: Unidad de proceso y Distancia vs Intensidad de radiación en la subárea 1**

En las figuras 3.14a y 3.14b correspondientes a las unidades de procesos de la subárea 1 se puede observar que el valor de mayor escalado sobre equipos atmosféricos corresponde al tanque 17 y lo alcanza a una distancia superior a los 60 m correspondiendo con un valor de intensidad de radiación de 187 kW/m<sup>2</sup>, es la unidad que representa mayor peligro en esta área concordando con lo expuesto por Dueñas *et al.* (2021).

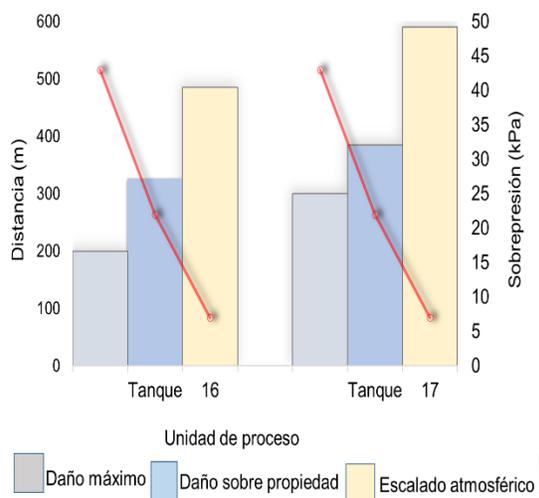


**Figura 3.14c: Unidad de proceso y Distancia vs Intensidad de radiación en la subárea 2**

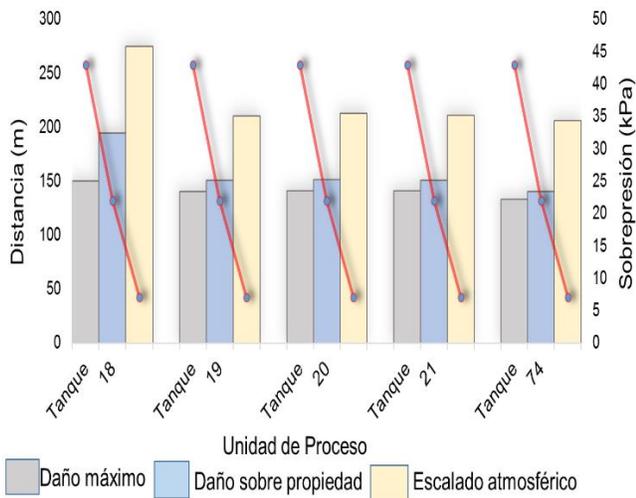


**Figura 3.14d: Unidad de proceso y Distancia vs Intensidad de radiación en la subárea 3**

En la figura 3.14c correspondiente a la subárea 2 se muestra que el equipo atmosférico de mayor escalado es el tanque 30 y lo alcanza a una distancia mayor a los 105 m y con un valor máximo de intensidad de 199 kW/m<sup>2</sup>. La figura 3.14d perteneciente a la subárea 3 muestra que entre sus cinco equipos el de mayor valor de escalado es el tanque 18 a una distancia de 45 m y con valor de máxima radiación de 166 kW/m<sup>2</sup>, estas unidades son las que representan un mayor riesgo para su área.



**Figura 3.15a: Unidad de proceso y Distancia vs Sobrepresión en la subárea 1**



**Figura 3.15b: Unidad de proceso y Distancia vs Sobrepresión en la subárea 3**

En la figura 3.15a se muestran los equipos ubicados en la subárea 1 donde se puede producir la explosión de nube de vapor, se observa que para el tanque 17 el umbral de daño máximo se obtiene a una distancia de 200 m con valor de sobrepresión de 6,36 psi (43 850,65 Pa) y el daño a la propiedad se produce a distancias 485 m, el valor de escalado se alcanza a una distancia superior a los 320 m, los valores obtenidos para el tanque 16 son menores comparados con los del equipo 17 pero de igual forma representan un peligro. La figura 3.15b muestra los resultados obtenidos para la subárea 3 donde se observa que el equipo que representa el mayor peligro es el tanque 18, donde el daño máximo se produce a una distancia de 150 m con una sobrepresión de 6,36 psi (43 850,65 Pa) y el daño a la propiedad se produce a los 275 m, alcanzando un valor de escalado a los 194 m.

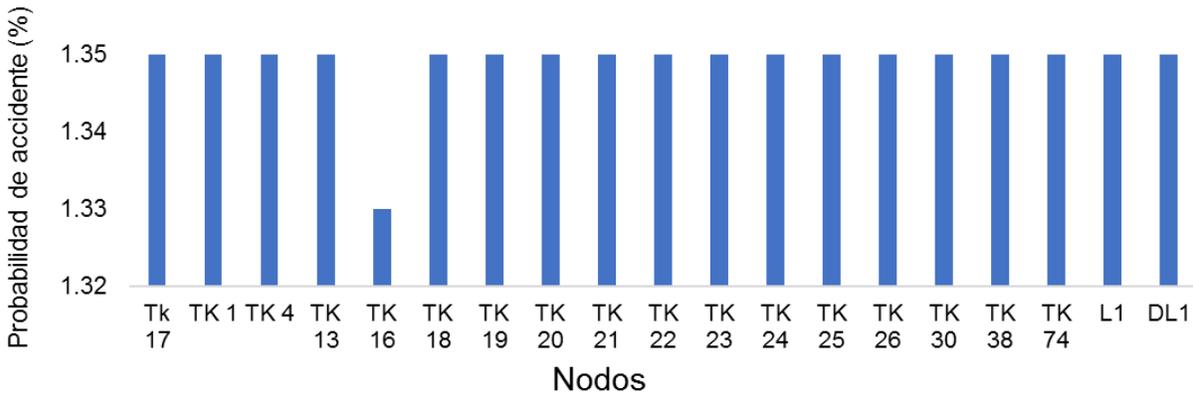
Después de analizar los vectores de escalado, la probabilidad de escalado y los gráficos de unidades de procesos y distancia vs radiación y sobrepresión, se determina que las unidades de procesos más susceptibles y propensas a provocar los escenarios primarios son: los tanques 17, 18 y 30 para charco de fuego, 17 y 18 para explosión de nube de vapor. Entre estas tres unidades de procesos se escoge el tanque 17 como evento primero por su potencial para generar charco de fuego, BLEVE, explosión de nube de vapor y nube tóxica, y por su ubicación en el centro del área, coincidiendo con el estudio realizado por Dueñas *et al.* (2021).

### **3.3 Análisis de resultados de las redes Bayesianas ordinarias y dinámicas, y el criterio de expertos a partir de la lógica difusa (Etapas 5-6)**

En el presente epígrafe se analizan los resultados obtenidos en el desarrollo de las redes Bayesianas ordinarias y dinámicas. Las redes fueron simuladas en el *software* Hugin con el objetivo de cuantificar la probabilidad conjunta del efecto dominó hasta el último nivel de escalado y su evolución en el tiempo; la lógica difusa fue elaborada con la finalidad para cuantificar la probabilidad de evolución en el tiempo de una misma unidad.

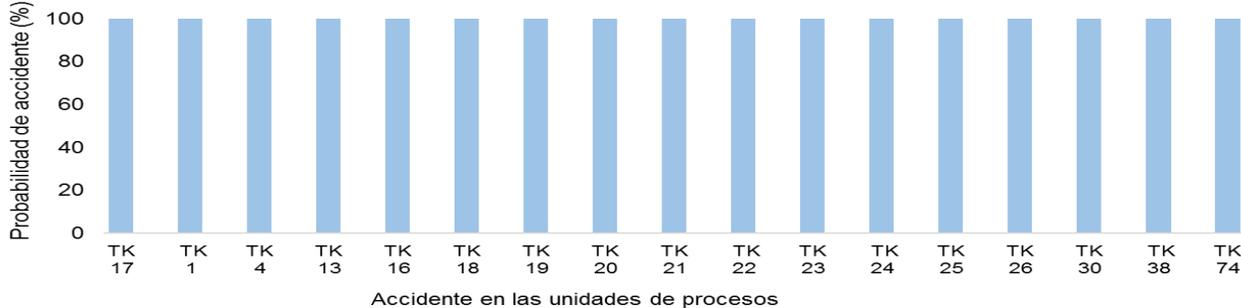
Las redes Bayesianas ordinarias fueron empleadas para cuantificar la probabilidad conjunta del efecto dominó para el escenario de explosión de una nube de vapor como escenario iniciador, se parte de la unidad primaria potencial seleccionada en

el epígrafe 3.2, el tanque 17, y la frecuencia inicial obtenida en el árbol de eventos. Todas las unidades fueron seleccionadas como secundarias, se tomaron considerando los valores de vectores de escalado de sobrepresión generados por la unidad primaria. En el anexo 13 se muestran los resultados obtenidos para esta red.



**Figura 3.16a: Probabilidad de accidente vs Nodos para la red de explosión**

En la figura 3.16a se muestran los valores previos de probabilidad de accidentes, se observa que la mayoría de las unidades presentan la misma probabilidad de accidente 1,35%, exceptuando al tanque 16 que presenta una probabilidad del 1,33%, la probabilidad conjunta previa también tiene un valor 1,35%, los valores son considerados medios según lo reportado por Cai *et al.* (2018) y Simon *et al.* (2019), quedando demostrado que es posible la secuencia de eventos con carácter continuado a partir de la unidad primaria teniendo en cuenta el efecto de la sobrepresión generado por la explosión de una nube de vapor.



**Figura 3.16b: Probabilidad de accidente vs Accidentes en las unidades de procesos para la red de explosión**

En la figura 3.16b se muestra la probabilidad en función de la posibilidad de ocurrencia de un accidente en los equipos secundarios como consecuencia del escalado de un accidente en la unidad primaria, estas probabilidades fueron recalculadas en función de una nueva evidencia y se obtiene que en caso de ocurrir un accidente en el tanque 17 la probabilidad del efecto dominó al primer nivel aumenta considerablemente, obteniendo un valor de 100% en las unidades secundarias y de probabilidad conjunta. Por lo que existe la posibilidad de que ocurra un accidente en el resto de las unidades de procesos como resultado del escalado del escenario de explosión de una nube de vapor procedente del tanque 17, coincidiendo con lo planteado por Dueñas *et al.* (2021).

### **3.3.1 Análisis de las redes Bayesianas dinámicas y el criterio de expertos a partir de la lógica difusa**

En el presente epígrafe se analizan los resultados obtenidos en la simulación de las redes Bayesianas probabilísticas y el criterio de expertos a partir de la lógica difusa. La red Bayesiana dinámica fue empleada para simular el escenario de incendio como evento iniciador; para evaluar la evolución en el tiempo de dicho escenario se combinaron las redes Bayesianas dinámicas con la lógica difusa.

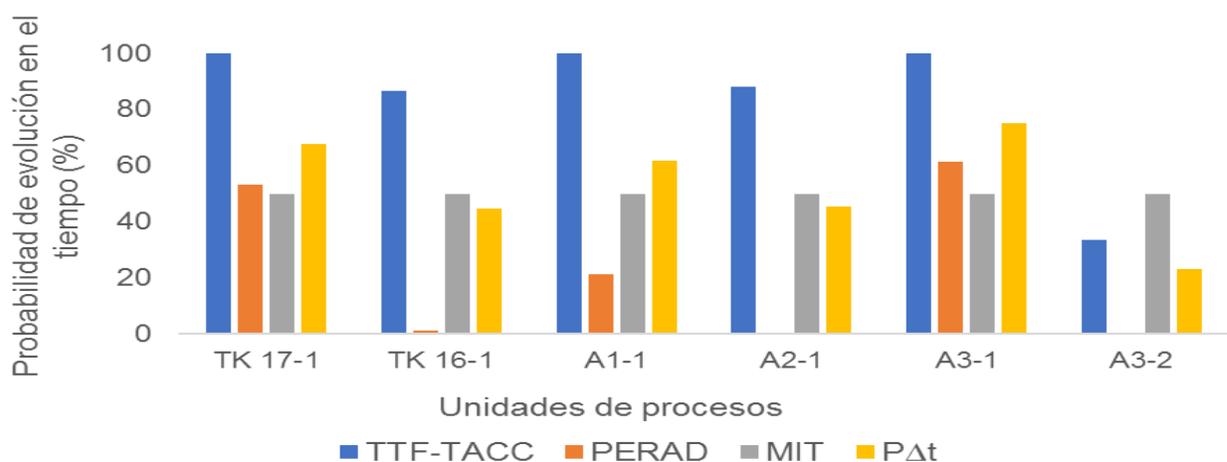
Para realizar la simulación de las redes Bayesianas dinámicas se necesita conocer la probabilidad de evolución en el tiempo de las unidades analizadas, para eso se utiliza el criterio de expertos. Para desarrollar el criterio de expertos mediante lógica difusa se calcularon tres factores: tiempo del accidente entre el tiempo de falla (factor 1), la probabilidad de escalado (factor 2) y las acciones de mitigación (factor 3); y se cuenta con el criterio de tres expertos.

En la tabla 3.4 se muestran los resultados obtenidos en el cálculo de los tres factores y la respuesta, todos los valores mostrados en la tabla se encuentran en por ciento. Casi todas las unidades mantienen constante su evolución en el tiempo, porque a medida que pasa este las unidades analizadas mantienen la misma interacción, excepto para el área 3; debido a que en el  $t_1$  se analiza la interacción entre los tanques de esa misma área y para  $t_2$  cambia, porque entra en interacción con el área 1.

El tiempo del accidente es de 3600 s de acuerdo con la simulación del escenario charco de fuego, este tiempo es suficiente para que ocurra la evolución en el tiempo debido a que el máximo valor de tiempo de falla es de 4132 s, perteneciente al A3-2, concordando con lo planteado por Dueñas *et al.* (2020), para la unidad primaria (TK 17) se obtiene un valor de respuesta de 0,6780 con un tiempo de 572 s y una probabilidad de escalado de 0,5319. El A3-1 presenta una mayor probabilidad con un valor de 0,7510 porque es el área que presenta menor tiempo de falla (511 s) y mayor probabilidad de escalado (0,6141). El factor de mitigación se considera 50 % para todos los casos.

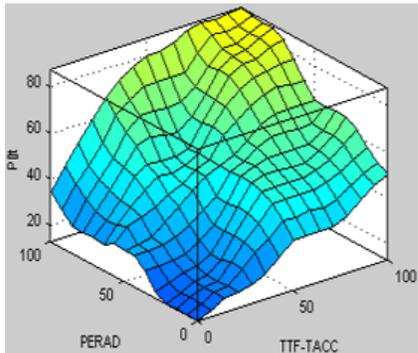
**Tabla 3.4: Resultados de la lógica Fuzzy**

TK	Unidad afectada	TTF-TACC	PERAD	MIT	P $\Delta$ t
TK 17-1	TK 16	100	53,19	50	67,8
TK 16-1	A3	86,63	1,25	50	44,7
A1-1	A3	100	21,19	50	61,9
A2-1	A1	87,96	0,44	50	45,2
A3-1	TK 19	100	61,41	50	75,1
A3-2	A1	33,57	0,02	50	23,2

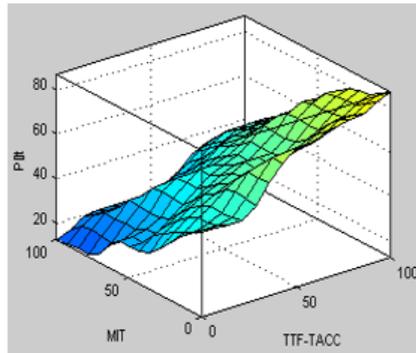


**Figura 3.17: Probabilidad de evolución en el tiempo vs Unidades de procesos**

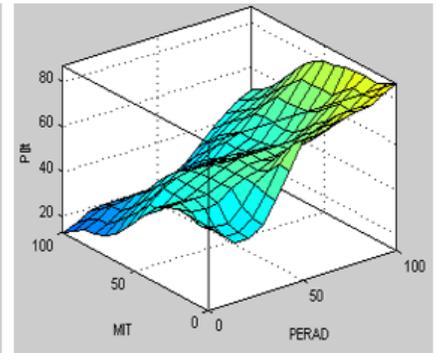
En la figura 3.17 se muestran los valores para la probabilidad de evolución en el tiempo contra las unidades de procesos, estableciendo una comparación entre las unidades de procesos se observa que la mayor probabilidad se obtiene para el área A3 en el  $t_1$ , debido a la proximidad entre sus tanques concordando con lo planteado por Dueñas *et al.* (2020), y porque el análisis se realiza dentro de la misma área ya que no tiene interacción con ninguna otra para ese tiempo. Los mayores valores de probabilidad se obtuvieron para las unidades de procesos (TK17 y A3) que contienen nafta y gasolina de aviación, sustancias altamente volátiles e inflamables.



**Figura 3.18a: Superficie de respuesta considerando los factores PERAD y TTF-TACC**

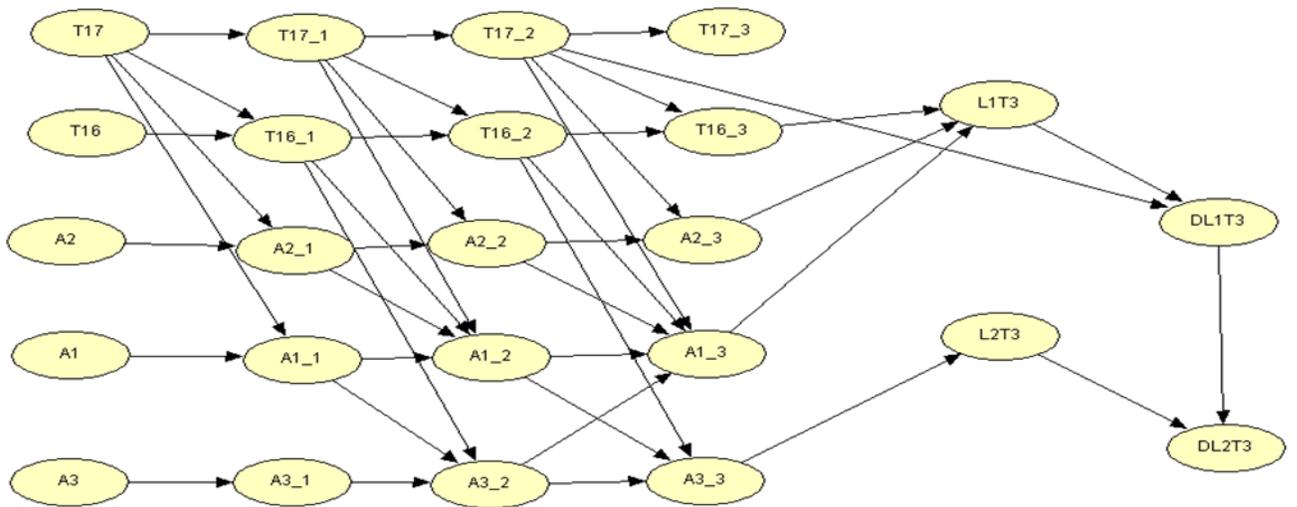


**Figura 3.18b: Superficie de respuesta considerando los factores MIT y TTF-TACC**



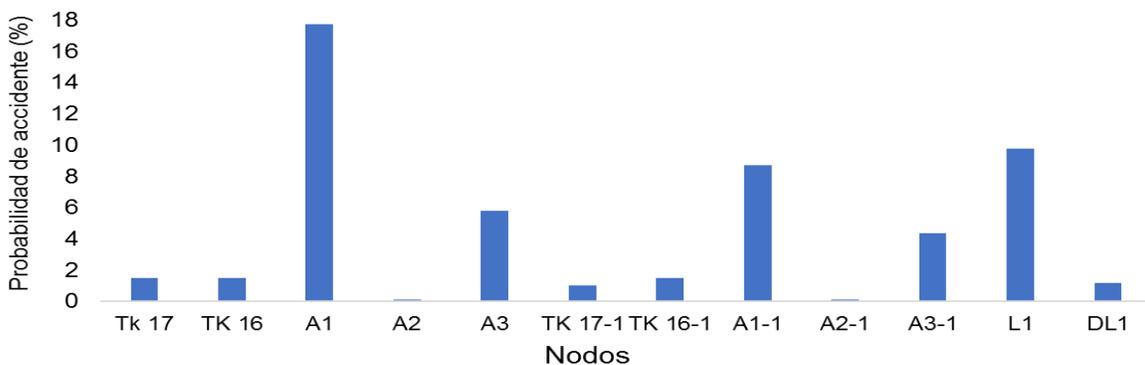
**Figura 3.18c: Superficie de respuesta considerando los factores MIT y PERAD**

En las figuras 3.18 se muestran las superficies de respuestas donde está contemplado de forma concisa el criterio ponderado de los tres expertos que participaron en el estudio. En la figura 3.18a se observa la superficie de respuesta para el factor 1 y el factor 2 contra la probabilidad de evolución en el tiempo, la relación que existen entre los dos factores y la respuesta es que a medida que aumentan el tiempo de falla-tiempo del accidente y la probabilidad de escalado va a aumentar la probabilidad de evolución en el tiempo. En las figuras 3.18b y 3.18c se muestran la superficie de respuesta para los factores 1 y 3 y los factores 2 y 3 contra la PDT, respectivamente, entre el factor de mitigación y la respuesta hay una relación inversamente proporcional porque al aumentar las acciones de mitigación va a disminuir la probabilidad de evolución en el tiempo. El factor tiempo y probabilidad de escalado aumentan el valor de respuesta concordando con lo planteado por Dueñas *et al.* (2020).



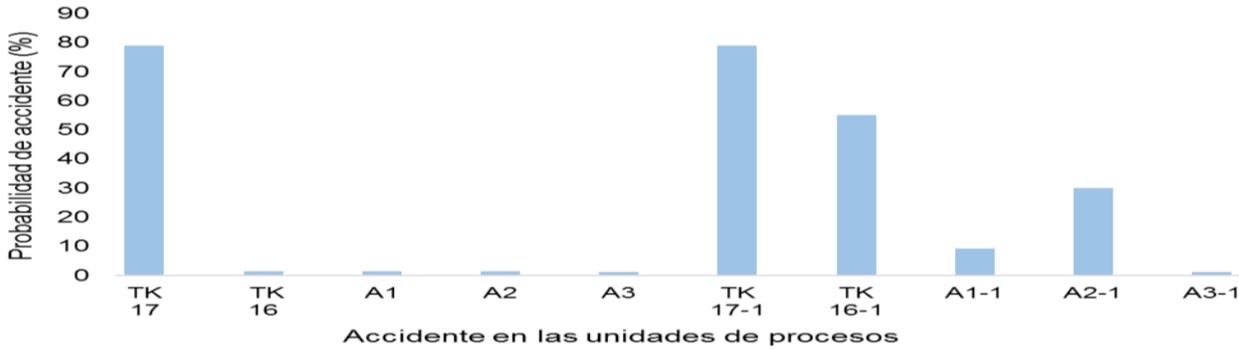
**Figura 3.19: Estructura de la red Bayesiana dinámica en el  $t_3$  para el escenario de incendio**

En la figura 3.19 se observa la estructura de la red Bayesiana dinámica para el  $t_3$ , para la simulación de la red se toma el tanque 17 como unidad primaria y las tres subáreas en las que se divide la T-320 en el epígrafe 3.1, debido a una limitación que presenta el *software* Hugin de no admitir más de 24 nodos, se escoge una unidad representativa de cada subárea como unidad primaria: en la subárea 1 el tanque 26, en la 2 el tanque 1 y en la 3 el tanque 18. La red se desarrolla para  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$ , la frecuencia inicial con la que se inicia la red en el tanque 17 en el tiempo  $t_0$  es la calculada en el árbol de eventos, y la probabilidad para la evolución en el tiempo de la unidad primaria y las subáreas es calculada por el criterio de expertos a partir de lógica difusa.



