

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR EMISIONES DE FLARE EN YACIMIENTOS CUBANOS DE PETROLEO

POLLUTION ASSESSMENT OF FLARE EMISSIONS AT CUBAN OIL FIELDS

Lester Rivas Trasancos⁽¹⁾, Miguel A. Díaz Díaz⁽¹⁾ Yamila Navarro Sosa⁽¹⁾

Las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) y sulfuro de hidrógeno (H₂S) a la atmósfera están entre los problemas más serios que contribuyen al deterioro de las condiciones atmosféricas, producto de la quema del gas acompañante en instalaciones no adecuadas que se produce durante la extracción de petróleo debido a la insuficiente utilización de este gas. El presente artículo trata sobre la determinación de la eficiencia de la combustión a partir de las ecuaciones desarrolladas por Leahey y Schroeder de los flares instalados en los yacimientos del litoral norte de las provincias Mayabeque y Matanzas, los cuales alcanzan eficiencias menores del 40%, que denota una combustión deficiente que puede originar niveles elevados de H₂S en toda la región donde se ubican. Se obtuvo además el pronóstico de niveles de H₂S y SO₂ en áreas circundantes a los flares evaluados mediante la aplicación de tres modelos de dispersión reconocidos.

Palabras claves: Contaminación atmosférica, evaluación, emisiones, flare.

Emissions of sulfur dioxide (SO₂) and hydrogen sulfide (H₂S) into the atmosphere are among the most serious problems that contribute to the deterioration of weather conditions, resulting from the burning of accompanying gas in inadequate facilities that occurs during the oil extraction due to the insufficient use of this gas. This article deals with the determination of the efficiency of combustion from the equations; developed by Leahy and Schroeder, of flares installed on the deposits of the northern coast of Mayabeque and Matanzas provinces which reach lower efficiencies than 40%, which it denotes a poor combustion that can cause high levels of H₂S in the region where they are located. The estimate of levels of H₂S and SO₂ surrounding the evaluated flares was obtained by applying three recognized dispersion models of areas.

Keywords: Atmospheric contamination, evaluation, flares.

Recibido: 26 de mayo del 2016

Aprobado en su forma original: 14 de abril del 2016

(1) Centro de Investigaciones del petróleo (CEINPET), Churruca 481 Cerro, La Habana, Cuba. Correo electrónico: lester@ceinpet.cupet.cu

INTRODUCCIÓN

Los tópicos ambientales que se deben considerar en un programa de evaluación y gestión comprensiva deben estar dirigidos a proyectar los riesgos específicos e impactos potenciales de la actividad (IFC - World Bank Group, 2007). Las fuentes principales de emisiones al aire (continuas y discontinuas) en la actividad de exploración – producción de petróleo se originan de fuentes de combustión para la generación de electricidad y calor, uso de compresores, bombas y máquinas reciprocantes (calderas, turbinas y otras), emisiones de la quema y venteo de hidrocarburos, y emisiones fugitivas.

Los contaminantes fundamentales de estas fuentes incluyen a los óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), partículas, sulfuro de hidrógeno, compuestos orgánicos volátiles (COV) incluyendo metano (CH₄) y etano, benceno, etil benceno, tolueno y xileno (BTEX), glicoles e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP).

También se deben considerar las emisiones significativas (>100,000 t de CO₂ equivalente por año) de gases de efecto invernadero (GHG) de todas las facilidades productivas y actividades de apoyo, las cuales requieren ser cuantificadas anualmente como emisiones agregadas, de acuerdo a metodologías reconocidas internacionalmente (EMEP/EEA, 2010).

Durante la producción de crudo se trae a la superficie el gas asociado o acompañante, el cual en muchas ocasiones se dispone a la atmósfera en facilidades en tierra por venteo o quema (flare).

La quema de los gases residuales es una práctica común en el procesamiento de materiales hidrocarbonados. Se asume que la quema alcanza la combustión completa con subproductos relativamente inocuos, tales como el dióxido de carbono y el agua. Sin embargo, la quema en antorchas (flares) raramente es exitosa en el alcance de una combustión completa. Esto es debido a la

entrada de aire en la región de los gases de combustión que restringe el tamaño de la llama a menos del valor óptimo. Las llamas resultantes son demasiado pequeñas para disipar la cantidad de calor asociado con una eficiencia de combustión del 100%.