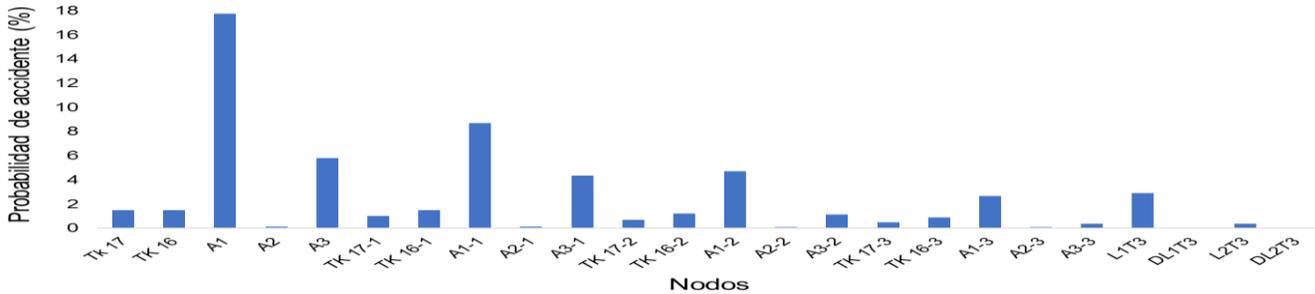
**Figura 3.20a: Probabilidad de accidente vs Nodos para la red de incendio para  $t_1$**

En la figura 3.20a se muestran las probabilidades previas de accidentes para el tiempo  $t_1$ , donde se observa que la mayor probabilidad la presenta el área 1 con un valor 17% para el tiempo  $t_0$  y  $t_1$ , esto se debe a la cercanía que tiene esa área con la unidad primaria. La probabilidad obtenida para el tanque 17 tiene un valor de 1,5%, los valores obtenidos son valores coherentes y medios según los estudios realizados por Dueñas et al. (2021) y Reniers y Cozzani (2013).



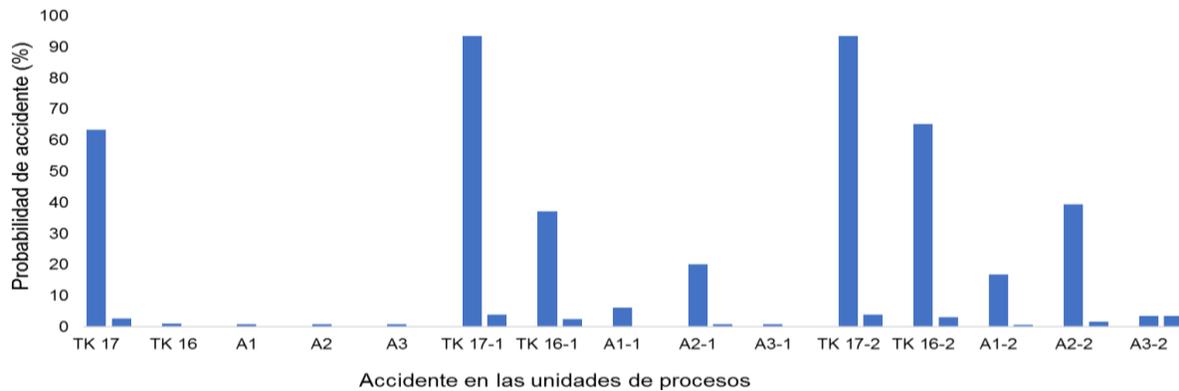
**Figura 3.20b: Probabilidad de daño vs Accidentes en las unidades de procesos para la red de incendio para  $t_1$**

Como se muestra en la figura 3.20b las probabilidades en función de la ocurrencia de un accidente en los equipos secundarios producto de un accidente en la unidad primaria aumentan considerablemente del  $t_0$  al  $t_1$ , reportando valores medios comparados con los descritos por Dueñas *et al.* (2021); Reniers y Cozzani (2013), con excepción del área 3 que en este tiempo todavía no es afectada y no está considerada dentro de los niveles de escalado. Al ocurrir un accidente en la unidad primaria las probabilidades de escalado del primer nivel también aumentan en comparación con las probabilidades previas.



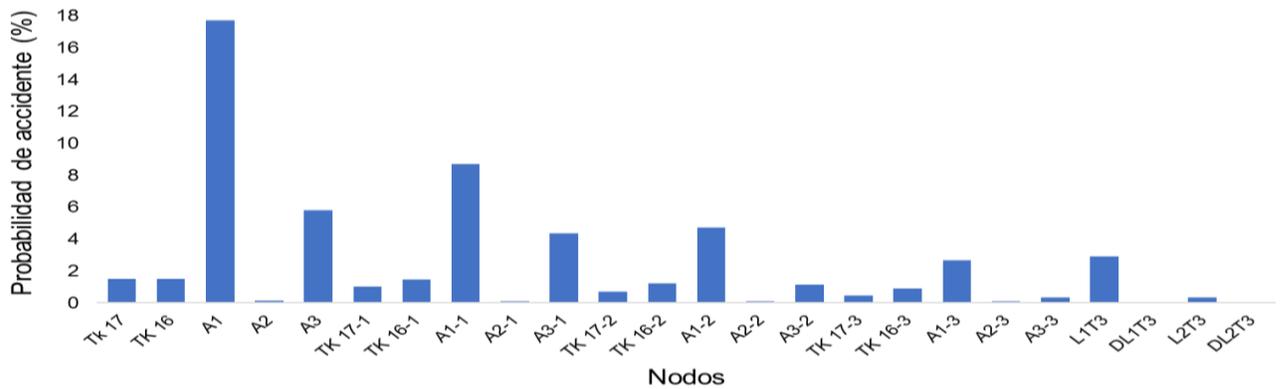
**Figura 3.21a: Probabilidad de accidente vs Nodos para la red de incendio para  $t_2$**

En la figura 3.21a se muestran los resultados de probabilidad previa obtenidos para  $t_2$ , las probabilidades para el primer nivel y segundo nivel de escalado no supera el 5%, pero aun así son valores altos comparados con los reportados por la literatura especializada (Cai *et al.*, 2018; Yazdi, 2019). El área 2 presenta baja probabilidad comparada con las otras áreas porque sus unidades almacenan *fuel oil* y diésel que son sustancias menos inflamables y volátiles que la nafta. La probabilidad conjunta del efecto dominó para el  $t_2$  en el tanque 17 tiene un valor de 66%, valor razonable pero alto comparado a los reportados por Dueñas *et al.* (2021).



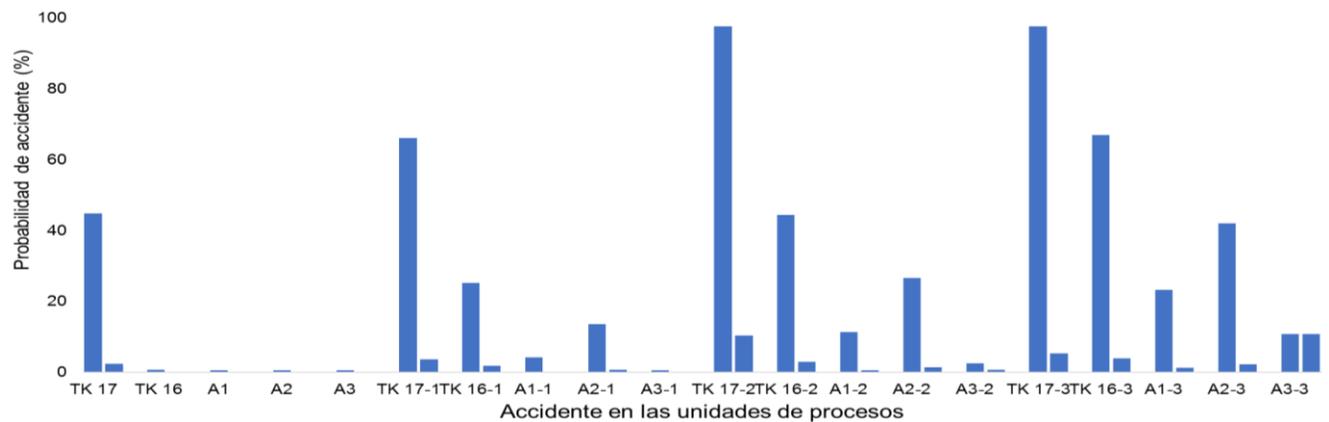
**Figura 3.21b: Probabilidad de daño vs Accidentes en las unidades de procesos para la red de incendio para  $t_2$**

Las probabilidades recalculadas que se muestran en la figura 3.21b demuestran que si existe la posibilidad de que se produzcan eventos en cascada, si se observan y comparan las probabilidades del  $t_1$  con  $t_2$  se ve la evolución en el tiempo del accidente y la probabilidad de que se incendie la mayor cantidad de unidades del área estudiada. En el  $t_2$  el área 3 pasa a ser unidad terciaria, y se evidencia el aumento de la probabilidad del efecto dominó a un segundo nivel. Esto valores afirman que la unidad 17 puede ser el iniciador de la secuencia dominó, concordando con lo planteado por Dueñas *et al.* (2021).



**Figura 3.22a: Probabilidad de accidente vs Nodos para la red de incendio para t3**

Las probabilidades previas que se muestran en la figura 3.22a corresponden a t<sub>3</sub>, se observa que estas probabilidades a medida que transcurre el tiempo disminuyen debido a las acciones de mitigación que se desarrollan, que reducen la probabilidad de propagación del accidente a una mayor escala, el área 3 presenta mayor probabilidad que el área 2 debido a que sus tanques almacenan gasolina de aviación, sustancia que es más inflamable y volátil que el diésel y *el fuel oil*. Los valores obteniendo de probabilidad previa son considerados altos según lo reportado por Dueñas *et al.* (2021); Reniers y Cozzani (2013).



**Figura 3.22b: Probabilidad de daño vs Accidentes en las unidades de procesos para la red de incendio para t3**

En la figura 3.22b se muestra un gráfico de probabilidades de daño recalculadas en función de una nueva evidencia sobre la posibilidad de ocurrencia de un accidente en otras unidades de procesos si ocurre un accidente en la unidad primaria. Para t<sub>3</sub> las probabilidades en el segundo y tercer nivel de escalado aumentan

considerablemente para las 3 áreas, aunque se evidencia que la probabilidad del efecto dominó del segundo nivel de escalado es mayor que la del tercer nivel ya que la probabilidad disminuye a medida que suben los niveles concordando con lo planteado por Dueñas *et al.* (2021) ,por lo que es posible el escalado del efecto dominó. La probabilidad de la unidad primaria va aumentando a medida que evoluciona el tiempo demostrando el potencial que tiene este equipo para iniciar la cadena de eventos dominó. La probabilidad conjunta del efecto dominó presenta un valor alto de 47% comparado con los reportados por Dueñas *et al.* (2021).

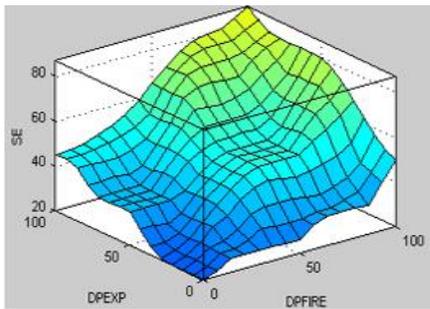
En el anexo 14, 15 y 16 se muestran los resultados obtenidos en la red Bayesiana dinámica para incendio como evento iniciador para  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$ , respectivamente.

### **3.4 Análisis de resultados de la cuantificación de los efectos sinérgicos sobre las personas de accidentes tóxicos, de incendio y explosión (Etapa 7)**

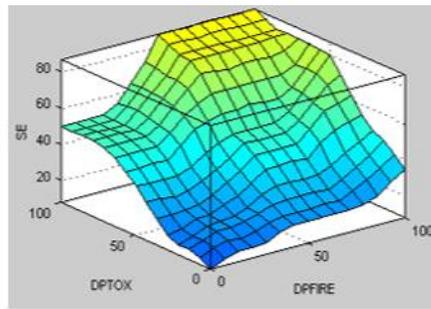
En este epígrafe se analizan los resultados obtenidos en la cuantificación de los efectos sinérgicos. Para la cuantificación de dichos efectos se emplea el criterio de expertos mediante lógica difusa y los mapas de isorriesgos. Los mapas de isorriesgos son la combinación de mapas de amenazas y mapas de vulnerabilidad, que permiten identificar zonas de mayor y menor riesgo frente a diferentes peligros (Maaskant *et al.*, 2010).

Para cuantificar los efectos sinérgicos mediante lógica difusa se crean tres factores: el factor de probabilidad de afectación real por incendios (DPFIRE), el factor de probabilidad de afectación real por explosiones (DPEXP) y el factor de probabilidad de afectación real por toxicidad (DPTOX). Para la determinación de estos tres factores primeramente se tomaron diferentes distancias en las cuales se evaluaron las ecuaciones de probabilidad de daño descritas por Lees (2012) para conocer la afectación producto de la radiación y sobrepresión, y las de Lees (1996) para conocer los daños por la concentración de la nube tóxica; luego de cuantificar la probabilidad de daños por radiación y sobrepresión se multiplican por las probabilidades conjuntas del efecto dominó para incendio y explosión, antes y después de ocurrir un accidente en el tanque 17, probabilidades obtenida mediante la simulación de las redes Bayesianas ordinarias y dinámicas.

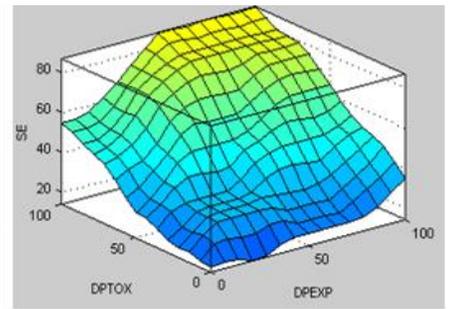
Después de calcular los tres factores se emplea la lógica difusa para obtener la probabilidad previa del efecto sinérgico y la probabilidad del efecto sinérgico de ocurrir un accidente real en el tanque 17. La superficie de respuesta del criterio de expertos se muestra en la figura 3.23 y los resultados de los efectos sinérgicos obtenidos se muestran en la figura 3.24.



**Figura 3.23a: Superficie de respuesta considerando los factores DPFIRE y DPEXP**

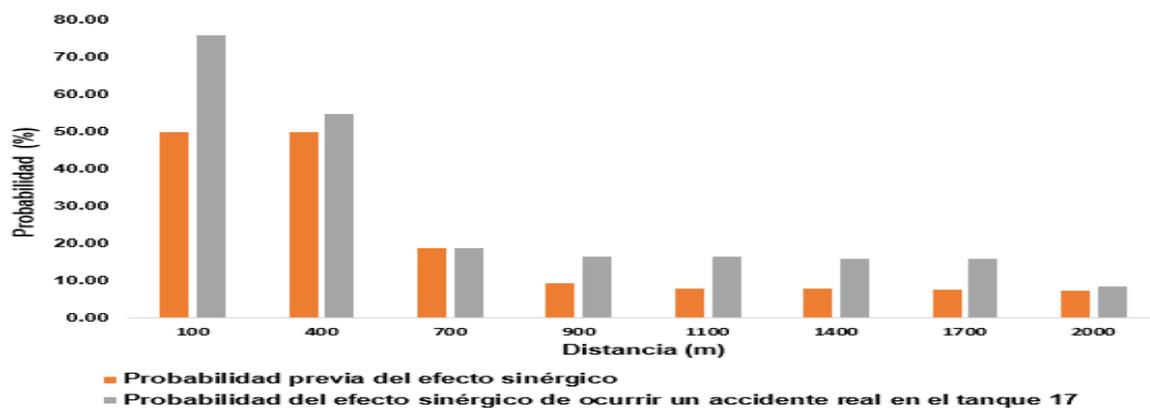


**Figura 3.23b: Superficie de respuesta considerando los factores DPFIRE y DPTOX**



**Figura 3.23c: Superficie de respuesta considerando los factores DPTOX y DPEXP**

La superficie de respuesta de las figuras 3.23a, 3.23b y 3.23c muestra la relación entre la respuesta con los factor 1 y 2, los factor 1 y 3, y los factor 2 y 3, respectivamente. En esta superficie de respuesta está contenido el criterio ponderado de los tres expertos que fueron partícipes del estudio. La relación entre los tres factres y la respuesta es directamente proporcional, al aumentar el PDFIRE, el DPEXP y el DPTOX va aumentar el efecto sinérgico, y al disminuir estos tres factor de igual forma disminuye la respuesta.



**Figura 3.24: Probabilidad vs Distancia para el efecto sinérgico sobre las personas**

En la figura 3.24 se puede observar la probabilidad del efecto sinérgico en relación con las distancias escogidas, se evidencia la inversa proporcionalidad entre la

distancia y la probabilidad de efecto sinérgico, a medida que aumenta la distancia va disminuyendo la probabilidad. Se observa que la probabilidad previa es menor en comparación con la probabilidad de ocurrir un accidente real, pero a una distancia de 100 metros hay una probabilidad elevada con un valor de 50% y 76% respectivamente, con consecuencias letales sobre las personas; el valor más bajo de probabilidad se obtiene a los 2000 m con una probabilidad previa de 7% y 8% de probabilidad de efecto sinérgico, a pesar de ser la probabilidad más baja todavía a esa distancia se ocasionan daños considerables sobre las personas.

Luego de calcular el efecto sinérgico sobre las personas antes y después de ocurrir un accidente real en el tanque 17 se confeccionan los mapas de isorriesgos que se muestran en las figuras 3.25a y 3.25b.

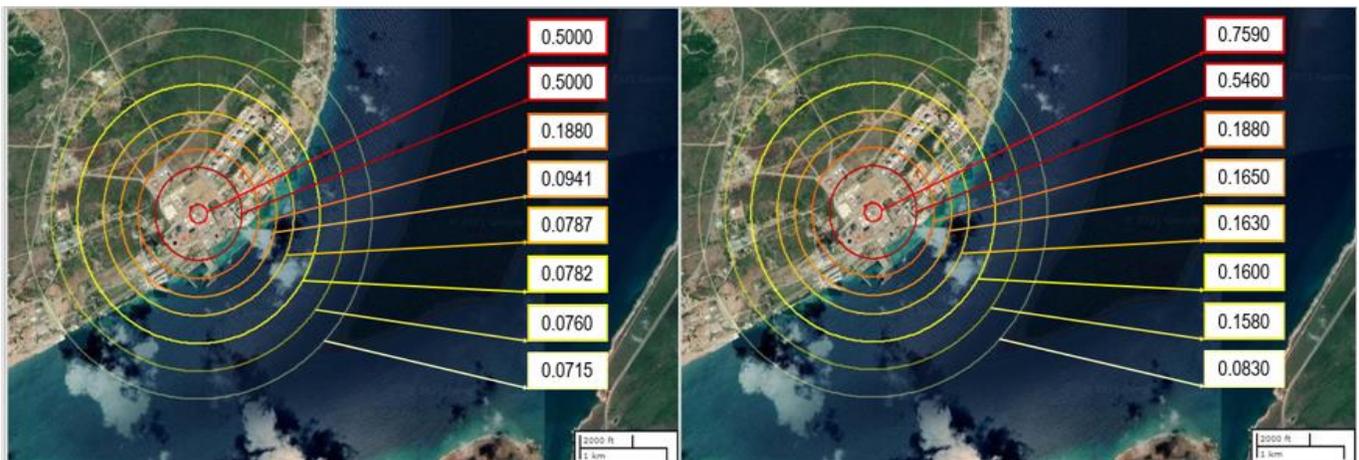


Figura 3.25a: Mapa de isorriesgo para el efecto sinérgico sobre las personas antes de ocurrir un accidente en el tanque 17

Figura 3.25b: Mapa de isorriesgo para el efecto sinérgico sobre las personas de ocurrir un accidente real en el tanque 17

En los mapas de isorriesgos de las figuras 3.25a y 3.25b se muestran los valores obtenidos para el efecto sinérgico sobre las personas antes y después de ocurrir un accidente en el tanque 17. Aquí se consideran los accidentes tóxicos, de incendio y explosión en un solo efecto. En la figura 3.25a una distancia de 100 y 400 m como consecuencia del efecto sinérgico se producirían cinco muertes en 10 años, valor que es considerado alto según González (2020), Reniers y Cozzani (2013) y (Wells, 2003), a medida que va disminuyendo la distancia van disminuyendo la cantidad de muertes.

En la figura 3.25b la cantidad de muertes a una distancia de 100 m aumentan a siete en 10 años, a una distancia de 400 m están comprendidos todos los equipos del área de ocurrir un accidente en el tanque 17 y desarrollarse la secuencia dominó. Considerando las consecuencias de la radiación de los incendios, la sobrepresión, la concentración de la nube tóxica; todo como un solo efecto, se generarían consecuencias desastrosas y provocarían una cantidad de cinco muertes en 10 años, valores elevados según Reniers y Cozzani (2013) y Wells (2003). A los 700 m se provocan consecuencias graves para el personal de las oficinas, ocasionando quemaduras de primer y segundo grado, dificultad para escapar del lugar, afectaciones por rotura de cristales, y una muerte en 10 años. Al disminuir las distancias solo se ocasiona una muerte en 10 años hasta llegar a los 2000 m donde se ocasionan efectos menos graves. En general, los valores de efecto sinérgico obtenidos son altos en comparación con los resultados reportados en la literatura especializada.

### **3.5 Conclusiones parciales del capítulo**

1. Los resultados arrojados por el *software* ALOHA demuestran que los escenarios de charco de fuego y explosión de nube de vapor son accidentes potenciales para provocar el efecto dominó debido a los vectores de escalado de radiación y sobrepresión generados por estos.
2. El escenario del BLEVE tiene mayor alcance que los otros escenarios, alcanzando distancias de hasta 4200 m.
3. Las ecuaciones de probabilidad de daño muestran que los tanques 17, 18 y 30 son unidades potencialmente peligrosas y ponen en riesgo la vida del personal de la empresa y poblados aledaños.
4. El análisis histórico deja como resultados que los derrames más frecuentes en el área son de *fuel oil* (16), nafta (3) y diésel (3), y los árboles de eventos demuestran que la sustancia más peligrosa y propensa a generar *pool fire*, BLEVE, explosión de nube de vapor y nube tóxica es la nafta debido a sus características físico químicas.

5. En la subárea 1, el tanque que genera mayor intensidad de radiación es el 17 con valor de  $20 \text{ kW/m}^2$  con respecto al tanque 16; en la subárea 2 el tanque 30 con respecto al tanque 38 ( $26,1 \text{ kW/m}^2$ ) y en la subárea 3 los tanques 18 y 20 son los equipos que generan mayor intensidad de radiación con valores de  $45 \text{ kW/m}^2$  y  $37,8 \text{ kW/m}^2$  respectivamente.
6. En la subárea 1 y la 3 los tanques que generan mayor valor de sobrepresión son las unidades 17 y 18 respectivamente, con un valor de 6,36 psi ( $43\ 850,65 \text{ Pa}$ ); mientras que, los tanques 17, 18 y 30 presentan la mayor probabilidad de escalado de sus áreas.
7. La probabilidad conjunta de la red Bayesiana ordinaria para explosión tiene un valor de 100% y la de la red Bayesiana dinámica para incendio tiene un valor de 47%, valores que son considerados altos para la literatura especializada.
8. Los resultados que arroja el criterio de expertos mediante la lógica difusa muestran que la unidad con mayor probabilidad de evolución en el tiempo es el tanque 17 con un valor de 67%.
9. Al considerar los efectos sinérgicos sobre las personas antes de ocurrir un accidente en el tanque 17 se obtiene que a una distancia de 100 a 400 m se pueden ocasionar cinco muertes en 10 años y después de ocurrir un accidente en el tanque 17 a una distancia de 100 a 400 m se pueden ocasionar de cinco a siete defunciones en 10 años.

## **Conclusiones**

1. La combinación de las técnicas de inteligencia artificial como redes Bayesianas ordinarias y dinámicas y la lógica difusa, y su integración con técnicas de análisis de riesgos como la simulación de escenarios, el análisis histórico de accidentes y el árbol de eventos, permitió la cuantificación de los efectos sinérgicos de accidentes tóxicos, de incendio y explosión sobre las personas y determinar que el mismo es elevado acorde a la literatura especializada
2. A partir de la simulación de los escenarios charco de fuego, explosión de una nube de vapor y formación de una nube tóxica se obtiene que los mayores niveles de radiación térmica están asociados a los tanques 17, 18 y 30 con valores de hasta 45 kW/m<sup>2</sup>; mientras que el mayor pico de sobrepresión 6,36 psi (43,85 kPa) y concentración de la nube tóxica (1 020 000 ppm) se alcanza por las unidades de procesos que almacenan nafta y gasolina de aviación.
3. Las redes Bayesianas ordinarias y dinámicas demuestran que la unidad de proceso 17 es la más propensa a detonar la cadena de eventos dominó de todas las unidades de procesos con una probabilidad conjunta de 47% para el escenario de incendio y de 100% para el escenario de explosión.
4. Los efectos sinérgicos sobre las personas de accidentes tóxicos, de incendio y explosión, a partir de la combinación de los mapas de isorriesgos con la lógica *Fuzzy*, permiten confirmar que pueden producirse de cinco a siete defunciones hasta 400 metros, valores que disminuyen hasta llegar a 2000 metros y que se consideran altos.

## ***Recomendaciones***

1. Aplicar la metodología propuesta al resto de áreas de la DTCCM, para cuantificar los efectos sinérgicos de accidentes tóxicos, de incendio y explosión sobre las personas.
2. Tener en cuenta los valores de efectos sinérgicos obtenidos para una mejor gestión de los riesgos y la seguridad industrial dentro del área de la T-320.

## **Bibliografía**

- Abbasi, T. y Abbasi, S. A. (2007). The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management. *Journal of Hazardous Materials*. 10.1016/j.jhazmat.2006.09.056
- Abreu, J. B. y Godoy, L. A. (2011). INVESTIGACIÓN DE CAUSAS DE EXPLOSIONES EN UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE EN PUERTO RICO. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol. 11(2) 109.
- Acuña, F. M. L. (2019). "Evaluación de efectos sinérgicos al Estudio de Impacto Ambiental de la PSF "FV Almaraz II" de 49,965 MW de potencia instalada".
- Ahmadi, O., Mortazavi, S. B., Pasharshahi, H., Mahabadi, H. A. y Sarvestani, K. (2019). Modeling of boilover phenomenon consequences: Computational fluid dynamics (CFD) and empirical correlations. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.045>
- ALOHA. (2016). *EPA Software*.
- Assael, M. J. y Kakosimos, K. E. (2010). Can a course on the calculation of the effects of fires, explosions and toxic gas dispersions, be topical, enjoyable and meaningful? *Education for Chemical Engineers*. 10.1016/j.ece.2010.05.001
- Atkinson, G., Cowpe, E., Halliday, J. y Painter, D. (2017). A review of very large vapour cloud explosions: Cloud formation and explosion severity. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2017.03.021>
- Balisampang, T., Abbasi, R., Garaniya, V. y Khan, F. (2017). Fire impact assessment in FLNG processing facilities using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Fire Safety Journal*, 92, 42-52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.05.012>
- Bang, B.-H., Ahn, C.-S., Kim, Y.-T., Lee, M.-H., Kim, M.-W., Yarin, A. L. y Yoon, S. S. (2018). Deflagration-to-Detonation Transition in Pipes: The Analytical Theory. *Applied Mathematical Modelling*. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.09.023>

- Bao, Q., Fang, Q., Yang, S., Zhang, Y., Xiang, H., Chen, L. y Li, Z. (2016). Experimental investigation on the deflagration load under unconfined methane-air explosions. *Fuel*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.126>
- Behari, N. y Noga, M. (2017). Risk Assessment Screening Study for Fire, Explosion and Toxicity Effects of Hydrocarbons Stored in a Sphere and Bullet. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 24, Article 1. 10.5604/01.3001.0010.2794
- Behesht, H. M., Dehghan, F. S., Hajizadeh, R., Mohammad, S. y Koochpaei, A. J. (2018). Modelling the Consequences of Explosion, Fire and Gas Leakage in Domestic Cylinders Containing LPG. *Ann Med Health Sci Res*, 8(83-88).
- BEVI. (2009) Reference Manual Bevi Risk Assessments Versión 3.2. National Institute of Public Health and the Environment (RIVM).
- Birk, A. M. (2017). Shock Waves and Condensation Clouds from Industrial BLEVEs and VCEs. *Process Safety and Environment Protection*. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.psep.2017.06.017>
- Bonilla, J. M., Águeda, A., Muñoz, M. A., Vílchez, J. A. y Planas, E. (2019). THERMAL RADIATION MODEL FOR DYNAMIC FIREBALLS WITH SHADOWING. *Process Safety and Environment Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.029>
- Bubbico, R. y Mazzarotta, B. (2017). Dynamic response of a tank containing liquefied gas under pressure exposed to a fire: A simplified model. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.10.016>
- Budd, C. J. y Ugwu, U. O. (2018). Modelling the view factor of a 'grain-like' observer near a tilted pool fire via planar approximation approach. *Applied Mathematical Modelling*. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.07.037>
- Cai, B., Liu, Y. y Fan, Q. (2018). A multiphase dynamic Bayesian networks methodology for the determination of safety integrity levels. *Reliability Engineering and System Safety*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2016.01.018>.
- Casal, J., Montiel, H., Planas, E. y Vílchez, J. A. (2002). *Análisis del riesgo en instalaciones industriales* (2da ed.)

- Chang, J. I. y Lin, C.-C. (2006). A study of storage tank accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*.
- Changlong, Z., Juncheng, J. y Xiongjun, Y. (2012). Study on ignition probability of flammable materials after leakage accidents. *Procedia Engineering*, 45, 435-441. doi: 10.1016/j.proeng.2012.08.182
- Chebila, M. (2020). Predicting the consequences of accidents involving dangerous substances using machine learning. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111470>
- Chen, C., Khakzad, N. y Reniers, G. (2020). Dynamic vulnerability assessment of process plants with respect to vapor cloud explosions. *Reliability Engineering and System Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.106934>
- Chen, C., Reniers, G. y Khakzad, N. (2020). A thorough classification and discussion of approaches for modeling and managing domino effects in the process industries. *Safety Science*. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104618>
- Chen, J., Zhang, X., Zhao, Y., Bi, Y., Li, C. y Lu, S. (2019). Oxygen concentration effects on the burning behavior of small scale pool fires. *Fuel*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.014>
- Ding, L., Khan, F., Abbassi, R. y Ji, J. (2019). FSEM: An approach to model contribution of synergistic effect of fires for domino effects. *Reliability Engineering and System Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.04.041>
- Ding, L., Khan, F. y Ji, J. (2020a). A Novel Approach for Domino Effects Modeling and Risk Analysis based on Synergistic Effect and Accident Evidence. *Reliability Engineering and System Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107109>
- Ding, L., Khan, F. y Ji, J. (2020b). Risk-based safety measure allocation to prevent and mitigate storage fire hazards. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.01.008>
- Djelosevic, M. y Tepic, G. (2019). Identification of fragmentation mechanism and risk analysis due to explosion of cylindrical tank. *Journal of Hazardous Materials*, 362, 17-35. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.09.013>

- Dobashi, R. (2017). Studies on accidental gas and dust explosions. *Fire Safety Journal*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.04.029>
- DTCCM, C. (2021) Manual de Operaciones Terminal 320.
- Duan, Z., Ding, G., Tang, W. y Ren, T. (2020). A thermodynamic model for predicting transient pressure evolution in response to venting and vaporization of liquefied gas under sudden release. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122460>
- Dueñas, J. A., Orozco, J. L., Furka, D., Furka, S., Boza, Y. C., Febles, D., Gonzalez, A. y Barrera, M. C. (2020). A new Fuzzy-Bayesian approach for the determination of failure probability due to thermal radiation in domino effect accidents. *Engineering Failure Analysis*. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105106>
- Dueñas, J. A., Orozco, J. L., L, D. F., Furka, D., Furka, S. y García, A. (2021). Using integrated Bayesian-Petri Net method for individual impact assessment of domino effect accidents. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126236>
- Gill, J., Atkinson, G., Cowpe, E., Phylaktou, H. y Andrews, G. (2019). Experimental Investigation of Potential Confined Ignition Sources for Vapour Cloud Explosions. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.12.026>
- Gómez, M. (2009). *Estudio experimental y modelización matemática de dardos de fuego* Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona].
- González, A. (2020). *Evaluación del riesgo individual debido al carácter continuado de accidentes tóxicos, de incendio y explosión a través de redes Bayesianas y Petri en la Planta de Procesamiento de Crudo de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro* [Tesis de pre grado, Universidad de Matanzas].
- Gopaldaswami, N., Liu, Y., Laboureur, D. M., Zhang, B. y Mannan, M. S. (2016). Experimental study on propane jet fire hazards: Comparison of main geometrical features with empirical models. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 10.1016/j.jlp.2016.02.003

- Guo, X., Jie, J., Khan, F. y Ding, L. (2020). Fuzzy bayesian network based on an improved similarity aggregation method for risk assessment of storage tank accident. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.030>
- Hansen, P. M., Gaathaug, A. V., Bjerketvedt, D. y Vaagsaether, K. (2017). The behavior of pressurized liquefied CO<sub>2</sub> in a vertical tube after venting through the top. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.035>
- He, Z. y Weng, W. (2019). Synergic Effects in the Assessment of Multi-Hazard Coupling disasters: Fires, Explosions, and Toxicant Leaks. *Journal of Hazardous Materials*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121813>
- He, Z. y Weng, W. (2020). A dynamic and simulation-based method for quantitative risk assessment of the domino accident in chemical industry. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.014>
- Hematiano, B., Planas, E. y Casal, J. (2016). On BLEVE definition, the significance of superheat limit temperature (T<sub>sl</sub>) and LNG BLEVE's. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2015.12.001>
- Hemmatian, B., Casal, J., Planas, E. y Rashtchian, D. (2018). Bleve: The case of water and a historical survey. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.12.001>
- Hemmatian, B., Planas, E. y Casal, J. (2015). Fire as a primary event of accident domino sequences: The case of BLEVE. *Reliability Engineering and System Safety*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2015.03.021>
- Hosseinnia, B., Khakzad, N. y Reniers, G. (2018). Multi-plant emergency response for tackling major accidents in chemical industrial areas. *Safety Science*, 102, 275-289. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.11.003>
- Hristov, J., Planas-Cuchi, E., J.Arnaldos y J.Casal. (2004). Accidental burning of a fuel layer on a waterbed: a scale analysis of the models predicting the pre-boilover time and tests to published data. *International Journal of Thermal Sciences*, 43, 221-239. [0.1016/j.ijthermalsci.2003.06.004](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2003.06.004)
- Hugin. (2019). *Gasvaerksvej 5. DK-9000 Aalborg. Denmark*. . (Version Lite 8.7)

INSHT. (1984). *Criterios toxicológicos generales para los contaminantes químicos*. Article 108 NPT.

Jensen, F. V. (2001). *Redes Bayesianas y gráficos de decisión*. Springer.

Jianfeng, Z. y Reniers, G. (2020). Probabilistic Petri-net addition enabling decision making depending on situational change: The case of emergency response to fuel tank farm fire. *Reliability Engineering and System Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106880>

Jiang, Y., Hua, M., Yan, P., Zhang, H., Li, Q. y Pan, X. (2020). The transport and diffusion characteristics of superheated fire extinguish agent released via different nozzles in a confined space. *Safety Science*. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104787>

Jones, R., Lehr, W., Simecek Beatty, D. y Michael Reynolds, R. (2013). ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4.4. Seattle, Washington. *Departamento de Comercio nacional Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*.

Kabir, S. y Papadopoulos, Y. (2019). Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments: A review. *Safety Science*, 115, 154-175. 10.1016/j.ssci.2019.02.009

Kamarudin, W. N. I. W. y Buang, A. (2016). Small scale boilover and visualization of hot zone. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2016.09.018>

Khakzad, N. (2015). Application of dynamic Bayesian network to risk analysis of domino effects in chemical infrastructures. *Reliability Engineering and System Safety*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2015.02.007>

Khakzad, N. (2021). A Tutorial on Fire Domino Effect Modeling Using Bayesian Networks. *Modelling*, 2, 240–258. <https://doi.org/10.3390/modelling2020013>

Khakzad, N., Amyotte, P., Cozzani, V., Reniers, G. y Pasman, H. (2018). How to address model uncertainty in the escalation of domino effects? *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1-28. 10.1016/j.jlp.2018.03.001

- Khakzad, N., Khan, F., Amyotte, P. y Cozzani, V. (2012). Domino Effect Analysis Using Bayesian Networks. *Risk Analysis*, 33(2). DOI: 10.1111/j.1539-6924.2012.01854.x
- Khakzad, N., Landucci, G. y Reniers, G. (2017). Application of dynamic Bayesian network to performance assessment of Pre protection systems during domino effects. *Reliability Engineering and System Safety*. 10.1016/j.ress.2017.06.004
- Khakzad, N., Reniers, G., Abbassi, R. y Khan, F. (2016). Vulnerability analysis of process plants subject to domino effects. *Reliability Engineering and System Safety*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2016.06.004>
- Kim, B. J., Seo, J. K., Park, J. H., Jeong, J. S., Oh, B. K., Kim, S. H., Park, C. H. y Paik, J. K. (2010). Load characteristics of steel and concrete tubular members under jet fire: An experimental and numerical study. *Ocean Engineering*. 10.1016/j.oceaneng.2010.05.006
- Kong, D., Liu, P., Zhang, J., Fan, M. y Tao, C. (2017). Small scale experiment study on the characteristics of boilover. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2017.04.008>
- Laboureur, D. M., Gopaldaswami, N., Zhang, B., Liu, Y. y Mannan, M. S. (2016). Experimental study on propane jet fire hazards: Assessment of the main geometrical features of horizontal jet flames. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2016.02.013>
- Lauritzen, S. L. y Nilsson, D. (2001). Representar y resolver problemas de decisión con información limitada. *Management Science*, 47, 1235-1251.
- Lees, F. P. (1996). *Loss Prevention in the Process Industries* (Butterworth-Heinemann, Ed.)
- Lees, F. P. (2012). *Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control* (Elsevier, Ed.)
- Lei, P. y Qi, Z. (2010). Influence of Vapor Cloud Shape on Temperature Field of Unconfined Vapor Cloud Explosion. *Chinese Journal of Chemical Engineering*.

- Li, J. y Hao, H. (2020). Numerical study of medium to large scale BLEVE for blast wave prediction. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104107>
- Li, Z. y Zhang, P. (2020). Fire behaviors of fuels with different sootiness levels in hot and humid conditions. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.09.018>
- Liu, C., Wang, Z., Ma, C. y Wang, X. (2020). Influencing factors of the chain effect of spherical gas cloud explosion. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.06.007>
- Liu, J., Li, J. y Fan, C. (2019). A bibliometric study of pool fire related publications. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.104030>
- Lovreglio, R., Ronchi, E., Maragkos, G., Beji, T. y Merci, B. (2016). A dynamic approach for the impact of a toxic gas dispersion hazard considering human behaviour and dispersion modelling. *Journal of Hazardous Materials*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.06.015>
- Maaskant, B., Jonkman, S. N. y Jongejan, R. B. (2010). The potential use of individual and societal risk criteria within the Dutch flood safety policy (part 1): Basic principles. *Reliability, Risk and Safety*.
- Márquez, O. S. (2016). Investigación de accidentes explosivos por la liberación de sustancias peligrosas: uso potencial del modelo de ALOHA. *Revista del Ministerio Público*, 19, 427-460.
- Mashhadimoslem, H., Ghaemi, A., Palacios, A. y Behroozi, A. H. (2020). A new method for comparison thermal radiation on large-scale hydrogen and propane jet fires based on experimental and computational studies. *Fuel*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118864>
- Mehrshad, F., Jozi, S. A. A., Malmasi, S. y Baradaran, V. (2019). Risk Assessment of the Controlling Methods to Prevent the Harmful Environmental Effects from Fire and Explosion: A Case Study. *INTERNATIONAL JOURNAL OF OCCUPATIONAL HYGIENE*, 11, Article 3.
- Meteogalicia. (2011) ALOHA v 5.4.1.2. y MARPLOT v 4.1.2. Manual de Usuario. The Atlantic Regions' Coastal Pollution Response. Versión 1.

- Mishra, K. B., Wehrstedt, K.-D. y Krebs, H. (2012). Lessons learned from recent fuel storage fires. *Fuel Processing Technology*. [www.elsevier.com/locate/fuproc](http://www.elsevier.com/locate/fuproc)
- Mittal, A. (2015). Retrospection of Bhopal gas tragedy. *Toxicological & Environmental Chemistry*. DOI: 10.1080/02772248.2015.1125903
- Mohammad Al-Sarawi, N. (2017). Evaluation of Accidental Atmospheric Releases of Chlorine and Butane from a Mobile Source Using ALOHA and MARPLOT. *American Journal of Environmental Protection*, 6, 144-155. 10.11648/j.ajep.20170606.12
- Moshashaei, P., Alizadeh, S. S., Jafarabadi, M. A. y Khazini, L. (2018). Prioritizing the Causes of Fire and Explosion in the External Floating Roof Tanks. *J Fail. Anal. and Preven.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11668-018-0556-8>
- Mukhim, D., Abbasi, T., Tauseef, S. M. y Abbasi, S. A. (2017). Domino effect in chemical process industries triggered by overpressure- formulation of equipment-specific probits. *Process Safety and Environment Protection*, 1-37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2017.01.004>.
- Naderpoura, M., Nazirb, S. y Lua, J. (2015). The role of situation awareness in accidents of large-scale technological systems. *Process Safety and Environmental Protection*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2015.06.002>
- Ni, J., Yang, H., Yao, J., Li, Z. y Qin, P. (2019). Toxic gas dispersion prediction for point source emission using deep learning method. *Human and Ecological Risk Assessment*. 10.1080/10807039.2018.1526632
- Noret, E., Prod'Homme, G., Yalamas, T., Reimeringer, M., Hanus, J.-L. y Duong, D.-H. (2012). Safety of atmospheric storage tanks during accidental explosions. *European Journal of Environmental and Civil Engineering, Taylor & Francis*, 998-1022. <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.699740>
- Nwabueze, D. O. (2016). Liquid Hydrocarbon Storage Tank Fires – How Prepared is your Facility? *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, 48, 301-306. 10.3303/CET1648051
- Omran, A. y Bagher, M. S. (2019). Consequence analysis of large-scale pool fire in oil storage terminal based on computational fluid dynamic (CFD). *Process*

- Orozco, J. L., J. C., Hens, L., González, L., Lugo, R., Díaz, D. y Pedroso, I. (2019). Assessment of an ammonia incident in the industrial area of Matanzas. *Journal of Cleaner Production.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.024>
- Paik, J. K., Czujko, J., Kim, B. J., Seo, J. K., Ryu, H. S., Ha, Y. C., Janiszewski, P. y Musial, B. (2011). Quantitative assessment of hydrocarbon explosion and fire risks in offshore installations. *Marine Structures.* 10.1016/j.marstruc.2011.02.002
- Palacios, A., García, W. y Rengel, B. (2020). Flame shapes and thermal fluxes for an extensive range of horizontal jet flames. *Fuel.* <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118328>
- Palacios, A. y Rengel, B. (2020a). Computational analysis of vertical and horizontal jet fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* <https://doi.org/10.1016/j.ilp.2020.104096>
- Palacios, A. y Rengel, B. (2020b). Flame shapes and thermal flux of vertical hydrocarbon flames. *Fuel.* <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118046>
- Palazzi, E., Caviglione, C., Reverberi, A. P. y Fabiano, B. (2017). A short-cut analytical model of hydrocarbon pool fire of different geometries, with enhanced view factor evaluation. *Process Safety and Environmental Protection.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2017.08.021>
- Pinhasi, G. A., Ullmann, A. y Dayan, A. (2007). 1D plane numerical model for boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE). *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.03.016
- Pritchard, D. K. y Roberts, A. F. (1993). Blast effects from vapour cloud explosions: A decade of progress. *Safety Science.*
- Qi, X.-g., Wang, H., Liub, Y. y Chen, G. (2019). Flexible alarming mechanism of a general GDS deployment for explosive accidents caused by gas leakage. *Process Safety and Environmental Protection.* <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.10.001>

- Rajeev, K., Soman, S., Renjith, V. R. y George, P. (2019). Human vulnerability mapping of chemical accidents in major industrial units in Kerala, India for better disaster mitigation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101247>
- Reniers, G. y Cozzani, V. (2013). *Domino Effects in the Process Industries Modeling, Prevention and Managing* (Elsevier, Ed.)
- Rozuhan, H., Muhammad, M. y Niazia, U. M. (2020). Probabilistic risk assessment of offshore installation hydrocarbon releases leading to fire and explosion, incorporating system and human reliability analysis. *Applied Ocean Research*. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102282>
- Santos, F. d. S. y Landesmann, A. (2014). Thermal performance-based analysis of minimum safe distances between fuel storage tanks exposed to fire. *Fire Safety Journal*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.08.010>
- Sellami, I., Manescau, B., Chetehouna, K., Izarra, C. d., Nait-Said, R. y Zidani, F. (2018). BLEVE fireball modeling using Fire Dynamics Simulator (FDS) in an Algerian gas industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 10.1016/j.jlp.2018.02.010
- Sellami, I., Nait-Said, R., Chetehouna, K., Izarra, C. d. y Zidani, F. (2018). Quantitative consequence analysis using Sedov-Taylor blast wave model. Part II: Case study in an Algerian gas industry. *Process Safety and Environment Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.02.003>
- Seo, J. K., Lee, S. E. y Park, J. S. (2017). A method for determining fire accidental loads and its application to thermal response analysis for optimal design of offshore thin-walled structures. *Fire Safety Journal*, 92, 107-121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.05.022>
- Sharma, A. y Mishra, K. B. (2019). Experimental set-up to measure the maximum mass burning rate of storage tank fires. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.09.001>
- Sharma, R. K., Gopaldaswami, N., Gurjar, B. R. y Agrawal, R. (2019). Assessment of Failure and Consequences Analysis of an Accident: A case study. *Engineering Failure Analysis*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104192>

Silbergeld, E. K. (2017). Capítulo 33. Toxicología In *ENCICLOPEDIA DE SALUD Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO*.