Basado en una serie de estudios de flare conducido en los años 80, la EPA concluyó que los flares diseñados y operados apropiadamente alcanzan una buena eficiencia de combustión (EPA, 2012). Por ejemplo una conversión mayor del 98% de compuestos orgánicos a dióxido de carbono. Sin embargo, se debe entender que bajo condiciones extremas ambientales y de operación, la eficiencia de combustión sufrirá en algún grado (ARGO Flare, 2013).

La altura total y el diámetro interno de la punta del flare son las consideraciones principales a tener en cuenta en su construcción y son afectados directamente por los parámetros de diseño siguientes (Tornado, 2013):

- Límites de radiación
- Límites de concentración a nivel de suelo
- Límites de ruido
- Estabilidad estructural
- Composición química del gas residual
- Condiciones medioambientales
- Caída de presión permisible
- Velocidad de salida del gas residual

Para identificar las situaciones de exceso de aireación que pueden ocurrir en los flares asistidos por aire, la relación estequiométrica de aire (el flujo másico real de aire asistido al estequiométrico teórico necesitado para combustionar el gas de venteo del flare) es el parámetro de operación más apropiado (EPA 2012). Específicamente, para mantener una buena eficiencia de combustión, para un flare asistido por aire la relación estequiométrica de aire debe ser 7 o menos (Gogolek et al. 2010).

Los estudios sugieren además que el límite más bajo de inflamabilidad (LFL) del gas de venteo del flare debe ser 15.3 % por volumen o menos para asegurar que el gas enviado al

flare asistido por aire sea capaz de quemarse adecuadamente cuando se introduce suficiente aire (Degges et al., 2010) (Evans & Roseler, 2011).

La operación del flare no se afecta significativamente por velocidades de viento hasta 35 km/h (Hu et al., 2009). Los datos accesibles indican que la región de la estela dominada comienza en una relación de momentum de flujo de 3 o superior (Castiñeira & Edgar, 2008).

La eficiencia de destrucción es una medida de cuanto hidrocarburo se destruye y la eficiencia de combustión es una medida de la cantidad de hidrocarburos que se quema completamente para producir dióxido de carbono y vapor de agua.

La eficiencia de combustión siempre será menor que la de destrucción, y un flare que opera con una eficiencia de combustión del 98% puede alcanzar una eficiencia de destrucción sobre el 99.5%. La relación entre eficiencia de destrucción y de combustión no es constante y cambia con diferentes compuestos. Sin embargo se cree que el estimado de diferencia de 1.5% es una asunción razonable. Se ha determinado que una eficiencia de combustión del 96.5% demuestra una buena operación del flare (Peterson et al., 2007).

En los yacimientos petrolíferos del litoral norte de las provincias Mayabeque y Matanzas existen problemas de contaminación atmosférica originada por la ineficiencia de la combustión de los flares instalados. El objetivo de este estudio ha sido evaluar la contaminación originada por las emisiones de flares en yacimientos petroleros cubanos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la evaluación de la contaminación originada por las emisiones de flares en

yacimientos petroleros cubanos se plantearon los objetivos específicos siguientes:

- Estimar la eficiencia de combustión de los flares instalados en yacimientos del litoral norte de las provincias Mayabeque y Matanzas.
- Obtener el pronóstico de niveles de los contaminantes H_2S y SO_2 en áreas circundantes a los flares evaluados.
- Comprobar la validez de los pronósticos obtenidos con mediciones reales de concentración en aire ambiente.
- Proponer medidas para mejorar la eficiencia de combustión de los flares.

A partir de las ecuaciones desarrolladas por Leahey y Schroeder (1990), y las evaluaciones teórico-prácticas realizadas por estos autores (Leahey et al., 2001) (Leahey & Preston, 2001) se estimaron las longitudes, áreas y volúmenes de llamas de los flares instalados en los yacimientos del litoral norte de las provincias Mayabeque y Matanzas como función de la velocidad de salida de las chimeneas de los flares, la relación estequiométrica de mezclado y la velocidad del viento.