Simon, C., Mechri, W. y Capizzi, G. (2019). Assessment of Safety Integrity Level by simulation of Dynamic Bayesian Networks considering test duration. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1-32.  
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.11.002>

Spirtes, P., Glymour, C. y Scheines, R. (2000) Causación, predicción y búsqueda.

Tauseef, S. M., Abbasi, T., Pompapathi, V. y Abbasi, S. A. (2018). Case studies of 28 major accidents of fires/explosions in storage tank farms in the backdrop of available codes/standards/models for safely configuring such tank farms. *Process Safety and Environment Protection*.  
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.09.017>

Taveau, J. (2011). Explosion of Fixed Roof Atmospheric Storage Tanks, Part 1: Background and Review of Case Histories. *Process Safety Progress*, 30. 10.1002 / prs.10459

Trivedi, P., Purohit, D. y Soju, A. (2014, Oct-Dec ). *Major Industrial Disasters in India*.

Tseng, T.-Y. y Tsai, K.-C. (2020). Hot-zone boilover suppression using floating objects in crude oil tank fires. *Fire Safety Journal*.  
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103239>

Wang, B. y Qian, F. (2018). Three Dimensional Gas Dispersion Modeling Using Cellular Automata and Artificial Neural Network in Urban Environment. *Process Safety and Environment Protection*.  
<https://doi.org/doi:10.1016/j.psep.2018.09.006>

Wang, Q., Sun, Y., Shu, C.-M., Jiang, J., Zhang, M., Wang, Q. y Wang, X. (2020). Effect of separation distance on gas dispersion and vapor cloud explosion in a storage tank farm determined using computational fluid dynamics. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104282>

Wang, S., Yan, Z., Li, X., Li, G., Guo, H. y Wu, D. (2020). The venting explosion process of premixed fuel vapour and air in a half-open vessel: An analysis of

the overpressure dynamic process and flame evolution behaviour. *Fuel*.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117385>

Wang, Y., Gu, X., Xia, L., Pan, Y., Ni, Y., Wang, S. y Zhou, W. (2020). Hazard analysis on LPG fireball of road tanker BLEVE based on CFD simulation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104319>

Wells, G. (2003). *Major Hazards and their management*. Houston, Texas: Gulf Publishing Company.

Yakush, S. E. (2016). Model for blast waves of Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.048>

Yang, D., Chen, G., Shi, J., Zhu, Y. y Dai, Z. (2020). A novel approach for hazardous area identification of toxic gas leakage accidents on offshore facilities. *Ocean Engineering*. [www.elsevier.com/locate/oceaneng](http://www.elsevier.com/locate/oceaneng)

Yang, R., Khan, F., Taleb-Berrouane, M. y Kong, D. (2019). A time-dependent probabilistic model for fire accident analysis. *Fire Safety Journal*.  
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102891>

Yazdi, M. (2019). A review paper to examine the validity of Bayesian network to build rational consensus in subjective probabilistic failure analysis. *Int J Syst Assur Eng Manag*. <https://doi.org/10.1007/s13198-018-00757-7>

Zarei, E., Khakzad, N., Cozzani, V. y Reniers, G. (2018). Safety analysis of process systems using Fuzzy Bayesian Network (FBN). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 57, 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.10.011>

Zhang, M., Dou, Z., Liu, L., Jiang, J., Mebarki, A. y Ni, L. (2017). Study of optimal layout based on integrated probabilistic framework (IPF): Case of a crude oil tank farm. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2017.04.025>

Zhang, M., Zheng, F., Chen, F., Pan, W. y Mo, S. (2019). Propagation probability of domino effect based on analysis of accident chain in storage tank area. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103962>

- Zhang, Q., Zhou, G., Hu, Y., Wang, S., Sun, B., Yin, W. y Guo, F. (2019). Risk evaluation and analysis of a gas tank explosion based on a vapor cloud explosion model: A case study. *Engineering Failure Analysis*. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.03.003>
- Zhou, J. y Reniers, G. (2017). Petri-net based cascading effect analysis of vapor cloud explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2017.04.017>
- Zhou, J. y Reniers, G. (2018). Modeling and analysis of vapour cloud explosions knock-on events by using a Petri-net approach. *Safety Science*. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.04.019>
- Zhou, K., Wang, Y., Zhang, L., Wu, Y., Nie, X. y Jiang, J. (2019). Effect of nozzle exit shape on the geometrical features of horizontal turbulent jet flame. *Fuel*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116356>

## Anexos

Anexo 1: Análisis histórico de accidentes registrados y los efectos sinérgicos de estos accidentes sobre las personas.

Fecha	Ubicación	Sucesos	Efecto Sinérgico
29 de octubre de 2009	Terminal de lubricantes <i>IOC Petroleum Oil</i> en Jaipur, India	Se produjo una fuga de gasolina de uno de los tanques de almacenamiento. La fuga continuó durante unos 75-90 minutos, provocó la liberación de casi 340-400 toneladas de gasolina y creó una gran nube de vapor sobre toda la instalación. La ignición retardada provocó una devastadora explosión de nube de vapor (VCE), que generó una sobrepresión máxima significativa (> 200 kPa). El VCE fue seguido por un fuego de múltiples tanques que duró 11 días. Este accidente resultó en 11 muertes, más de 150 personas resultaron heridas, se reportó una pérdida de propiedad de aproximadamente 60 millones US y una pérdida irreparable para el medio ambiente debido a los gases tóxicos y el humo espeso. (Sharma <i>et al.</i> , 2019), (Sharma y Mishra, 2019; Trivedi <i>et al.</i> , 2014, Oct-Dec )	La fuga de gasolina dejó una nube de vapor que al encontrar una fuente de ignición explotó, la sobre presión y el aumento de temperatura causaron un incendio que no se había generado anteriormente, todo esto provocó que las personas presentes y en zonas aledañas tuvieran problemas para respirar, quemaduras (primer, segundo y tercer grado) dependiendo de las radiaciones recibidas y dificultades para huir del lugar provocando lesiones graves y la muerte.

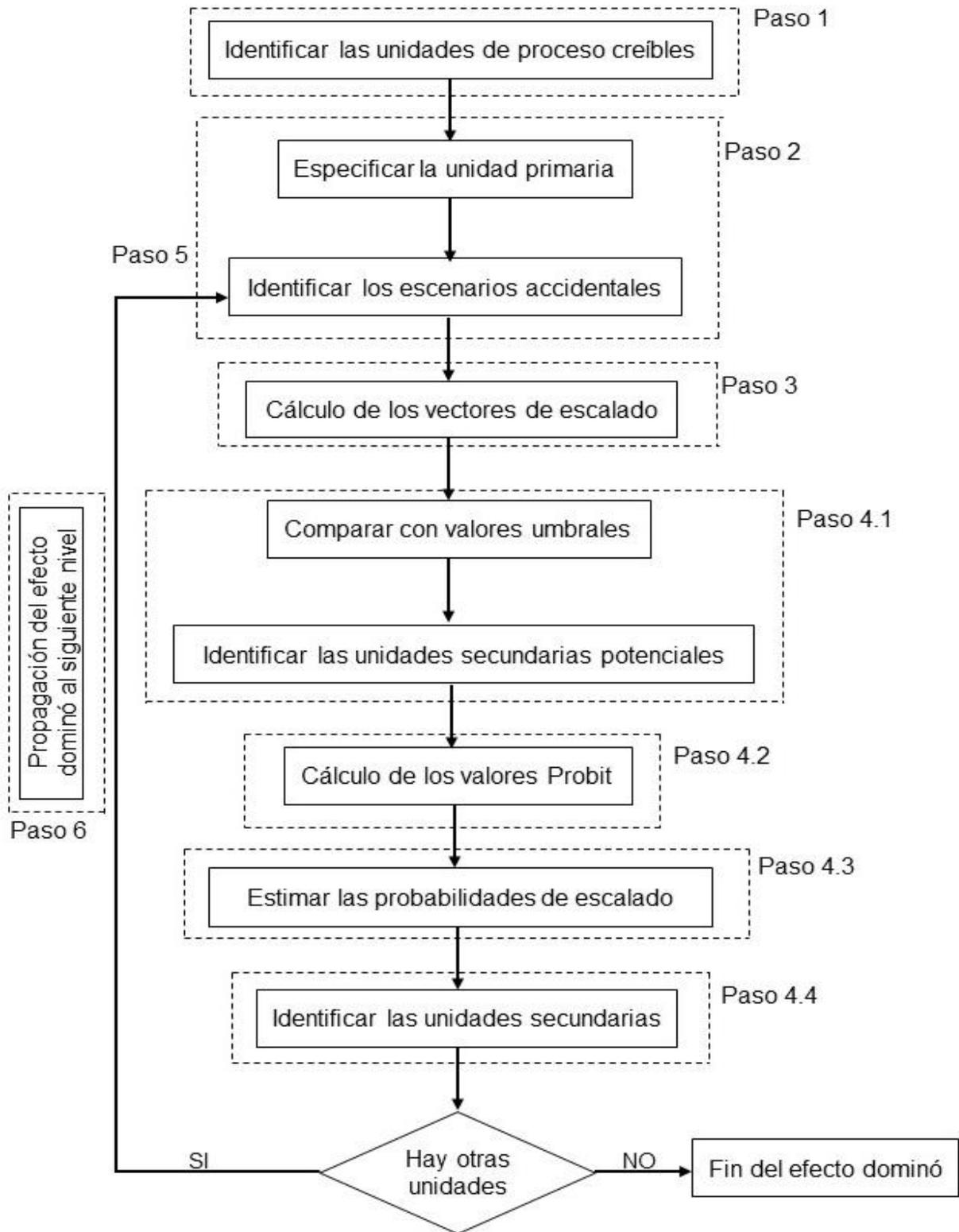
<p>11 de diciembre de 2005</p>	<p>Buncefield, Reino Unido</p>	<p>En la madrugada del 11 de diciembre de 2005 el tanque 912 del depósito de almacenamiento de gasolina comenzó a recibir una cantidad excesiva (más que su capacidad) de gasolina sin plomo, lo que provocó un desbordamiento y la consiguiente acumulación de gasolina. La falla de la alarma del interruptor de seguridad automático permitió que el tanque 912 se llenara a más del doble que en funcionamiento normal, se determinó que el tanque había sido sometido a una sobrepresión de líquido de 2,2 veces el valor operativo normal. Esta sobrepresión excesiva aparentemente contribuyó a la formación de una nube de vapor en condiciones de viento estable, así como la posterior explosión de la nube. El efecto de la sobrepresión se sintió hasta a 2 km del centro de la explosión, no hubo víctimas mortales. (Mishra <i>et al.</i>, 2012; Sharma <i>et al.</i>, 2019)</p>	<p>La sobrepresión del líquido generó una nube de vapor y su consiguiente explosión, dejando rastros de compuestos tóxicos y su explosión generó una sobrepresión aún mayor que la que había inicialmente, provocando en las personas falta de aire, daños pulmonares y problemas auditivos. Afortunadamente estos efectos no causaron muertes, pero si lesiones graves y leves.</p>
<p>23 de octubre de 2009</p>	<p><i>Caribbean Petroleum Corp.</i> en Bayamon, EE. UU</p>	<p>Un tanque de almacenamiento de gasolina se desbordó durante 26 minutos, lo que resultó en una nube de vapor de 370 m de radio que posteriormente se encendió y resultó en fuertes sobrepresiones de explosión, el fuego relámpago se propagó en</p>	<p>El desbordamiento provocó una nube que dejó rastros de gases tóxicos, al incendiarse generó una sobrepresión que trajo consigo gran liberación de calor y energía contribuyendo a la propagación del fuego. El efecto del calor, la</p>

		<p>dirección al este y se aceleró a medida que ardía alrededor de los recipientes de GLP. Después, la llama se desaceleró a medida que emergía de la región del recipiente, pero luego se aceleró al pasar unos segundos. Resultó en una gran explosión. (Mishra <i>et al.</i>, 2012; Sharma <i>et al.</i>, 2019)</p>	<p>sobrepresión y la liberación de gases tóxicos pudieron causar sobre las personas náuseas, dificultad al respirar, daños pulmonares y auditivos y daños en órganos sensibles.</p>
<p>2 al 3 de diciembre de 1984</p>	<p><i>Union Carbide India Limited (UCIL)</i> en Bhopal, India</p>	<p>En la madrugada del 2 al 3 de diciembre el agua entró en una tubería corroída introduciéndose a su vez en el tanque E610, que tenía 42 toneladas de isocianato de metilo (MIC). Se inició una reacción descontrolada que se aceleró por la presencia de hierro que contenía el agua por la corrosión de las tuberías, por contaminantes, altas temperaturas y otros factores. Aumentó la temperatura dentro del tanque a más de 200 ° C y se elevó la presión; forzándose la salida de presión de emergencia del tanque de retención de MIC, liberando un gran volumen de gases tóxicos (30 toneladas de isocianato de metilo) a la atmósfera en 45 a 60 minutos. (Mittal, 2015; Naderpoura <i>et al.</i>, 2015; Trivedi <i>et al.</i>, 2014, Oct-Dec )</p>	<p>La liberación de grandes cantidades de la sustancia (MIC) provocó un ambiente altamente tóxico para los seres vivos, debido a la inhalación excesiva de MIC las personas presentaron síntomas de irritación, sensación de asfixia, ardor en vías respiratorias; las principales causas de muerte fueron asfixia y edema pulmonar.</p>

Anexo 2: Caracterización de los tanques del área estudiada.

Tanque	Sustancia almacenada	Capacidad nominal (m <sup>3</sup> )	Diámetro del tanque (m)	Altura operacional (m)	Diámetro de la tubería (m)	
					Entrada	Salida
1	Diésel	8 542	35	6,700	0,3048	0,2032
4	Diésel	11 320	34,2	10,800	0,3048	0,2032
24	Diésel	11 331	34,2	10,600	0,3048	0,2032
25	Diésel	11 381	34,2	10,600	0,3048	0,2032
26	Diésel	11 569	34,2	10,600	0,3048	0,3048
18	Gasolina de Aviación	2 220	15,5	10,500	0,2032	0,1524
19	Gasolina de Aviación	774	10,2	8,000	0,1524	0,1524
20	Gasolina de Aviación	341	7,57	6,620	0,1524	0,1524
21	Gasolina de Aviación	1 068	10,4	11,300	0,1524	0,1524
74	Gasolina de Aviación	2 259	15,2	10,500	0,1524	0,1524
13	Turbo Combustible	10 194	36,5	9,180	0,3048	0,3048
22	Turbo Combustible	11 452	34,2	10,700	0,3048	0,3048
23	Turbo Combustible	11 513	34,2	10,600	0,3048	0,3048
16	Nafta	4 909	22,8	10,600	0,254	0,254
17	Nafta	4 985	22,0	10,600	0,3048	0,2032
30	<i>Fuel Oil</i>	10 914	34,2	10,500	0,6096	0,4064
38	<i>Fuel Oil</i>	10 919	34,2	10,600	0,3556	0,3048

Anexo 3: Pasos para elaborar las redes Bayesianas de probabilidades.



Anexo 4: Tablas de probabilidades para definir los nodos Li y DLi.

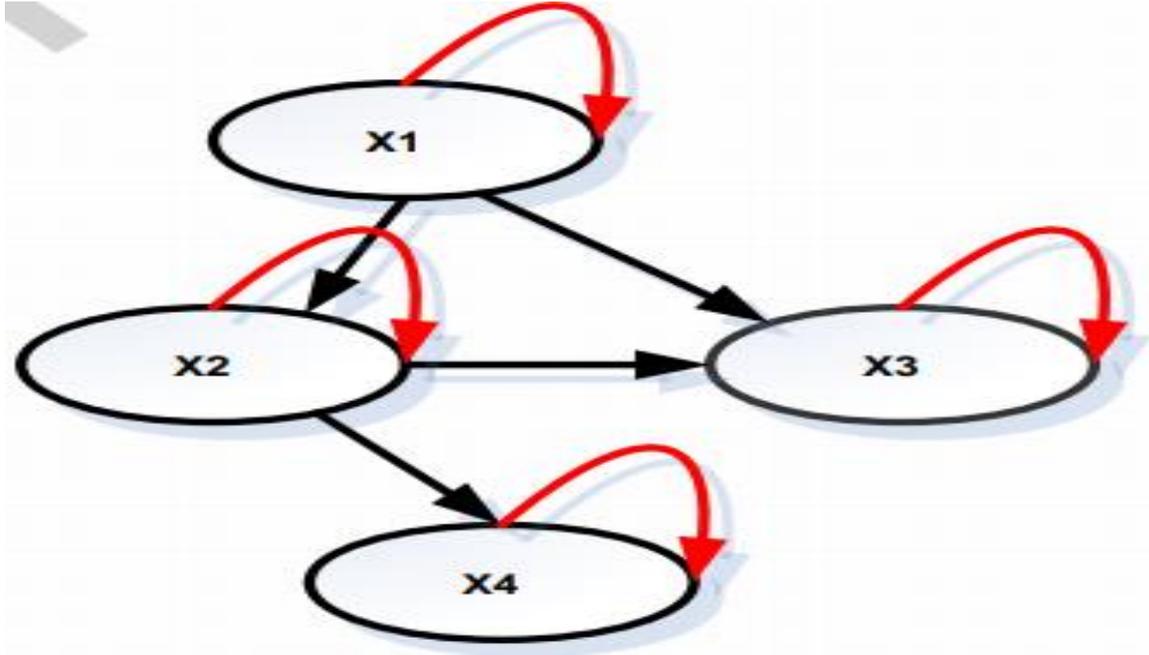
**Tabla de probabilidad para definir los nodos Li**

Unidades íésimas		P (Li/Xi1, Xi2)	
Xi1	Xi2	Accidente	Seguro
Accidente	Accidente	1	0
Accidente	Seguro	1	0
Seguro	Accidente	1	0
Seguro	Seguro	0	1

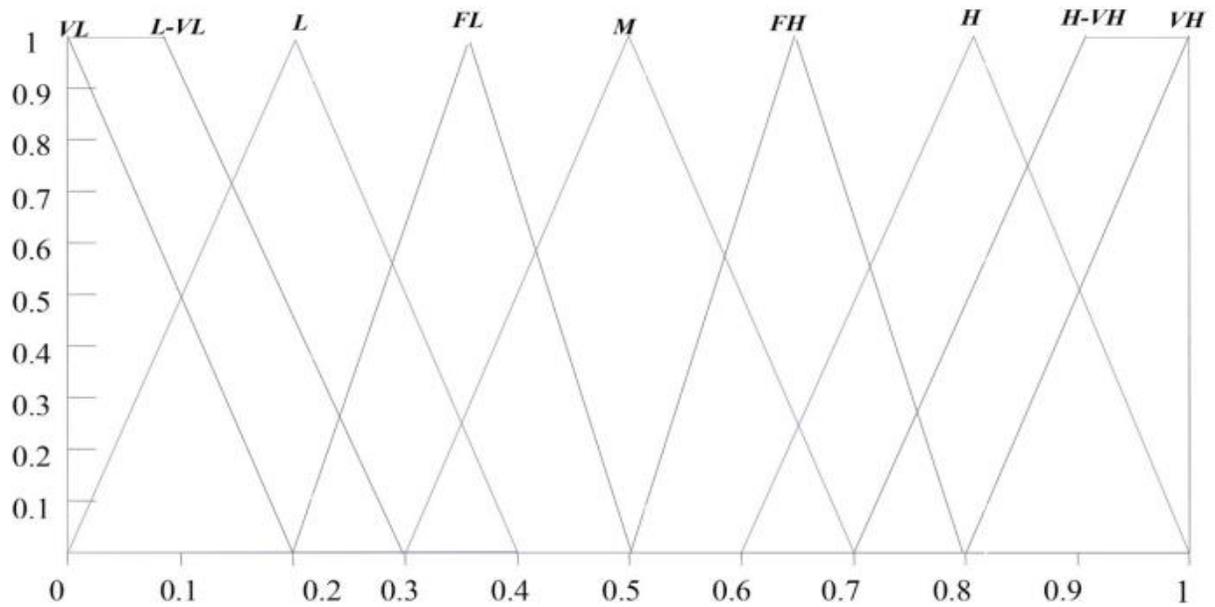
**Tabla de probabilidad para definir los nodos DLi**

Nodos		P (DLi/X1, L1)	
Unidad Primaria X1	Li	Accidente	Seguro
Accidente	Accidente	1	0
Accidente	Seguro	0	1
Seguro	Accidente	0	1
Seguro	Seguro	0	1

Anexo 5: Estructura de una red Bayesiana dinámica en forma abstracta.



Anexo 6: Escala de conversión seleccionada para estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento.



Anexo 7: Resultados de las corridas de ALOHA para el escenario charco de fuego.

TK 1					
TK.AF	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Tiempo del accidente (s)
	DIA		NOCHE		
4	TMAX NE	7,43	C.TMAX	5,88	3600
	TMIN NE	7,91	C.TMIN	6,25	3600
13	TMAX NE	1,44	C.TMAX	1,34	3600
	TMIN NE	1,51	C.TMIN	1,42	3600
16	TMAX NE	3,1	C.TMAX	2,7	3600
	TMIN NE	3,27	C.TMIN	2,86	3600
17	TMAX NE	6,19	C.TMAX	5	3600
	TMIN NE	6,58	C.TMIN	5,32	3600
18	TMAX NE	1,52	C.TMAX	1,4	3600
	TMIN NE	1,6	C.TMIN	1,49	3600
19	TMAX NE	1,11	C.TMAX	1,05	3600
	TMIN NE	1,16	C.TMIN	1,11	3600
20	TMAX NE	1,13	C.TMAX	1,07	3600
	TMIN NE	1,19	C.TMIN	1,13	3600
21	TMAX NE	1,07	C.TMAX	1,01	3600
	TMIN NE	1,12	C.TMIN	1,07	3600
22	TMAX NE	0,80	C.TMAX	0,77	3600
	TMIN NE	0,84	C.TMIN	0,82	3600
23	TMAX NE	0,51	C.TMAX	0,50	3600
	TMIN NE	0,53	C.TMIN	0,53	3600
24	TMAX NE	0,56	C.TMAX	0,55	3600
	TMIN NE	0,59	C.TMIN	0,58	3600
25	TMAX NE	0,90	C.TMAX	0,86	3600
	TMIN NE	0,95	C.TMIN	0,91	3600
26	TMAX NE	1,94	C.TMAX	1,76	3600

	TMIN NE	2,04	C.TMIN	1,86	3600
30	TMAX NE	4,18	C.TMAX	3,53	3600
	TMIN NE	4,42	C.TMIN	3,75	3600
38	TMAX NE	1,52	C.TMAX	1,4	3600
	TMIN NE	1,6	C.TMIN	1,49	3600
74	TMAX NE	1,06	C.TMAX	1	3600
	TMIN NE	1,11	C.TMIN	1,06	3600

TK 4					
TK.AF	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Tiempo del accidente (s)
	DIA		NOCHE		
1	TMAX NE	7,43	C.TMAX	5,88	3600
	TMIN NE	7,91	C.TMIN	6,25	3600
13	TMAX NE	1,88	C.TMAX	1,71	3600
	TMIN NE	1,98	C.TMIN	1,81	3600
16	TMAX NE	4,88	C.TMAX	4,05	3600
	TMIN NE	5,17	C.TMIN	4,3	3600
17	TMAX NE	4,18	C.TMAX	3,53	3600
	TMIN NE	4,42	C.TMIN	3,75	3600
18	TMAX NE	3,93	C.TMAX	3,34	3600
	TMIN NE	4,15	C.TMIN	3,54	3600
19	TMAX NE	2,83	C.TMAX	2,49	3600
	TMIN NE	2,99	C.TMIN	2,64	3600
20	TMAX NE	2,46	C.TMAX	2,19	3600
	TMIN NE	2,59	C.TMIN	2,32	3600
21	TMAX NE	1,85	C.TMAX	1,69	3600
	TMIN NE	1,95	C.TMIN	1,79	3600
22	TMAX NE	0,94	C.TMAX	0,90	3600
	TMIN NE	0,99	C.TMIN	0,95	3600
23	TMAX NE	0,56	C.TMAX	0,55	3600

	TMIN NE	0,59	C.TMIN	0,58	3600
24	TMAX NE	0,51	C.TMAX	0,50	3600
	TMIN NE	0,54	C.TMIN	0,53	3600
25	TMAX NE	0,83	C.TMAX	0,8	3600
	TMIN NE	0,87	C.TMIN	0,84	3600
26	TMAX NE	1,58	C.TMAX	1,46	3600
	TMIN NE	1,66	C.TMIN	1,55	3600
30	TMAX NE	1,35	C.TMAX	1,26	3600
	TMIN NE	1,42	C.TMIN	1,33	3600
38	TMAX NE	0,84	C.TMAX	0,80	3600
	TMIN NE	0,88	C.TMIN	0,85	3600
74	TMAX NE	1,96	C.TMAX	1,78	3600
	TMIN NE	2,07	C.TMIN	1,89	3600

TK 13					
TK.AF	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Tiempo del accidente (s)
	DIA		NOCHE		
1	TMAX SE	1,36	C.TMAX	1,34	3600
	TMIN SE	1,42	C.TMIN	1,42	3600
4	TMAX SE	1,74	C.TMAX	1,72	3600
	TMIN SE	1,82	C.TMIN	1,82	3600
16	TMAX SE	12,6	C.TMAX	12,1	3600
	TMIN SE	12,9	C.TMIN	12,9	3600
17	TMAX SE	5,69	C.TMAX	5,53	3600
	TMIN SE	5,88	C.TMIN	5,88	3600
18	TMAX SE	5,69	C.TMAX	5,53	3600
	TMIN SE	5,88	C.TMIN	5,88	3600
19	TMAX SE	3,57	C.TMAX	3,49	3600
	TMIN SE	3,7	C.TMIN	3,7	3600
20	TMAX SE	8,81	C.TMAX	8,52	3600

	TMIN SE	9,07	C.TMIN	9,07	3600
21	TMAX SE	9,88	C.TMAX	9,53	3600
	TMIN SE	10,2	C.TMIN	10,2	3600
22	TMAX SE	14,4	C.TMAX	13,8	3600
	TMIN SE	14,7	C.TMIN	14,7	3600
23	TMAX SE	3,78	C.TMAX	3,7	3600
	TMIN SE	3,92	C.TMIN	3,92	3600
24	TMAX SE	2,68	C.TMAX	2,63	3600
	TMIN SE	2,78	C.TMIN	2,78	3600
25	TMAX SE	5,83	C.TMAX	5,67	3600
	TMIN SE	6,02	C.TMIN	6,02	3600
26	TMAX SE	9,33	C.TMAX	9	3600
	TMIN SE	9,59	C.TMIN	9,59	3600
30	TMAX SE	1,25	C.TMAX	1,23	3600
	TMIN SE	1,3	C.TMIN	1,3	3600
38	TMAX SE	1,67	C.TMAX	1,65	3600
	TMIN SE	1,74	C.TMIN	1,74	3600
74	TMAX SE	9,6	C.TMAX	9,26	3600
	TMIN SE	9,87	C.TMIN	9,87	3600

TK 16					
TK.AF	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Tiempo del accidente (s)
	DIA		NOCHE		
1	TMAX ENE	2,08	C.TMAX	1,85	3600
	TMIN ENE	2,2	C.TMIN	1,96	3600
4	TMAX ENE	3,24	C.TMAX	2,77	3600
	TMIN ENE	3,44	C.TMIN	2,95	3600
13	TMAX ENE	10,9	C.TMAX	8,16	3600
	TMIN ENE	11,8	C.TMIN	8,74	3600
17	TMAX ENE	11,7	C.TMAX	8,7	3600

	TMIN ENE	12,7	C.TMIN	9,33	3600
18	TMAX ENE	8,85	C.TMAX	6,79	3600
	TMIN ENE	9,54	C.TMIN	7,26	3600
19	TMAX ENE	4,1	C.TMAX	3,42	3600
	TMIN ENE	4,36	C.TMIN	3,64	3600
20	TMAX ENE	6,67	C.TMAX	5,28	3600
	TMIN ENE	7,15	C.TMIN	5,64	3600
21	TMAX ENE	6,11	C.TMAX	4,89	3600
	TMIN ENE	6,54	C.TMIN	5,21	3600
22	TMAX ENE	2,62	C.TMAX	2,28	3600
	TMIN ENE	2,78	C.TMIN	2,43	3600
23	TMAX ENE	1,12	C.TMAX	1,04	3600
	TMIN ENE	1,18	C.TMIN	1,1	3600
24	TMAX ENE	0,92	C.TMAX	0,87	3600
	TMIN ENE	0,97	C.TMIN	0,92	3600
25	TMAX ENE	2,04	C.TMAX	1,82	3600
	TMIN ENE	2,16	C.TMIN	1,93	3600
26	TMAX ENE	5,17	C.TMAX	4,21	3600
	TMIN ENE	5,51	C.TMIN	4,48	3600
30	TMAX ENE	1,12	C.TMAX	1,04	3600
	TMIN ENE	1,18	C.TMIN	1,1	3600
38	TMAX ENE	1,12	C.TMAX	1,04	3600
	TMIN ENE	1,18	C.TMIN	1,1	3600
74	TMAX ENE	2,79	C.TMAX	2,42	3600
	TMIN ENE	2,96	C.TMIN	2,57	3600

TK 17					
TK.AF	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Tiempo del accidente (s)
	DIA		NOCHE		
1	TMAX ENE	6,31	C.TMAX	4,85	3600

	TMIN ENE	6,68	C.TMIN	5,17	3600
4	TMAX ENE	4,22	C.TMAX	3,44	3600
	TMIN ENE	4,45	C.TMIN	3,66	3600
13	TMAX ENE	7,01	C.TMAX	5,3	3600
	TMIN ENE	7,43	C.TMIN	5,65	3600
16	TMAX ENE	18,6	C.TMAX	12,1	3600
	TMIN ENE	20,2	C.TMIN	12,9	3600
18	TMAX ENE	3,23	C.TMAX	2,73	3600
	TMIN ENE	3,4	C.TMIN	2,9	3600
19	TMAX ENE	1,95	C.TMAX	1,75	3600
	TMIN ENE	2,05	C.TMIN	1,86	3600
20	TMAX ENE	2,68	C.TMAX	2,32	3600
	TMIN ENE	2,81	C.TMIN	2,46	3600
21	TMAX ENE	2,63	C.TMAX	2,28	3600
	TMIN ENE	2,76	C.TMIN	2,43	3600
22	TMAX ENE	2,49	C.TMAX	2,18	3600
	TMIN ENE	2,62	C.TMIN	2,31	3600
23	TMAX ENE	1,24	C.TMAX	1,17	3600
	TMIN ENE	1,3	C.TMIN	1,24	3600
24	TMAX ENE	1,4	C.TMAX	1,3	3600
	TMIN ENE	1,47	C.TMIN	1,38	3600
25	TMAX ENE	3,29	C.TMAX	2,78	3600
	TMIN ENE	3,46	C.TMIN	2,95	3600
26	TMAX ENE	14,6	C.TMAX	9,77	3600
	TMIN ENE	15,7	C.TMIN	10,5	3600
30	TMAX ENE	4,83	C.TMAX	3,86	3600
	TMIN ENE	5,1	C.TMIN	4,11	3600
38	TMAX ENE	3,56	C.TMAX	2,98	3600
	TMIN ENE	3,75	C.TMIN	3,17	3600
74	TMAX ENE	2,63	C.TMAX	2,28	3600

	TMIN ENE	2,76	C.TMIN	2,43	3600
--	----------	------	--------	------	------

TK 18					
TK.AF	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Tiempo del accidente (s)
	DIA		NOCHE		
1	TMAX ENE	0,60	C.TMAX	0,62	3600
	TMIN ENE	0,63	C.TMIN	0,66	3600
4	TMAX ENE	1,62	C.TMAX	1,49	3600
	TMIN ENE	1,7	C.TMIN	1,58	3600
13	TMAX ENE	2,95	C.TMAX	2,47	3600
	TMIN ENE	3,08	C.TMIN	2,62	3600
16	TMAX ENE	6,33	C.TMAX	4,57	3600
	TMIN ENE	6,64	C.TMIN	4,87	3600
17	TMAX ENE	1,32	C.TMAX	1,25	3600
	TMIN ENE	1,38	C.TMIN	1,32	3600
19	TMAX ENE	33,2	C.TMAX	17,5	3600
	TMIN ENE	36,1	C.TMIN	18,8	3600
20	TMAX ENE	41,5	C.TMAX	21,8	3600
	TMIN ENE	45,3	C.TMIN	23,5	3600
21	TMAX ENE	14,1	C.TMAX	8,54	3600
	TMIN ENE	15	C.TMIN	9,14	3600
22	TMAX ENE	1,11	C.TMAX	1,07	3600
	TMIN ENE	1,16	C.TMIN	1,14	3600
23	TMAX ENE	0,53	C.TMAX	0,55	3600
	TMIN ENE	0,55	C.TMIN	0,58	3600
24	TMAX ENE	0,36	C.TMAX	0,38	3600
	TMIN ENE	0,37	C.TMIN	0,40	3600
25	TMAX ENE	0,58	C.TMAX	0,60	3600
	TMIN ENE	0,61	C.TMIN	0,63	3600
26	TMAX ENE	0,90	C.TMAX	0,89	3600

	TMIN ENE	0,94	C.TMIN	0,94	3600
30	TMAX ENE	0,32	C.TMAX	0,34	3600
	TMIN ENE	0,33	C.TMIN	0,36	3600
38	TMAX ENE	0,30	C.TMAX	0,33	3600
	TMIN ENE	0,32	C.TMIN	0,35	3600
74	TMAX ENE	3,74	C.TMAX	3,01	3600
	TMIN ENE	3,91	C.TMIN	3,19	3600

TK 19					
TK.AF	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Tiempo del accidente (s)
	DIA		NOCHE		
1	TMAX ESE	0,25	C.TMAX	0,26	3600
	TMIN ESE	0,29	C.TMIN	0,27	3600
4	TMAX ESE	0,63	C.TMAX	0,62	3600
	TMIN ESE	0,75	C.TMIN	0,66	3600
13	TMAX ESE	0,92	C.TMAX	0,88	3600
	TMIN ESE	1,09	C.TMIN	0,93	3600
16	TMAX ESE	1,42	C.TMAX	1,28	3600
	TMIN ESE	1,67	C.TMIN	1,36	3600
17	TMAX ESE	0,44	C.TMAX	0,44	3600
	TMIN ESE	0,52	C.TMIN	0,47	3600
18	TMAX ESE	18,7	C.TMAX	10,9	3600
	TMIN ESE	23,8	C.TMIN	11,7	3600
20	TMAX ESE	20	C.TMAX	11,5	3600
	TMIN ESE	25,5	C.TMIN	12,4	3600
21	TMAX ESE	5,46	C.TMAX	3,99	3600
	TMIN ESE	6,5	C.TMIN	4,24	3600
22	TMAX ESE	0,48	C.TMAX	0,49	3600
	TMIN ESE	0,57	C.TMIN	0,51	3600
23	TMAX ESE	0,26	C.TMAX	0,27	3600

	TMIN ESE	0,31	C.TMIN	0,29	3600
24	TMAX ESE	0,17	C.TMAX	0,18	3600
	TMIN ESE	0,20	C.TMIN	0,19	3600
25	TMAX ESE	0,24	C.TMAX	0,25	3600
	TMIN ESE	0,29	C.TMIN	0,27	3600
26	TMAX ESE	0,34	C.TMAX	0,35	3600
	TMIN ESE	0,41	C.TMIN	0,37	3600
30	TMAX ESE	0,13	C.TMAX	0,15	3600
	TMIN ESE	0,16	C.TMIN	0,16	3600
38	TMAX ESE	0,13	C.TMAX	0,15	3600
	TMIN ESE	0,16	C.TMIN	0,15	3600
74	TMAX ESE	2,57	C.TMAX	2,14	3600
	TMIN ESE	3,02	C.TMIN	2,27	3600

TK 20

TK.AF	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Tiempo del accidente (s)
	DIA		NOCHE		
1	TMAX SE	0,27	C.TMAX	0,26	3600
	TMIN SE	0,28	C.TMIN	0,28	3600
4	TMAX SE	0,57	C.TMAX	0,55	3600
	TMIN SE	0,6	C.TMIN	0,58	3600
13	TMAX SE	2,4	C.TMAX	2,2	3600
	TMIN SE	2,77	C.TMIN	2,34	3600
16	TMAX SE	2,2	C.TMAX	2,02	3600
	TMIN SE	2,51	C.TMIN	2,15	3600
17	TMAX SE	0,62	C.TMAX	0,59	3600
	TMIN SE	0,65	C.TMIN	0,63	3600
18	TMAX SE	16,2	C.TMAX	13,7	3600
	TMIN SE	23,4	C.TMIN	14,8	3600
19	TMAX SE	13,5	C.TMAX	11,5	3600
	TMIN SE	19,3	C.TMIN	12,4	3600

21	TMAX SE	25,9	C.TMAX	22	3600
	TMIN SE	37,8	C.TMIN	23,7	3600
22	TMAX SE	0,92	C.TMAX	0,88	3600
	TMIN SE	0,99	C.TMIN	0,93	3600
23	TMAX SE	0,43	C.TMAX	0,42	3600
	TMIN SE	0,45	C.TMIN	0,45	3600
24	TMAX SE	0,28	C.TMAX	0,27	3600
	TMIN SE	0,29	C.TMIN	0,29	3600
25	TMAX SE	0,40	C.TMAX	0,39	3600
	TMIN SE	0,41	C.TMIN	0,41	3600
26	TMAX SE	0,57	C.TMAX	0,55	3600
	TMIN SE	0,6	C.TMIN	0,58	3600
30	TMAX SE	0,18	C.TMAX	0,17	3600
	TMIN SE	0,18	C.TMIN	0,18	3600
38	TMAX SE	0,19	C.TMAX	0,18	3600
	TMIN SE	0,19	C.TMIN	0,19	3600
74	TMAX SE	4,3	C.TMAX	3,84	3600
	TMIN SE	5,3	C.TMIN	4,09	3600

TK 21					
TK.AF	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Tiempo del accidente (s)
	DIA		NOCHE		
1	TMAX S	0,26	C.TMAX	0,25	3600
	TMIN S	0,27	C.TMIN	0,27	3600
4	TMAX S	0,43	C.TMAX	0,42	3600
	TMIN S	0,46	C.TMIN	0,45	3600
13	TMAX S	2,7	C.TMAX	2,48	3600
	TMIN S	2,92	C.TMIN	2,64	3600
16	TMAX S	2	C.TMAX	1,86	3600
	TMIN S	2,16	C.TMIN	1,98	3600

17	TMAX S	0,61	C.TMAX	0,58	3600
	TMIN S	0,65	C.TMIN	0,62	3600
18	TMAX S	5,66	C.TMAX	5,05	3600
	TMIN S	6,21	C.TMIN	5,38	3600
19	TMAX S	4,43	C.TMAX	3,99	3600
	TMIN S	4,83	C.TMIN	4,24	3600
20	TMAX S	25,4	C.TMAX	22	3600
	TMIN S	28,7	C.TMIN	23,7	3600
22	TMAX S	1,36	C.TMAX	1,28	3600
	TMIN S	1,46	C.TMIN	1,36	3600
23	TMAX S	0,56	C.TMAX	0,54	3600
	TMIN S	0,6	C.TMIN	0,57	3600
24	TMAX S	0,31	C.TMAX	0,30	3600
	TMIN S	0,33	C.TMIN	0,32	3600
25	TMAX S	0,46	C.TMAX	0,44	3600
	TMIN S	0,49	C.TMIN	0,47	3600
26	TMAX S	0,63	C.TMAX	0,60	3600
	TMIN S	0,67	C.TMIN	0,64	3600
30	TMAX S	0,17	C.TMAX	0,16	3600
	TMIN S	0,18	C.TMIN	0,17	3600
38	TMAX S	0,19	C.TMAX	0,19	3600
	TMIN S	0,211	C.TMIN	0,20	3600
74	TMAX S	7,8	C.TMAX	6,87	3600
	TMIN S	8,64	C.TMIN	7,34	3600

TK 22					
TK.AF	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Tiempo del accidente (s)
	DIA		NOCHE		
1	TMAX SW	0,77	C.TMAX	0,77	3600
	TMIN SW	0,82	C.TMIN	0,82	3600

4	TMAX SW	0,90	C.TMAX	0,90	3600
	TMIN SW	0,95	C.TMIN	0,95	3600
13	TMAX SW	13,8	C.TMAX	13,8	3600
	TMIN SW	14,7	C.TMIN	14,7	3600
16	TMAX SW	3,36	C.TMAX	3,36	3600
	TMIN SW	3,56	C.TMIN	3,56	3600
17	TMAX SW	2,23	C.TMAX	2,23	3600
	TMIN SW	2,37	C.TMIN	2,37	3600
18	TMAX SW	2,42	C.TMAX	2,42	3600
	TMIN SW	2,56	C.TMIN	2,56	3600
19	TMAX SW	1,95	C.TMAX	1,95	3600
	TMIN SW	2,07	C.TMIN	2,07	3600
20	TMAX SW	3,49	C.TMAX	3,49	3600
	TMIN SW	3,7	C.TMIN	3,7	3600
21	TMAX SW	5,05	C.TMAX	5,05	3600
	TMIN SW	5,36	C.TMIN	5,36	3600
23	TMAX SW	14,7	C.TMAX	14,7	3600
	TMIN SW	15,8	C.TMIN	15,8	3600
24	TMAX SW	5,53	C.TMAX	5,53	3600
	TMIN SW	5,88	C.TMIN	5,88	3600
25	TMAX SW	8,75	C.TMAX	8,75	3600
	TMIN SW	9,33	C.TMIN	9,33	3600
26	TMAX SW	5,17	C.TMAX	5,17	3600
	TMIN SW	5,49	C.TMIN	5,49	3600
30	TMAX SW	0,85	C.TMAX	0,85	3600
	TMIN SW	0,91	C.TMIN	0,91	3600
38	TMAX SW	1,37	C.TMAX	1,37	3600
	TMIN SW	1,45	C.TMIN	1,45	3600
74	TMAX SW	4,83	C.TMAX	4,83	3600
	TMIN SW	5,13	C.TMIN	5,13	3600

TK 23					
TK.AF	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Tiempo del accidente (s)
	DIA		NOCHE		
1	TMAX W	0,50	C.TMAX	0,50	3600
	TMIN W	0,53	C.TMIN	0,53	3600
4	TMAX W	0,55	C.TMAX	0,55	3600
	TMIN W	0,58	C.TMIN	0,58	3600
13	TMAX W	3,7	C.TMAX	3,7	3600
	TMIN W	3,92	C.TMIN	3,92	3600
16	TMAX W	1,52	C.TMAX	1,52	3600
	TMIN W	1,61	C.TMIN	1,61	3600
17	TMAX W	1,19	C.TMAX	1,19	3600
	TMIN W	1,26	C.TMIN	1,26	3600
18	TMAX W	1,25	C.TMAX	1,25	3600
	TMIN W	1,32	C.TMIN	1,32	3600
19	TMAX W	1,1	C.TMAX	1,1	3600
	TMIN W	1,16	C.TMIN	1,16	3600
20	TMAX W	1,69	C.TMAX	1,69	3600
	TMIN W	1,79	C.TMIN	1,79	3600
21	TMAX W	2,17	C.TMAX	2,17	3600
	TMIN W	2,3	C.TMIN	2,3	3600
22	TMAX W	14,7	C.TMAX	14,7	3600
	TMIN W	15,8	C.TMIN	15,8	3600
24	TMAX W	8,75	C.TMAX	8,75	3600
	TMIN W	9,33	C.TMIN	9,33	3600
25	TMAX W	5,53	C.TMAX	5,53	3600
	TMIN W	5,88	C.TMIN	5,88	3600
26	TMAX W	2,38	C.TMAX	2,38	3600
	TMIN W	2,52	C.TMIN	2,52	3600

30	TMAX W	0,60	C.TMAX	0,60	3600
	TMIN W	0,64	C.TMIN	0,64	3600
38	TMAX W	1,03	C.TMAX	1,03	3600
	TMIN W	1,09	C.TMIN	1,09	3600
74	TMAX W	2,17	C.TMAX	2,17	3600
	TMIN W	2,3	C.TMIN	2,3	3600

TK 24					
TK.AF	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Tiempo del accidente (s)
	DIA		NOCHE		
1	TMAX WNW	0,55	C.TMAX	0,55	3600
	TMIN WNW	0,58	C.TMIN	0,58	3600
4	TMAX WNW	0,50	C.TMAX	0,50	3600
	TMIN WNW	0,53	C.TMIN	0,53	3600
13	TMAX WNW	2,61	C.TMAX	2,61	3600
	TMIN WNW	2,77	C.TMIN	2,77	3600
16	TMAX WNW	1,27	C.TMAX	1,27	3600
	TMIN WNW	1,35	C.TMIN	1,35	3600
17	TMAX WNW	1,32	C.TMAX	1,32	3600
	TMIN WNW	1,4	C.TMIN	1,4	3600
18	TMAX WNW	0,86	C.TMAX	0,86	3600
	TMIN WNW	0,91	C.TMIN	0,91	3600
19	TMAX WNW	0,72	C.TMAX	0,72	3600
	TMIN WNW	0,77	C.TMIN	0,77	3600
20	TMAX WNW	1,11	C.TMAX	1,11	3600
	TMIN WNW	1,17	C.TMIN	1,17	3600
21	TMAX WNW	1,21	C.TMAX	1,21	3600
	TMIN WNW	1,29	C.TMIN	1,29	3600
22	TMAX WNW	5,48	C.TMAX	5,48	3600
	TMIN WNW	5,83	C.TMIN	5,83	3600

23	TMAX WNW	8,63	C.TMAX	8,63	3600
	TMIN WNW	9,21	C.TMIN	9,21	3600
25	TMAX WNW	13,1	C.TMAX	13,1	3600
	TMIN WNW	14	C.TMIN	14	3600
26	TMAX WNW	3,34	C.TMAX	3,34	3600
	TMIN WNW	3,54	C.TMIN	3,54	3600
30	TMAX WNW	0,86	C.TMAX	0,86	3600
	TMIN WNW	0,91	C.TMIN	0,91	3600
38	TMAX WNW	1,89	C.TMAX	1,89	3600
	TMIN WNW	2	C.TMIN	2	3600
74	TMAX WNW	1,24	C.TMAX	1,24	3600
	TMIN WNW	1,32	C.TMIN	1,32	3600

TK 25					
TK.AF	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Tiempo del accidente (s)
	DIA		NOCHE		
1	TMAX NW	0,38	C.TMAX	0,38	3600
	TMIN NW	0,40	C.TMIN	0,41	3600
4	TMAX NW	0,35	C.TMAX	0,35	3600
	TMIN NW	0,37	C.TMIN	0,38	3600
13	TMAX NW	3,01	C.TMAX	2,56	3600
	TMIN NW	3,18	C.TMIN	2,71	3600
16	TMAX NW	1,29	C.TMAX	1,19	3600
	TMIN NW	1,36	C.TMIN	1,26	3600
17	TMAX NW	1,4	C.TMAX	1,28	3600
	TMIN NW	1,47	C.TMIN	1,36	3600
18	TMAX NW	0,62	C.TMAX	0,60	3600
	TMIN NW	0,65	C.TMIN	0,64	3600
19	TMAX NW	0,46	C.TMAX	0,45	3600
	TMIN NW	0,48	C.TMIN	0,48	3600

20	TMAX NW	0,72	C.TMAX	0,69	3600
	TMIN NW	0,76	C.TMIN	0,73	3600
21	TMAX NW	0,83	C.TMAX	0,79	3600
	TMIN NW	0,88	C.TMIN	0,84	3600
22	TMAX NW	3,67	C.TMAX	3,04	3600
	TMIN NW	3,87	C.TMIN	3,23	3600
23	TMAX NW	2,93	C.TMAX	2,5	3600
	TMIN NW	3,09	C.TMIN	2,65	3600
24	TMAX NW	8,38	C.TMAX	6,24	3600
	TMIN NW	8,94	C.TMIN	6,65	3600
26	TMAX NW	7,44	C.TMAX	5,63	3600
	TMIN NW	7,92	C.TMIN	5,99	3600
30	TMAX NW	0,66	C.TMAX	0,64	3600
	TMIN NW	0,70	C.TMIN	0,68	3600
38	TMAX NW	1,67	C.TMAX	1,51	3600
	TMIN NW	1,76	C.TMIN	1,6	3600
74	TMAX NW	0,87	C.TMAX	0,83	3600
	TMIN NW	0,92	C.TMIN	0,88	3600

TK 26					
TK.AF	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Tiempo del accidente (s)
	DIA		NOCHE		
1	TMAX SW	1,76	C.TMAX	1,76	3600
	TMIN SW	1,86	C.TMIN	1,86	3600
4	TMAX SW	1,46	C.TMAX	1,46	3600
	TMIN SW	1,55	C.TMIN	1,55	3600
13	TMAX SW	8,88	C.TMAX	8,88	3600
	TMIN SW	9,47	C.TMIN	9,47	3600
16	TMAX SW	6,17	C.TMAX	6,17	3600
	TMIN SW	6,56	C.TMIN	6,56	3600

17	TMAX SW	10,2	C.TMAX	10,2	3600
	TMIN SW	10,9	C.TMIN	10,9	3600
18	TMAX SW	2	C.TMAX	2	3600
	TMIN SW	2,12	C.TMIN	2,12	3600
19	TMAX SW	1,42	C.TMAX	1,42	3600
	TMIN SW	1,51	C.TMIN	1,51	3600
20	TMAX SW	2,19	C.TMAX	2,19	3600
	TMIN SW	2,32	C.TMIN	2,32	3600
21	TMAX SW	2,41	C.TMAX	2,41	3600
	TMIN SW	2,55	C.TMIN	2,55	3600
22	TMAX SW	5,12	C.TMAX	5,12	3600
	TMIN SW	5,44	C.TMIN	5,44	3600
23	TMAX SW	2,37	C.TMAX	2,37	3600
	TMIN SW	2,51	C.TMIN	2,51	3600
24	TMAX SW	3,34	C.TMAX	3,34	3600
	TMIN SW	3,54	C.TMIN	3,54	3600
25	TMAX SW	11,9	C.TMAX	11,9	3600
	TMIN SW	12,7	C.TMIN	12,7	3600
30	TMAX SW	2,7	C.TMAX	2,7	3600
	TMIN SW	2,86	C.TMIN	2,86	3600
38	TMAX SW	4,89	C.TMAX	4,89	3600
	TMIN SW	5,2	C.TMIN	5,2	3600
74	TMAX SW	2,37	C.TMAX	2,37	3600
	TMIN SW	2,51	C.TMIN	2,51	3600

TK 30					
TK.AF	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Tiempo del accidente (s)
	DIA		NOCHE		
1	TMAX NNW	6,25	C.TMAX	6,25	3600
	TMIN NNW	6,64	C.TMIN	6,64	3600

4	TMAX NNW	2,23	C.TMAX	2,23	3600
	TMIN NNW	2,36	C.TMIN	2,36	3600
13	TMAX NNW	2,18	C.TMAX	2,18	3600
	TMIN NNW	2,31	C.TMIN	2,31	3600
16	TMAX NNW	2,69	C.TMAX	2,69	3600
	TMIN NNW	2,85	C.TMIN	2,85	3600
17	TMAX NNW	7,02	C.TMAX	7,02	3600
	TMIN NNW	7,46	C.TMIN	7,46	3600
18	TMAX NNW	1,38	C.TMAX	1,38	3600
	TMIN NNW	1,46	C.TMIN	1,46	3600
19	TMAX NNW	1,06	C.TMAX	1,06	3600
	TMIN NNW	1,12	C.TMIN	1,12	3600
20	TMAX NNW	1,25	C.TMAX	1,25	3600
	TMIN NNW	1,33	C.TMIN	1,33	3600
21	TMAX NNW	1,18	C.TMAX	1,18	3600
	TMIN NNW	1,25	C.TMIN	1,25	3600
22	TMAX NNW	1,52	C.TMAX	1,52	3600
	TMIN NNW	1,61	C.TMIN	1,61	3600
23	TMAX NNW	1,07	C.TMAX	1,07	3600
	TMIN NNW	1,13	C.TMIN	1,13	3600
24	TMAX NNW	1,54	C.TMAX	1,54	3600
	TMIN NNW	1,63	C.TMIN	1,63	3600
25	TMAX NNW	2,56	C.TMAX	2,56	3600
	TMIN NNW	2,71	C.TMIN	2,71	3600
26	TMAX NNW	4,78	C.TMAX	4,78	3600
	TMIN NNW	5,07	C.TMIN	5,07	3600
38	TMAX NNW	11,6	C.TMAX	11,6	3600
	TMIN NNW	12,4	C.TMIN	12,4	3600
74	TMAX NNW	1,27	C.TMAX	1,27	3600
	TMIN NNW	1,34	C.TMIN	1,34	3600

TK 38					
TK.AF	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Tiempo del accidente (s)
	DIA		NOCHE		
1	TMAX NE	1,41	C.TMAX	1,41	3600
	TMIN NE	1,5	C.TMIN	1,49	3600
4	TMAX NE	0,80	C.TMAX	0,80	3600
	TMIN NE	0,85	C.TMIN	0,85	3600
13	TMAX NE	1,65	C.TMAX	1,65	3600
	TMIN NE	1,75	C.TMIN	1,74	3600
16	TMAX NE	1,52	C.TMAX	1,52	3600
	TMIN NE	1,62	C.TMIN	1,61	3600
17	TMAX NE	3,07	C.TMAX	3,07	3600
	TMIN NE	3,28	C.TMIN	3,25	3600
18	TMAX NE	0,74	C.TMAX	0,74	3600
	TMIN NE	0,78	C.TMIN	0,78	3600
19	TMAX NE	0,59	C.TMAX	0,59	3600
	TMIN NE	0,63	C.TMIN	0,63	3600
20	TMAX NE	0,74	C.TMAX	0,74	3600
	TMIN NE	0,78	C.TMIN	0,78	3600
21	TMAX NE	0,77	C.TMAX	0,77	3600
	TMIN NE	0,82	C.TMIN	0,82	3600
22	TMAX NE	1,37	C.TMAX	1,37	3600
	TMIN NE	1,46	C.TMIN	1,45	3600
23	TMAX NE	1,03	C.TMAX	1,03	3600
	TMIN NE	1,09	C.TMIN	1,09	3600
24	TMAX NE	1,89	C.TMAX	1,89	3600
	TMIN NE	2,02	C.TMIN	2,01	3600
25	TMAX NE	3,36	C.TMAX	3,36	3600
	TMIN NE	3,6	C.TMIN	3,56	3600

26	TMAX NE	4,94	C.TMAX	4,94	3600
	TMIN NE	5,31	C.TMIN	5,25	3600
30	TMAX NE	6,72	C.TMAX	6,72	3600
	TMIN NE	7,27	C.TMIN	7,14	3600
74	TMAX NE	0,78	C.TMAX	0,78	3600
	TMIN NE	0,83	C.TMIN	0,83	3600

TK 74					
TK.AF	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Condición Meteorológica	Intensidad Radiación (kW/m <sup>2</sup> )	Tiempo del accidente (s)
	DIA		NOCHE		
1	TMAX ESE	0,23	C.TMAX	0,25	3600
	TMIN ESE	0,24	C.TMIN	0,26	3600
4	TMAX ESE	0,43	C.TMAX	0,44	3600
	TMIN ESE	0,45	C.TMIN	0,47	3600
13	TMAX ESE	2,96	C.TMAX	2,41	3600
	TMIN ESE	3,1	C.TMIN	2,56	3600
16	TMAX ESE	0,93	C.TMAX	0,89	3600
	TMIN ESE	0,98	C.TMIN	0,95	3600
17	TMAX ESE	0,58	C.TMAX	0,58	3600
	TMIN ESE	0,61	C.TMIN	0,62	3600
18	TMAX ESE	1,98	C.TMAX	1,72	3600
	TMIN ESE	2,07	C.TMIN	1,82	3600
19	TMAX ESE	2,57	C.TMAX	2,14	3600
	TMIN ESE	2,69	C.TMIN	2,27	3600
20	TMAX ESE	5,26	C.TMAX	3,84	3600
	TMIN ESE	5,52	C.TMIN	4,09	3600
21	TMAX ESE	10,9	C.TMAX	6,87	3600
	TMIN ESE	11,6	C.TMIN	7,34	3600
22	TMAX ESE	1,34	C.TMAX	1,23	3600
	TMIN ESE	1,4	C.TMIN	1,3	3600

23	TMAX ESE	0,53	C.TMAX	0,54	3600
	TMIN ESE	0,56	C.TMIN	0,57	3600
24	TMAX ESE	0,29	C.TMAX	0,31	3600
	TMIN ESE	0,31	C.TMIN	0,33	3600
25	TMAX ESE	0,45	C.TMAX	0,46	3600
	TMIN ESE	0,47	C.TMIN	0,49	3600
26	TMAX ESE	0,59	C.TMAX	0,59	3600
	TMIN ESE	0,62	C.TMIN	0,63	3600
30	TMAX ESE	0,16	C.TMAX	0,18	3600
	TMIN ESE	0,17	C.TMIN	0,19	3600
38	TMAX ESE	0,18	C.TMAX	0,19	3600
	TMIN ESE	0,19	C.TMIN	0,21	3600

Anexo 8: Resultados de las corridas de ALOHA para el escenario BLEVE más bola de fuego.

Tanques	Diámetro de la bola de fuego (m)	Duración (s)	Distancias alcanzadas por las radiaciones (m)		
			Zona Roja 10 kW/m <sup>2</sup>	Zona Naranja 5 kW/m <sup>2</sup>	Zona Amarilla 2 kW/m <sup>2</sup>
1	960	42	1 900	2 700	4 100
4, 13, 22, 23, 24, 25, 26	992	43	1 900	2 700	4 300
16, 17	821	37	1 600	2 300	3 600
18, 74	632	30	1 300	1 800	2 800
19	449	23	920	1 300	2 000
20	341	19	709	1 000	1 600
21	504	26	1 000	1 400	2 300
30, 38	992	43	1 900	2 700	4 200

Anexo 9: Resultados de ALOHA para los escenarios de explosión de nube de vapor y nube tóxica.

TK 16										
TK AF	CM DIA	Sobrepresión (psi)			Concentración Nube Tóxica (ppm)					
		SP	NOCHE	SP	DIA	INT	EXT	NOCHE	INT	EXT
13	TMAX ENE	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX ENE	9 310	17 700	C.TMAX	180 000	743 000
	TMIN ENE	6,36	C.TMIN	6,36	TMIN ENE	6 440	13 200	C.TMIN	103 000	832 000
22	TMAX ENE	1,58	C.TMAX	6,36	TMAX ENE	4 300	8 310	C.TMAX	63 100	413 000
	TMIN ENE	1,16	C.TMIN	6,36	TMIN ENE	3 140	6 670	C.TMIN	26 000	400 000
23	TMAX ENE	0,87	C.TMAX	6,36	TMAX ENE	2 480	4 890	C.TMAX	14 600	106 000
	TMIN ENE	0,67	C.TMIN	6,36	TMIN ENE	1880	4 050	C.TMIN	5 110	83 200
24	TMAX E	0,88	C.TMAX	6,36	TMAX E	2 290	4 870	C.TMAX	11 000	81 800
	TMIN E	0,69	C.TMIN	6,36	TMIN E	1 710	4 020	C.TMIN	3 770	62 600
25	TMAX E	1,81	C.TMAX	6,36	TMAX E	3 880	8 120	C.TMAX	39 900	270 000
	TMIN E	1,13	C.TMIN	6,36	TMIN E	2 810	6 500	C.TMIN	15 400	239 000
20	TMAX N	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX N	9 160	22 100	C.TMAX	160 000	706 000
	TMIN N	6,36	C.TMIN	6,36	TMIN N	5 920	16 000	C.TMIN	84 600	792 000
21	TMAX N	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX N	8 720	21 100	C.TMAX	154 000	706 000
	TMIN N	6,36	C.TMIN	6,36	TMIN N	5 660	15 300	C.TMIN	80 200	792 000
18	TMAX NW	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX NW	10700	25 800	C.TMAX	172 000	712 000
	TMIN NW	6,36	C.TMIN	6,36	TMIN NW	6 850	18 300	C.TMIN	96 000	802 000
19	TMAX NW	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX NW	6 870	16 800	C.TMAX	121 000	706 000
	TMIN NW	6,36	C.TMIN	6,36	TMIN NW	4 540	12 500	C.TMIN	56 000	791 000
17	TMAX SSE	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX SSE	14100	36 400	C.TMAX	182 000	743 000
	TMIN SSE	6,36	C.TMIN	6,36	TMIN SSE	8 440	25 300	C.TMIN	105 000	832 000
30	TMAX SSE	2	C.TMAX	6,36	TMAX SSE	3 180	8 750	C.TMAX	14 600	106 000
	TMIN SSE	1,28	C.TMIN	6,36	TMIN SSE	2 140	7 010	C.TMIN	5 110	83 200

26	TMAX ESE	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX ESE	7 020	15 200	C.TMAX	143 000	706 000
	TMIN ESE	6,36	C.TMIN	6,36	TMIN ESE	4 890	11 900	C.TMIN	71 700	792 000
74	TMAX NNE	5,27	C.TMAX	6,36	TMAX NNE	4 880	10 600	C.TMAX	70 300	454 000
	TMIN NNE	1,61	C.TMIN	6,36	TMIN NNE	3 440	8 330	C.TMIN	29 400	452 000
38	TMAX SE	1,3	C.TMAX	6,36	TMAX SE	2 880	7 080	C.TMAX	14 600	106 000
	TMIN SE	1,02	C.TMIN	6,36	TMIN SE	2 040	5 700	C.TMIN	5 110	83 200
1	TMAX SSW	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX SSW	5 340	15 300	C.TMAX	41 400	279 000
	TMIN SSW	6,36	C.TMIN	6,36	TMIN SSW	3 390	11 900	C.TMIN	16 000	249 000
4	TMAX WSW	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX WSW	8 420	27 400	C.TMAX	89 700	564 000
	TMIN WSW	6,36	C.TMIN	6,36	TMIN WSW	4 900	20 100	C.TMIN	39 000	597 000

### TK 17

TK AF	CM DIA	Sobrepresión (psi)			Concentración Nube Tóxica (ppm)					
		SP	NOCHE	SP	DIA	INT	EXT	NOCHE	INT	EXT
24	TMAX ENE	1,11	C.TMAX	6,36	TMAX ENE	3 060	6 050	C.TMAX	21 300	148 000
	TMIN ENE	0,83	C.TMIN	6,36	TMIN ENE	2 300	4 960	C.TMIN	8 080	121 000
25	TMAX ENE	3,24	C.TMAX	6,36	TMAX ENE	5 150	10 000	C.TMAX	81 800	523 000
	TMIN ENE	1,47	C.TMIN	6,36	TMIN ENE	3 750	7 940	C.TMIN	36 900	502 000
26	TMAX ENE	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX ENE	10900	20 400	C.TMAX	186 000	707 000
	TMIN ENE	6,36	C.TMIN	6,36	TMIN ENE	7 490	15 200	C.TMIN	107 000	792 000
16	TMAX NNW	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX NNW	14800	32 200	C.TMAX	196 000	707 000
	TMIN NNW	6,36	C.TMIN	6,36	TMIN NNW	9 210	22 300	C.TMIN	112 000	832 000
18	TMAX NNW	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX NNW	6 020	13 800	C.TMAX	79 100	505 000
	TMIN NNW	5,66	C.TMIN	6,36	TMIN NNW	4 130	10 800	C.TMIN	35 600	484 000
19	TMAX NNW	3,21	C.TMAX	6,36	TMAX NNW	4 370	10 200	C.TMAX	35 000	231 000
	TMIN NNW	1,58	C.TMIN	6,36	TMIN NNW	3 060	8 090	C.TMIN	14 200	202 000
20	TMAX NNW	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX NNW	5 380	12 400	C.TMAX	57 200	365 000
	TMIN NNW	2,68	C.TMIN	6,36	TMIN NNW	3 720	9 740	C.TMIN	24 700	339 000

	NNW				NNW					
22	TMAX NE	2,54	C.TMAX	6,36	TMAX NE	4 770	10 200	C.TMAX	51 700	333 000
	TMIN NE	1,65	C.TMIN	6,36	TMIN NE	3 420	8 040	C.TMIN	22 100	306 000
23	TMAX NE	1,18	C.TMAX	6,36	TMAX NE	3 050	6 580	C.TMAX	18 000	127 000
	TMIN NE	0,93	C.TMIN	6,36	TMIN NE	2 250	5 370	C.TMIN	6 710	10 200
13	TMAX NNE	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX NNE	8 530	17 900	C.TMAX	160 000	705 000
	TMIN NNE	6,36	C.TMIN	6,36	TMIN NNE	5 800	13 600	C.TMIN	87 100	784 000
30	TMAX SSE	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX SSE	9 050	23 900	C.TMAX	130 000	705 000
	TMIN SSE	6,36	C.TMIN	6,36	TMIN SSE	5 720	18 000	C.TMIN	65 000	733 000
38	TMAX ESE	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX ESE	6 060	13 200	C.TMAX	92 200	592 000
	TMIN ESE	3,31	C.TMIN	6,36	TMIN ESE	4 200	10 300	C.TMIN	42 100	574 000
1	TMAX WSW	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX WSW	11300	35 400	C.TMAX	155 000	705 000
	TMIN WSW	6,36	C.TMIN	6,36	TMIN WSW	6 840	27 600	C.TMIN	83 000	784 000
4	TMAX W	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX W	7 880	21 900	C.TMAX	114 000	671 000
	TMIN W	6,36	C.TMIN	6,36	TMIN W	4 910	16 600	C.TMIN	55 100	676 000
74	TMAX N	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX N	5 630	13 700	C.TMAX	114 000	671 000
	TMIN N	6,36	C.TMIN	6,36	TMIN N	3 840	10 900	C.TMIN	24 100	330 000
21	TMAX N	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX N	5 630	13 700	C.TMAX	114 000	671 000
	TMIN N	6,36	C.TMIN	6,36	TMIN N	3 840	10 900	C.TMIN	24 100	330 000

### TK18

TK AF	CM DIA	Sobrepresión (psi)			Concentración Nube Tóxica (ppm)					
		SP	NOCHE	SP	DIA	INT	EXT	NOCHE	INT	EXT
16	TMAX SE	2,27	C.TMAX	6,36	TMAX SE	3 220	8 500	C.TMAX	95 800	824 000
	TMIN SE	NO	C.TMIN	6,36	TMIN SE	1 800	5 210	C.TMIN	1 920	18 600
26	TMAX SE	0,55	C.TMAX	6,36	TMAX SE	1 190	3 260	C.TMAX	3 300	27 100
	TMIN SE	NO	C.TMIN	1,31	TMIN SE	713	2 160	C.TMIN	544	6 070
38	TMAX SE	0,29	C.TMAX	1,71	TMAX SE	593	1 650	C.TMAX	788	6 220

	TMIN SE	NO	C.TMIN	0,64	TMIN SE	375	1 170	C.TMIN	219	2 770
13	TMAX ESE	NO	C.TMAX	6,36	TMAX ESE	2 070	4 870	C.TMAX	19 700	179 000
	TMIN ESE	NO	C.TMIN	6,36	TMIN ESE	1 110	2 880	C.TMIN	1 110	11 200
25	TMAX ESE	NO	C.TMAX	6,36	TMAX ESE	773	1 870	C.TMAX	1 630	12 700
	TMIN ESE	NO	C.TMIN	0,99	TMIN ESE	493	1 310	C.TMIN	352	4 060
24	TMAX ESE	NO	C.TMAX	3,53	TMAX ESE	575	1 400	C.TMAX	894	6 920
	TMIN ESE	NO	C.TMIN	0,73	TMIN ESE	376	1 010	C.TMIN	235	2 860
74	TMAX ENE	NO	C.TMAX	6,36	TMAX ENE	1 970	4 150	C.TMAX	32 700	311 000
	TMIN ENE	NO	C.TMIN	6,36	TMIN ENE	1 150	2 830	C.TMIN	1 280	12 800
21	TMAX ENE	NO	C.TMAX	6,36	TMAX ENE	3 290	6 680	C.TMAX	164000	981 000
	TMIN ENE	NO	C.TMIN	6,36	TMIN ESE	1 790	4 310	C.TMIN	2 390	20 100
20	TMAX ENE	NO	C.TMAX	6,36	TMAX ENE	3 920	7570	C.TMAX	192000	1 020 000
	TMIN ENE	NO	C.TMIN	6,36	TMIN ENE	2 210	4 500	C.TMIN	2 780	20 100
17	TMAX SSE	0,66	C.TMAX	6,36	TMAX SSE	1 490	4 410	C.TMAX	5 140	42 300
	TMIN SSE	NO	C.TMIN	1,61	TMIN SSE	734	2 470	C.TMIN	657	7 030
30	TMAX SSE	0,29	C.TMAX	1,65	TMAX SSE	610	1 860	C.TMAX	776	6 000
	TMIN SSE	NO	C.TMIN	0,60	TMIN SSE	317	1 110	C.TMIN	212	2 610
22	TMAX E	NO	C.TMAX	6,36	TMAX E	1 120	2 540	C.TMAX	3 910	31 600
	TMIN E	NO	C.TMIN	1,38	TMIN E	711	1 770	C.TMIN	580	6 300
23	TMAX E	NO	C.TMAX	6,36	TMAX E	731	1 670	C.TMAX	1 450	11 300
	TMIN E	NO	C.TMIN	0,81	TMIN E	480	1 200	C.TMIN	327	3 810
4	TMAX SW	1,15	C.TMAX	6,36	TMAX SW	1 620	5 650	C.TMAX	7 190	61 100
	TMIN SW	NO	C.TMIN	2,03	TMIN SW	811	3 410	C.TMIN	758	7 990
19	TMAX NNW	NO	C.TMAX	6,36	TMAX NNW	4 270	9 120	C.TMAX	191000	1 020 000
	TMIN NNW	NO	C.TMIN	6,36	TMIN NNW	2 180	5 160	C.TMIN	2 720	20 100

1	TMAX S	0,45	C.TMAX	6,36	TMAX S	817	2 530	C.TMAX	1 730	13 500
	TMIN S	NO	C.TMIN	0,88	TMIN S	467	1 650	C.TMIN	364	4 180
<b>TK 19</b>										
TK AF	CM	Sobrepresión (psi)			Concentración Nube Tóxica (ppm)					
	DIA	SP	NOCHE	SP	DIA	INT	EXT	NOCHE	INT	EXT
24	TMAX E	0,15	C.TMAX	0,86	TMAX SE	374	892	C.TMAX	350	2 510
	TMIN E	NO	C.TMIN	0,44	TMIN SE	266	696	C.TMIN	116	1 510
26	TMAX SE	0,23	C.TMAX	1,95	TMAX SE	585	1 610	C.TMAX	731	5 630
	TMIN SE	NO	C.TMIN	0,66	TMIN SE	379	1 170	C.TMIN	222	122
38	TMAX SE	0,14	C.TMAX	0,72	TMAX SE	314	874	C.TMAX	281	1 990
	TMIN SE	NO	C.TMIN	0,39	TMIN SE	212	666	C.TMIN	94,8	1 260
16	TMAX SSE	0,78	C.TMAX	6,36	TMAX SSE	1 430	4 330	C.TMAX	3 440	36 600
	TMIN SSE	NO	C.TMIN	2,16	TMIN SSE	820	2 860	C.TMIN	676	7 480
17	TMAX SSE	0,40	C.TMAX	3,51	TMAX SSE	691	2 140	C.TMAX	938	7 530
	TMIN SSE	NO	C.TMIN	0,77	TMIN SSE	417	1 490	C.TMIN	273	3 280
18	TMAX SSE	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX SSE	4 490	11 900	C.TMAX	71 300	988 000
	TMIN SSE	NO	C.TMIN	6,36	TMIN SSE	2 350	7 060	C.TMIN	2 580	22 000
30	TMAX SSE	0,21	C.TMAX	0,73	TMAX SSE	309	975	C.TMAX	283	2 010
	TMIN SSE	NO	C.TMIN	0,39	TMIN SSE	197	720	C.TMIN	95,6	1 270
21	TMAX E	NO	C.TMAX	6,36	TMAX E	2 550	5 870	C.TMAX	30 900	437 000
	TMIN E	NO	C.TMIN	6,36	TMIN E	1 600	4 020	C.TMIN	1 640	16 700
23	TMAX E	NO	C.TMAX	1,31	TMAX E	494	1 170	C.TMAX	547	4 050
	TMIN E	NO	C.TMIN	0,56	TMIN E	345	898	C.TMIN	174	2 160
74	TMAX ENE	NO	C.TMAX	6,36	TMAX ENE	1 840	3 980	C.TMAX	11 300	106 000
	TMIN ENE	NO	C.TMIN	6,36	TMIN ENE	1 120	2 830	C.TMIN	1 040	10 800
4	TMAX SSW	0,52	C.TMAX	6,36	TMAX SSW	827	2 650	C.TMAX	1 600	12 400
	TMIN	NO	C.TMIN	0,99	TMIN	477	1 790	C.TMIN	383	4 380

	SSW				SSW					
1	TMAX S	0,27	C.TMAX	1,27	TMAX S	438	1 360	C.TMAX	552	3 990
	TMIN S	NO	C.TMIN	0,55	TMIN S	271	974	C.TMIN	172	2 130
13	TMAX ESE	NO	C.TMAX	6,36	TMAX ESE	1 070	2 650	C.TMAX	2 130	20 300
	TMIN ESE	NO	C.TMIN	1,34	TMIN ESE	690	1 890	C.TMIN	503	5 690
20	TMAX ESE	NO	C.TMAX	6,36	TMAX ESE	4 170	9 050	C.TMAX	71 800	988 000
	TMIN ESE	NO	C.TMIN	6,36	TMIN ESE	2 330	5 700	C.TMIN	2 620	22 000
22	TMAX ESE	NO	C.TMAX	5,31	TMAX ESE	1 810	1 810	C.TMAX	1 050	8 600
	TMIN ESE	NO	C.TMIN	0,82	TMIN ESE	484	1 330	C.TMIN	300	3 560
25	TMAX ESE	NO	C.TMAX	1,21	TMAX ESE	469	1 180	C.TMAX	508	3 740
	TMIN ESE	NO	C.TMIN	0,54	TMIN ESE	321	894	C.TMIN	163	2 040

### TK 20

TK AF	CM DIA	Sobrepresión (psi)			Concentración Nube Tóxica (ppm)					
		SP	NOCHE	SP	DIA	INT	EXT	NOCHE	INT	EXT
13	TMAX SE	0,94	C.TMAX	6,36	TMAX SE	2 020	5 410	C.TMAX	11 700	110 000
	TMIN SE	NO	C.TMIN	6,36	TMIN SE	1 180	3 550	C.TMIN	1 050	11 000
26	TMAX SE	0,38	C.TMAX	6,36	TMAX SE	829	2 270	C.TMAX	1 370	10 600
	TMIN SE	NO	C.TMIN	0,89	TMIN SE	519	1 600	C.TMIN	343	3 980
38	TMAX SE	0,20	C.TMAX	0,89	TMAX SE	383	1 060	C.TMAX	367	2 660
	TMIN SE	NO	C.TMIN	0,44	TMIN SE	254	796	C.TMIN	128	1 650
16	TMAX SSE	0,95	C.TMAX	6,36	TMAX SSE	1 790	5 230	C.TMAX	10 400	96 500
	TMIN SSE	NO	C.TMIN	6,36	TMIN SSE	1 010	3 370	C.TMIN	997	10 400
17	TMAX SSE	0,42	C.TMAX	6,36	TMAX SSE	791	2 380	C.TMAX	1 520	11 700
	TMIN SSE	NO	C.TMIN	0,95	TMIN SSE	476	1 640	C.TMIN	367	4 230
30	TMAX SSE	0,20	C.TMAX	0,86	TMAX SSE	325	1 000	C.TMAX	348	2 520
	TMIN SSE	NO	C.TMIN	0,43	TMIN SSE	207	739	C.TMIN	117	1 520
22	TMAX E	NO	C.TMAX	6,36	TMAX E	999	2 300	C.TMAX	2 620	21 300

	TMIN E	NO	C.TMIN	1,4	TMIN E	637	1 670	C.TMIN	524	5 920
23	TMAX E	NO	C.TMAX	3	TMAX E	622	1 440	C.TMAX	976	7 310
	TMIN E	NO	C.TMIN	0,77	TMIN E	416	1 090	C.TMIN	271	3 260
24	TMAX ESE	NO	C.TMAX	1,36	TMAX ESE	467	1 140	C.TMAX	588	4 310
	TMIN ESE	NO	C.TMIN	0,59	TMIN ESE	322	873	C.TMIN	182	2 270
25	TMAX NNE	NO	C.TMAX	2,42	TMAX NNE	585	1 430	C.TMAX	880	6 560
	TMIN NNE	NO	C.TMIN	0,73	TMIN NNE	405	1 090	C.TMIN	252	3 050
1	TMAX SSW	0,31	C.TMAX	1,31	TMAX SSW	444	1 450	C.TMAX	566	4 150
	TMIN SSW	NO	C.TMIN	0,57	TMIN SSW	267	1 020	C.TMIN	176	2 210
4	TMAX SW	0,61	C.TMAX	6,36	TMAX SW	781	2 820	C.TMAX	1 380	10 600
	TMIN SW	NO	C.TMIN	0,93	TMIN SW	424	1 850	C.TMIN	348	4 090
18	TMAX WSW	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX WSW	5 120	15 300	C.TMAX	136000	1 010 000
	TMIN WSW	NO	C.TMIN	6,36	TMIN WSW	2 320	8 290	C.TMIN	2 840	23 100
19	TMAX WNW	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX WNW	4 180	10 100	C.TMAX	135000	1 010 000
	TMIN WNW	NO	C.TMIN	6,36	TMIN WNW	2 190	6 150	C.TMIN	2 750	23 100
21	TMAX ENE	NO	C.TMAX	6,36	TMAX ENE	4 250	7 930	C.TMAX	138000	1 010 000
	TMIN ENE	NO	C.TMIN	6,36	TMIN ENE	2 470	4 880	C.TMIN	2 940	23 100
74	TMAX NE	NO	C.TMAX	6,36	TMAX NE	2 380	5 470	C.TMAX	46 100	426 000
	TMIN NE	NO	C.TMIN	6,36	TMIN NE	1 380	3 720	C.TMIN	1 670	17 000

### TK 21

TK AF	CM	Sobrepresión (psi)			Concentración Nube Tóxica (ppm)					
		DIA	SP	NOCHE	SP	DIA	INT	EXT	NOCHE	INT
16	TMAX S	0,94	C.TMAX	6,36	TMAX S	1 710	5 100	C.TMAX	8 930	81 300
	TMIN S	NO	C.TMIN	5,81	TMIN S	955	3 270	C.TMIN	934	9 770
17	TMAX S	0,44	C.TMAX	6,36	TMAX S	785	2 400	C.TMAX	1 490	11 300
	TMIN S	NO	C.TMIN	0,93	TMIN S	466	1 640	C.TMIN	362	4 150

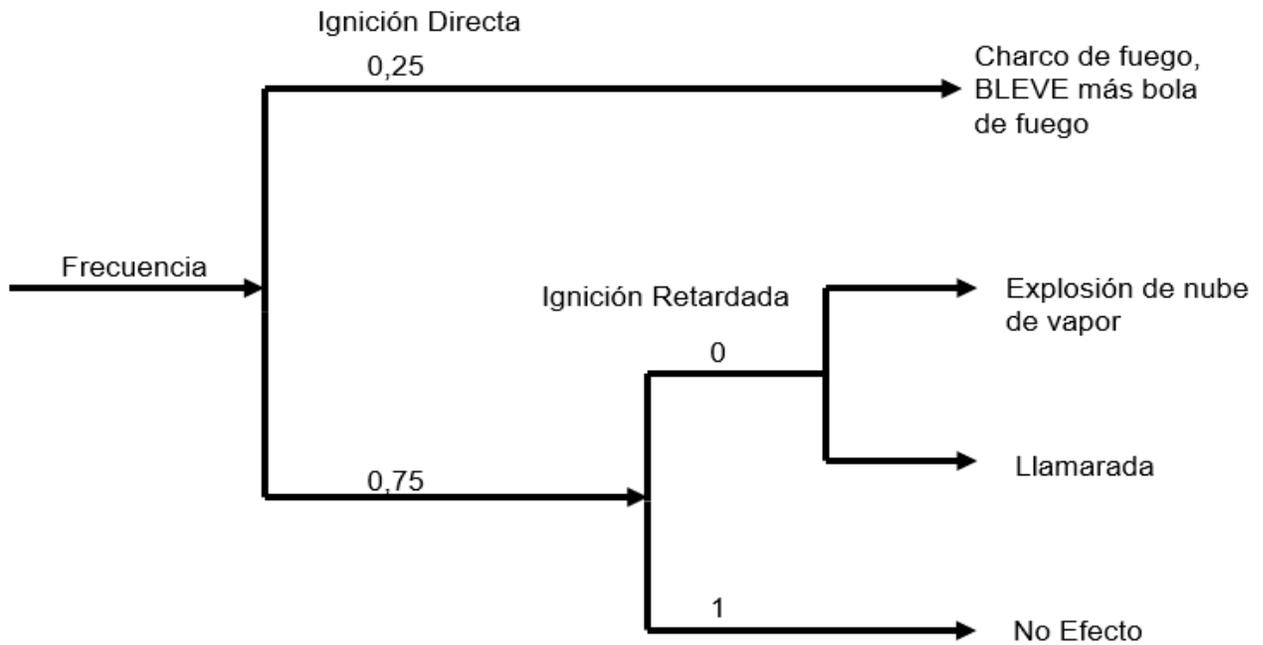
30	TMAX S	0,21	C.TMAX	0,81	TMAX S	311	972	C.TMAX	323	2 330
	TMIN S	NO	C.TMIN	0,41	TMIN S	197	713	C.TMIN	110	1 420
23	TMAX E	NO	C.TMAX	6,36	TMAX E	735	1 690	C.TMAX	1 340	10 200
	TMIN E	NO	C.TMIN	0,87	TMIN E	483	1 260	C.TMIN	338	3 890
22	TMAX ESE	NO	C.TMAX	6,36	TMAX ESE	1 250	3 000	C.TMAX	4 430	37 800
	TMIN ESE	NO	C.TMIN	2,11	TMIN ESE	800	2 110	C.TMIN	687	7 380
24	TMAX ESE	NO	C.TMAX	1,52	TMAX ESE	495	1 210	C.TMAX	653	4 730
	TMIN ESE	NO	C.TMIN	0,59	TMIN ESE	340	912	C.TMIN	197	2 390
13	TMAX SE	0,52	C.TMAX	6,36	TMAX SE	1 950	5 000	C.TMAX	16 800	164 000
	TMIN SE	NO	C.TMIN	6,36	TMIN SE	1 140	3 310	C.TMIN	1160	11900
25	TMAX SE	0,17	C.TMAX	3,57	TMAX SE	639	1 700	C.TMAX	1 040	7 740
	TMIN SE	NO	C.TMIN	0,76	TMIN SE	411	1 230	C.TMIN	280	3 280
26	TMAX SSE	0,41	C.TMAX	6,36	TMAX SSE	798	2 380	C.TMAX	1 530	11 700
	TMIN SSE	NO	C.TMIN	0,95	TMIN SSE	479	1 630	C.TMIN	372	4 210
38	TMAX SSE	0,21	C.TMAX	0,92	TMAX SSE	350	1 060	C.TMAX	385	2 780
	TMIN SSE	NO	C.TMIN	0,45	TMIN SSE	222	779	C.TMIN	128	1 610
18	TMAX WSW	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX WSW	3 570	12 400	C.TMAX	71 400	617 000
	TMIN WSW	NO	C.TMIN	6,36	TMIN WSW	1 670	6 890	C.TMIN	1 890	18 100
20	TMAX WSW	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX WSW	5 400	15 700	C.TMAX	138000	1 010 000
	TMIN WSW	NO	C.TMIN	6,36	TMIN WSW	2 380	8 140	C.TMIN	2 820	21 200
1	TMAX SSW	0,29	C.TMAX	1,2	TMAX SSW	422	1 370	C.TMAX	522	3 740
	TMIN SSW	NO	C.TMIN	0,53	TMIN SSW	255	971	C.TMIN	164	2 020
4	TMAX SW	0,50	C.TMAX	0,28	TMAX SW	631	2 270	C.TMAX	965	7 140
	TMIN SW	NO	C.TMIN	0,73	TMIN SW	347	1 500	C.TMIN	266	3110
74	TMAX NE	NO	C.TMAX	6,36	TMAX NE	3 180	7 090	C.TMAX	113000	862 000

	TMIN NE	NO	C.TMIN	6,36	TMIN NE	1 790	4 680	C.TMIN	2 250	20 000
19	TMAX W	2,42	C.TMAX	6,36	TMAX W	2 800	8 510	C.TMAX	48 200	439000
	TMIN W	NO	C.TMIN	6,36	TMIN W	1 470	5190	C.TMIN	1 700	16 900
<b>TK 74</b>										
TK AF	CM	Sobrepresión (psi)			Concentración Nube Tóxica (ppm)					
	DIA	SP	NOCHE	SP	DIA	INT	EXT	NOCHE	INT	EXT
22	TMAX ESE	0,24	C.TMAX	6,36	TMAX ENE	1 320	3190	C.TMAX	3 050	30 700
	TMIN ESE	NO	C.TMIN	1,8	TMIN ENE	822	2 210	C.TMIN	638	6 690
23	TMAX ESE	0,14	C.TMAX	4,68	TMAX ENE	794	1 940	C.TMAX	1 160	9 430
	TMIN ESE	NO	C.TMIN	0,82	TMIN ENE	513	1 390	C.TMIN	325	3 660
24	TMAX ESE	0,10	C.TMAX	1,36	TMAX ENE	542	1 340	C.TMAX	620	4 550
	TMIN ESE	NO	C.TMIN	0,57	TMIN ENE	361	988	C.TMIN	194	2 300
13	TMAX SSE	1	C.TMAX	6,36	TMAX E	1 940	5 640	C.TMAX	10 200	132 000
	TMIN SSE	NO	C.TMIN	6,36	TMIN E	1 070	3 520	C.TMIN	1100	11 000
26	TMAX SSE	0,39	C.TMAX	6,36	TMAX E	770	2300	C.TMAX	1 290	10 600
	TMIN SSE	NO	C.TMIN	0,88	TMIN E	458	1 550	C.TMIN	353	3 940
38	TMAX SSE	0,20	C.TMAX	0,89	TMAX N	343	1 040	C.TMAX	377	2 650
	TMIN SSE	NO	C.TMIN	0,43	TMIN N	216	750	C.TMIN	124	1 550
20	TMAX SW	4,73	C.TMAX	6,36	TMAX N	2 860	9 510	C.TMAX	27 200	381 000
	TMIN SW	NO	C.TMIN	6,36	TMIN N	1 400	5 610	C.TMIN	1 560	14 900
21	TMAX SW	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX NW	3 920	12 600	C.TMAX	61 500	868 000
	TMIN SW	NO	C.TMIN	6,36	TMIN NW	1 870	7 090	C.TMIN	2 210	18 900
4	TMAX SW	0,5	C.TMAX	2,17	TMAX NE	639	2 280	C.TMAX	919	7 160
	TMIN SW	NO	C.TMIN	0,72	TMIN NE	349	1 500	C.TMIN	270	3 090
17	TMAX S	0,39	C.TMAX	6,36	TMAX SSE	761	2 310	C.TMAX	1 270	10 400
	TMIN S	NO	C.TMIN	0,87	TMIN SSE	451	1 580	C.TMIN	349	3 890

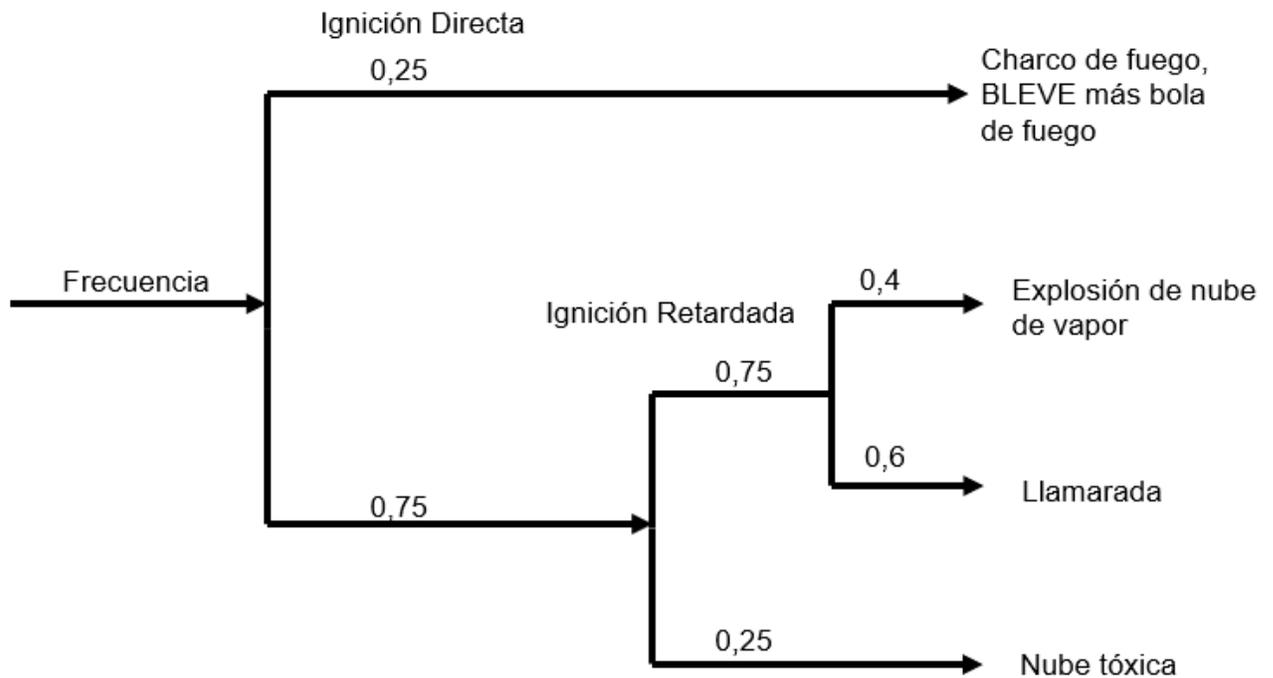
30	TMAX S	0,19	C.TMAX	0,82	TMAX SSE	318	986	C.TMAX	340	2 370
	TMIN S	NO	C.TMIN	0,40	TMIN SSE	200	716	C.TMIN	113	1 420
1	TMAX SSW	0,28	C.TMAX	1,11	TMAX ESE	409	1 330	C.TMAX	490	3 520
	TMIN SSW	NO	C.TMIN	0,50	TMIN ESE	245	923	C.TMIN	158	1 920
16	TMAX SSW	0,62	C.TMAX	6,36	TMAX NNE	1 040	3 310	C.TMAX	2 120	19 700
	TMIN SSW	NO	C.TMIN	1,25	TMIN NNE	584	2130	C.TMIN	503	5 390
18	TMAX WSW	1,31	C.TMAX	6,36	TMAX SE	1 710	6 040	C.TMAX	5 260	60 500
	TMIN WSW	NO	C.TMIN	3,51	TMIN SE	866	3 760	C.TMIN	843	8 610
19	TMAX WSW	6,36	C.TMAX	6,36	TMAX SSW	1 990	6 940	C.TMAX	7 560	92 300
	TMIN WSW	NO	C.TMIN	6,36	TMIN SSW	995	4 290	C.TMIN	1 000	10 000
25	TMAX SE	NO	C.TMAX	2,38	TMAX WSW	644	1 700	C.TMAX	975	7 670
	TMIN SE	NO	C.TMIN	0,74	TMIN WSW	411	1 220	C.TMIN	283	3 220

Anexo 10: Estructura de los árboles de eventos.

Árbol de evento para Diésel, *Fuel oil*, Turbo Combustible



Árbol de evento para Nafta y Gasolina de Aviación



Anexo 11: Distancia entre los equipos.

Distancia (m)	TK 1	TK 4	TK 13	TK 16	TK 17	TK 18	TK 19	TK 20	TK 21	TK 22	TK 23	TK 24	TK 25	TK 26	TK 30	TK 38	TK 74
TK 1		83	171	122	90	167	192	190	195	221	271	260	210	150	107	167	196
TK 4	83		152	100	107	110	127	135	153	206	260	270	218	164	176	217	149
TK 13	171	152		57	86	86	108	69	65	53	105	124	85	67	178	155	66
TK 16	122	100	57		55	63	90	72	75	110	161	175	123	81	161	161	107
TK 17	90	107	86	55		120	149	130	131	134	181	172	119	62	101	115	131
TK 18	167	110	86	63	120		29	25	45	129	177	210	170	141	221	226	78
TK 19	192	127	108	90	149	29		28	51	143	188	228	194	166	250	251	70
TK 20	190	135	69	72	130	25	28		18	108	153	187	159	135	231	226	52
TK 21	195	153	65	75	131	45	51	18		90	136	179	149	129	238	221	38
TK 22	221	206	53	110	134	129	143	108	90		51	86	68	89	211	169	92
TK 23	271	260	105	161	181	177	188	153	136	51		68	86	130	249	194	136
TK 24	260	270	124	175	172	210	228	187	179	86	68		54	110	210	145	177
TK 25	210	218	85	123	119	170	194	159	149	78	86	54		57	265	110	146
TK 26	150	164	67	81	62	141	166	135	129	89	130	110	57		122	91	130
TK 30	107	176	178	161	101	221	250	231	238	211	249	210	165	122		78	230
TK 38	167	217	155	161	115	226	251	226	221	169	194	145	110	91	78		220
TK 74	196	149	66	107	131	78	70	52	38	92	136	177	146	130	231	226	

Anexo 12: Resultados de los vectores de escalado y probabilidades de escalado por radiación y sobrepresión.

TK	Intensidad de Radiación (kW/m <sup>2</sup> )																
	TK 1	TK 4	TK 13	TK 16	TK 17	TK 18	TK 19	TK 20	TK 21	TK 22	TK 23	TK 24	TK 25	TK 26	TK 30	TK 38	TK 74
TK 1		7,91	1,51	3,27	6,58	1,6	1,16	1,19	1,12	0,84	0,53	0,59	0,95	2,04	4,42	1,6	1,11
TK 4	7,91		1,98	5,17	4,42	4,15	2,99	2,59	1,95	0,99	0,59	0,54	0,87	1,66	1,42	0,88	2,07
TK 13	1,42	1,82		12,9	5,88	5,88	3,7	9,07	10,2	14,7	3,92	2,78	6,02	9,59	1,3	1,74	9,87
TK 16	2,2	3,44	11,8		12,7	9,54	4,36	7,15	6,54	2,78	1,18	0,97	2,16	5,51	1,18	1,18	2,96
TK 17	6,68	4,45	7,43	20,2		3,4	2,05	2,81	2,76	2,18	1,3	1,47	3,46	15,7	5,1	3,75	2,76
TK 18	0,63	1,7	3,08	6,64	1,38		36,1	45,3	15	1,16	0,55	0,37	0,61	0,94	0,33	0,32	3,91
TK 19	0,29	0,75	1,09	1,67	0,52	23,8		25,5	6,5	0,57	0,31	0,20	0,29	0,41	0,16	0,16	3,02
TK 20	0,28	0,6	2,77	2,51	0,65	23,4	19,3		37,8	0,99	0,45	0,29	0,41	0,6	0,18	0,19	5,3
TK 21	0,27	0,46	2,92	2,16	0,65	6,21	4,83	28,7		1,46	0,6	0,33	0,49	0,67	0,18	0,21	8,64
TK 22	0,82	0,95	14,7	3,56	2,37	2,56	2,07	3,7	5,36		15,8	5,88	9,33	5,49	0,91	1,45	5,13
TK 23	0,53	0,58	3,92	1,61	1,26	1,32	1,16	1,79	2,3	15,8		9,33	5,88	2,52	0,64	1,09	2,3
TK 24	0,58	0,53	2,77	1,35	1,4	0,91	0,77	1,17	1,29	5,83	9,21		14	3,54	0,91	2	1,32

TK 25	0,41	0,37	3,18	1,36	1,47	0,65	0,48	0,76	0,88	3,87	3,09	8,94		7,92	0,70	1,76	0,92
TK 26	1,86	1,55	9,47	6,56	10,9	2,12	1,51	2,32	2,55	5,44	2,51	3,54	12,7		2,86	5,2	2,51
TK 30	6,64	2,36	2,31	2,85	7,46	1,46	1,12	1,33	1,25	1,61	1,13	1,63	2,71	5,07		12,4	1,34
TK 38	1,5	0,85	1,75	1,62	3,28	0,78	0,63	0,78	0,82	1,46	1,09	2,02	3,6	5,31	7,27		0,83
TK 74	0,26	0,47	3,1	0,98	0,62	2,07	2,69	5,52	11,6	1,4	0,57	0,33	0,49	0,63	0,19	0,21	

Sobrepresión (psi)	Tanques						
	TK 16	TK 17	TK 18	TK 19	TK 20	TK 21	TK 74
TK 1	6,36	6,36	6,36	1,27	1,31	1,2	1,11
TK 4	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	0,73	2,17
TK 13	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36
TK 16		6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36
TK 17	6,36		6,36	3,51	6,36	6,36	6,36
TK 18	6,36	6,36		6,36	6,36	6,36	6,36
TK 19	6,36	6,36	6,36		6,36	6,36	6,36
TK 20	6,36	6,36	6,36	6,36		6,36	6,36
TK 21	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36		6,36
TK 22	6,36	6,36	6,36	5,31	6,36	6,36	6,36
TK 23	6,36	6,36	6,36	1,31	3	6,36	4,68
TK 24	6,36	6,36	3,53	0,86	1,36	1,52	1,36
TK 25	6,36	6,36	6,36	1,21	2,42	3,57	2,38
TK 26	6,36	6,36	6,36	1,95	6,36	6,36	6,36

TK 30	6,36	6,36	1,65	0,73	0,86	0,81	0,82
TK 38	6,36	6,36	1,71	0,72	0,89	0,92	0,89
TK 74	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	6,36	

TK	Probabilidad de escalado por intensidad de radiación																
	TK 1	TK 4	TK 13	TK 16	TK 17	TK 18	TK 19	TK 20	TK 21	TK 22	TK 23	TK 24	TK 25	TK 26	TK 30	TK 38	TK 74
TK 1		5,94 E- 02	0	9,96 E- 05	1,22 E- 02	0	0	0	0	0	0	0	0	6,21 E- 06	2,64 E- 03	4,55 E- 07	0
TK 4	4,55 E- 02		3,40 E- 06	2,89 E- 03	1,04 E- 03	4,04E -04	1,98 E- 05	4,71 E- 06	3,18 E- 07	0	0	0	0	7,93 E- 07	0	0	7,93E -07
TK 13	0	1,92 E- 06		1,98 E- 01	6,39 E- 03	4,40E -03	1,26 E- 04	3,51 E- 02	6,30 E- 02	3,97 E- 01	1,31 E- 03	9,20 E- 05	1,70 E- 02	1,27 E- 01	0	1,07 E- 06	6,18E -02
TK 16	6,50 E- 06	5,01 E- 04	2,18 E- 01		1,89 E- 01	5,37E -02	4,50 E- 04	1,04 E- 02	6,95 E- 03	9,57 E- 05	0	0	1,02 E- 05	1,07 E- 02	0	0	2,56E -05
TK 17	2,02 E- 02	2,89 E- 03	4,09 E- 02	5,32 E- 01		8,16E -05	5,04 E- 07	1,02 E- 05	1,02 E- 05	5,67 E- 05	0	0	5,19 E- 04	4,56 E- 01	6,39 E- 03	8,74 E- 04	1,33E -05
TK 18	0	9,21 E- 07	1,72 E- 04	1,25 E- 02	0		8,62 E- 01	9,39 E- 01	2,33 E- 01	0	0	0	0	0	0	0	2,602 3E-04
TK 19	0	0	0	0	0	6,14E -01		6,37 E- 01	6,76 E- 03	0	0	0	0	0	0	0	7,455 5e-06

TK 20	0	0	7,23 E- 05	9,77 E- 06	0	6,03E -01	4,17 E- 01		8,85 E- 01	0	0	0	0	0	0	0	2,26E -03
TK 21	0	0	1,12 E- 04	2,32 E- 06	0	6,04E -03	9,35 E- 04	7,22 E- 01		0	0	0	0	0	0	0	3,44E -02
TK 22	0	0	3,75 E- 01	2,01 E- 04	5,83 E- 06	6,53E -06	5,47 E- 07	1,15 E- 04	2,03 E- 03		4,59 E- 01	1,48 E- 02	1,13 E- 01	1,06 E- 02	0	0	1,82E -03
TK 23	0	0	1,04 E- 03	0	0	0	0	0	1,74 E- 06	4,56 E- 01		1,13 E- 01	1,50 E- 02	4,25 E- 05	0	0	2,32E -06
TK 24	0	0	7,23 E- 05	0	0	0	0	0	0	1,43 E- 02	1,09 E- 01		3,59 E- 01	6,41 E- 04	0	4,29 E- 06	0
TK 25	0	0	2,24 E- 04	0	0	0	0	0	0	1,18 E- 03	2,24 E- 04	9,68 E- 02		6,18 E- 02	0	1,24 E- 06	0
TK 26	1,24 E- 06	3,52 E- 07	1,07 E- 01	1,19 E- 02	1,15 E- 01	1,02E -06	0	1,58 E- 06	4,94 E- 06	9,90 E- 03	4,07 E- 05	6,19 E- 04	2,84 E- 01		1,08 E- 04	7,14 E- 03	5,41E -06
TK 30	1,97 E- 02	2,25 E- 05	1,46 E- 05	3,17 E- 05	2,33 E- 02	0	0	0	0	5,58 E- 07	0	6,17 E- 07	7,53 E- 05	6,76 E- 03		2,61 E- 01	0
TK 38	0	0	9,68 E- 07	0	1,04 E- 04	0	0	0	0	0	0	5,41 E- 06	6,87 E- 04	8,66 E- 03	4,01 E- 02		0
TK 74	0	0	1,78 E- 04	0	0	7,933 3e-07	3,17 E- 03	2,19 E- 03	1,04 E- 01	0	0	0	0	0	0	0	







Anexo 14: Resultados obtenidos para la red Bayesiana dinámica para incendio para t<sub>1</sub>.

Unidad de Proceso	Primaria (%)		Secundaria (%)								L1T1	DL1T1
	TK 17	TK 17-1	TK 16	TK 16-1	A1	A1-1	A2	A2-1	A3	A3-1		
Probabilidad Previa	1,5	1,02	1,5	1,47	17,73	8,7	0,12	0,1	5,81	4,36	9,75	1,19
Accidente TK 17	100	67,8	1,5	53,86	17,73	53,63	0,12	2,09	5,81	4,36	79,05	79,05
Accidente TK 16	1,5	1,02	100	45,5	17,73	8,7	0,12	0,1	5,81	4,36	42,92	1,49
Accidente A1	1,5	1,02	1,5	1,47	100	45,88	0,12	0,1	5,81	4,36	46,36	1,44
Accidente A2	1,5	1,02	1,5	1,47	17,73	8,7	100	61,93	5,81	4,36	65,59	1,38
Accidente A3	1,5	1,02	1,5	1,47	17,73	8,7	0,12	0,1	100	75,1	9,75	1,19
Accidente TK 17-1	100	100	1,5	53,86	17,73	53,63	0,12	2,09	5,81	4,36	79,05	79,05
Accidente TK 16-1	55,02	37,3	46,48	100	17,73	33,11	0,12	1,19	5,81	4,36	100	55,02
Accidente A1-1	9,25	6,27	1,5	5,59	93,53	100	0,12	0,26	5,81	4,36	100	9,25
Accidente A2-1	30,04	20,37	1,5	16,65	17,73	21,72	71,06	100	5,81	4,36	100	30,04
Accidente A3-1	1,5	1,02	1,5	1,47	17,73	8,7	0,12	0,1	100	100	9,75	1,19

Anexo 15: Resultados obtenidos para la red Bayesiana dinámica para incendio para t<sub>2</sub>.

Unidad de Proceso	Primaria (%)			Secundaria (%)									Terciaria (%)			L1T2	DL1T2	L2T2	DL2T2
	TK 17	TK 17-1	TK 17-2	TK 16	TK 16-1	TK 16-2	A1	A1-1	A1-2	A2	A2-1	A2-2	A3	A3-1	A3-2				
Probabilidad Previa	1,5	1,02	0,69	1,5	1,47		17,73	8,7	4,7	0,12	0,1	0,09	5,81	4,36	1,13	5,17	0,95	1,13	0,04
Accidente TK 17	100	67,8	45,97	1,5	53,86	60,14	17,73	53,63	64,75	0,12	2,09	2,67	5,81	4,36	4,14	79,46	63,44	4,14	2,75
Accidente TK 16	1,5	1,02	0,69	100	45,5	20,88	17,73	8,7	14,25	0,12	0,1	0,09	5,81	4,36	3,49	29,22	1,01	3,49	0,07
Accidente A1	1,5	1,02	0,69	1,5	1,47	1,2	100	45,88	21,48	0,12	0,1	0,09	5,81	4,36	1,29	21,77	0,99	1,29	0,04
Accidente A2	1,5	0,92	0,69	1,5	1,62	1,2	17,73	3,77	17,74	100	17,73	38,36	5,81	3,78	1,13	46,41	0,99	1,13	0,04
Accidente A3	1,5	1,02	0,69	1,5	1,47	1,2	17,73	8,7	4,7	0,12	0,1	0,09	100	75,1	17,54	5,17	0,95	17,54	0,2
Accidente TK 17-1	100	100	67,8	1,5	53,86	77,27	17,73	48,71	78,2	0,12	2,04	3,32	5,81	3,78	4,14	93,57	93,57	4,14	4,06
Accidente TK 16-1	55,02	37,3	74,71	46,48	100	64,54	17,73	33,11	51,4	0,12	1,19	1,49	5,81	4,36	6,53	76,13	37,19	6,53	2,46
Accidente A1-1	9,25	6,27	4,25	1,5	5,59	5,83	93,53	100	48,89	0,12	0,26	0,29	5,81	4,36	1,75	49,37	6,15	1,75	0,27
Accidente A2-1	30,02	20,36	13,8	1,5	16,64	18,26	17,73	21,71	41,32	71,08	100	62,31	5,81	4,36	2,00	78,5	20,11	2,00	0,84
Accidente A3-1	1,5	1,02	0,69	1,5	1,47	1,2	17,73	8,7	4,7	0,12	0,1	0,09	100	100	23,32	5,17	0,95	23,32	0,25
Accidente TK 17-2	100	100	100	1,5	53,86	77,27	17,73	53,63	78,2	0,12	2,09	3,32	5,81	4,36	4,14	93,57	93,57	4,14	4,06
Accidente TK 16-2	75,34	65,63	44,5	23,16	79,15	100	17,73	42,39	63,51	0,12	1,6	2,31	5,81	4,36	5,45	100	65,63	5,45	3,22
Accidente A1-2	20,67	16,93	11,48	4,55	16,06	16,18	81,05	90,5	100	0,45	1,05	0,91	5,81	4,36	2,27	100	16,93	2,27	0,75
Accidente A2-2	46,87	39,53	26,8	1,5	25,6	32,47	17,73	29,4	50,2	53,99	76,42	100	5,81	4,36	2,52	100	39,53	2,52	1,64
Accidente A3-2	5,5	3,73	2,53	4,64	8,49	5,78	20,3	13,5	9,46	0,12	0,19	0,19	90,23	90,08	100	11,63	3,66	100	3,66

Anexo 16: Resultados obtenidos para la red Bayesiana dinámica para incendio para t<sub>3</sub>.

Unidad de Proceso	Primaria (%)				Secundaria (%)												Terciana (%)				L1T3	DL1T3	L2T3	DL2T3
	TK 17	TK 17-1	TK 17-2	TK 17-3	TK 16	TK 16-1	TK 16-2	TK 16-3	A1	A1-1	A1-2	A1-3	A2	A2-1	A2-2	A2-3	A3	A3-1	A3-2	A3-3				
Probabilidad Previa	1,5	1,02	0,69	0,47	1,5	1,47	1,2	0,9	17,73	8,7	4,7	2,66	0,12	0,1	0,09	0,07	5,81	4,36	1,13	0,35	2,9	0,04	0,35	0,04
Accidente TK 17	100	67,8	45,97	31,17	1,5	53,86	60,14	51,33	17,73	53,63	64,75	60,06	0,12	2,09	2,67	2,58	5,81	4,36	4,14	4,47	68,78	44,88	4,47	2,5
Accidente TK 16	1,5	1,02	0,69	0,47	100	45,5	20,88	9,7	17,73	8,7	14,25	11,25	0,12	0,1	0,09	0,07	5,81	4,36	3,49	1,99	17,28	0,69	1,99	0,05
Accidente A1	1,5	1,02	0,69	0,47	1,5	1,47	1,2	0,9	100	45,88	21,48	10,24	0,12	0,1	0,09	0,07	5,81	4,36	1,29	0,46	10,42	0,68	0,46	0,04
Accidente A2	1,5	0,92	0,69	0,47	1,5	1,62	1,2	0,9	17,73	3,77	17,74	16,61	100	17,73	38,36	23,76	5,81	3,78	1,13	0,4	32,59	0,68	0,4	0,04
Accidente A3	1,5	1,02	0,69	0,47	1,5	1,47	1,2	0,9	17,73	8,7	4,7	2,66	0,12	0,1	0,09	0,07	100	75,1	17,54	4,15	2,9	0,67	4,15	0,06
Accidente TK 17-1	100	100	67,8	45,97	1,5	53,86	77,27	70,6	17,73	48,71	78,2	78,14	0,12	2,04	3,32	3,42	5,81	3,78	4,14	5,45	87,92	66,19	5,45	3,69
Accidente TK 16-1	55,02	37,3	74,71	17,15	46,48	100	64,54	42,3	17,73	33,11	51,4	46,33	0,12	1,19	1,49	1,43	5,81	4,36	6,53	5,21	57,68	25,23	5,21	1,81
Accidente A1-1	9,25	6,27	4,25	2,88	1,5	5,59	5,83	4,87	93,53	100	48,89	24,94	0,12	0,26	0,29	0,26	5,81	4,36	1,75	0,93	25,51	4,19	0,93	0,24
Accidente A2-1	30,02	20,36	13,8	9,36	1,5	16,64	18,26	15,5	17,73	21,71	41,32	39,4	71,08	100	62,31	38,85	5,81	4,36	2,00	1,63	60,83	13,7	1,63	0,76
Accidente A3-1	1,5	1,02	0,69	0,47	1,5	1,47	1,2	0,9	17,73	8,7	4,7	2,66	0,12	0,1	0,09	0,07	100	100	23,32	5,49	2,9	0,67	5,49	0,07
Accidente TK 17-2	100	100	100	67,8	1,5	53,86	77,27	87,73	17,73	53,63	78,2	90,15	0,12	2,09	3,32	4,07	5,81	4,36	4,14	10,6	97,63	97,63	10,6	10,46
Accidente TK 16-2	75,34	65,63	44,5	30,17	23,16	79,15	100	68,37	17,73	42,39	63,51	66,5	0,12	1,6	2,31	2,33	5,81	4,36	5,45	6,91	83,03	44,44	6,91	3,05
Accidente A1-2	20,67	16,93	11,48	7,78	4,55	16,06	16,18	13,34	81,05	90,5	100	52,93	0,45	1,05	0,91	0,8	5,81	4,36	2,27	1,84	54,15	11,38	1,84	0,66
Accidente A2-2	46,87	39,53	26,8	18,17	1,5	25,6	32,47	28,77	17,73	29,4	50,2	56,69	53,99	76,42	100	62,44	5,81	4,36	2,52	2,55	84,14	26,72	2,55	1,47
Accidente A3-2	5,5	3,73	2,53	1,71	4,64	8,49	5,78	3,93	20,3	13,5	9,46	6,48	0,12	0,19	0,19	0,17	90,23	90,08	100	23,55	7,51	2,51	23,55	0,72
Accidente TK 17-3	100	100	100	100	1,5	53,86	77,27	87,73	17,73	53,63	78,2	90,15	0,12	2,09	3,32	4,07	5,81	4,36	4,14	5,45	97,63	97,63	5,45	5,44
Accidente TK 16-3	85,37	79,61	67,07	45,47	16,13	68,87	90,76	100	17,73	46,96	69,49	76,12	0,12	1,8	2,72	3,04	5,81	4,36	4,92	6,32	100	67,07	6,32	4,03
Accidente A1-3	33,87	29,88	23,37	15,85	6,34	25,58	29,94	25,81	68,23	81,56	93,5	100	0,75	1,55	1,82	1,6	5,82	4,37	2,75	2,66	100	23,37	2,66	1,33
Accidente A2-3	57,96	52,15	42,08	28,53	1,5	31,5	41,82	41,08	17,63	34,46	56,05	63,67	42,57	60,91	79,82	100	5,81	4,36	2,86	3,15	100	42,08	3,15	2,3
Accidente A3-3	19,34	15,98	10,84	7,35	8,62	22,03	23,86	16,43	23,44	23,44	24,87	20,73	0,14	0,49	0,63	0,61	69,56	69,09	76,66	100	24,28	10,81	100	10,81