Se estimaron los calores liberados como parte del proceso de combustión a partir del conocimiento de las dimensiones de la llama asumiendo una temperatura de llama de 1200 K (927 °C). Se obtuvo la eficiencia de combustión tomando la relación de los valores estimados de calor real liberado a los asociados con una combustión completa del 100%.

La ubicación georeferenciada de los flares y de las estaciones de monitoreo de calidad de aire ambiente se realizó con equipo GPS eTrex Summit, marca GARMIN taiwanés. Los datos básicos de los flares se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos básicos de los flares.

FLARE	Altura del <i>flare</i>	Diámetro del <i>flare</i>	Flujo de gas
	H	D	Q
	m	m	m ³ /d
BY	33.5	0.22	16700
CC S	25.0	0.30	22000
BPE	21.3	0.22	49400
CC PE	21.3	0.22	20500
ENERPE	93.6	0.40	90000

Modelación de la dispersión de los contaminantes

La modelación de dispersión de contaminantes emitidos por las chimeneas de los flares se ejecutó para el H₂S y el SO₂ que son los contaminantes fundamentales emitidos por las fuentes evaluadas, utilizando la corrida del programa para el cálculo de la concentración a partir de fuentes industriales continuas (Álvarez, 1994), siguiendo la metodología aprobada en la norma cubana (NC 1059:2014) según el **modelo de Berlyand**.

Como velocidad más probable del viento para calcular la concentración instantánea (20 min) se tomó 1.25 m/s, de acuerdo al valor medio obtenido en las mediciones realizadas in situ.

Se corroboraron los resultados obtenidos por el **modelo SCREEN3** (concentraciones horarias) versión 2.5.0 (Lakes Environmental Software, 2007) usando la opción de meteorología completa, de acuerdo a lo recomendado por el anteproyecto de norma cubana para el nivel 1 (NC 1059:2014).

Validación de los pronósticos

Para comprobar la validez de los pronósticos obtenidos se realizaron mediciones de campo de concentración de contaminantes en aire ambiente. Los contaminantes seleccionados, la frecuencia mínima de muestreo y la cantidad de muestras en cada punto fueron establecidos atendiendo a la NC 111: 2004 y la Regulación Ambiental 09/99 de CUPET, y en correspondencia con

prácticas internacionales (ISO 2016, ASTM 2001).

Las muestras fueron tomadas a una altura de 1.5 m sobre el nivel del suelo según especifican los métodos normalizados para la determinación de contaminantes en aire ambiente (NC 111: 2004). Se determinaron como parámetros indicadores de contaminación atmosférica: H₂S, SO₂ y NO_x.

Teniendo en cuenta la influencia de las variables meteorológicas y el comportamiento de las mismas según la época del año, se realizaron monitoreos en la zona de estudio en épocas de lluvia y seca. Se seleccionaron 9 estaciones de muestreo en el área de estudio ubicados en los yacimientos Yumurí, Seboruco y Puerto Escondido, en las cuales se tomaron muestras integradas (promedio de 600 determinaciones en 10 minutos) cada 6 horas (1 AM, 7 AM, 1 PM, 7 PM) durante 24 horas, obteniendo un total de 12 determinaciones de cada contaminante en cada punto de las áreas estudiadas.

Las muestras fueron tomadas y analizadas con equipo Multiwarn II SEP de la firma alemana Draeger (2000) que utiliza:

- 3 sensores electroquímicos para determinar SO₂, H₂S y NO_x
- un sensor IR para determinar hidrocarburos.
- un sensor Cat Ex para determinar COV.

Los datos meteorológicos se determinaron in situ con el empleo del equipo SKYWATCH GEOS 11 de la firma suiza JDC Instruments de:

- Medición de velocidad ($\pm 2\%$) y dirección de viento
- Presión barométrica (± 1.5 hPa)
- Temperatura ambiente (± 0.5 °C)
- Humedad relativa ($\pm 2\%$).

Los datos se procesaron estadísticamente con el empleo de Microsoft Excel 2010 y STATISTICA versión 8.0, para obtener el comportamiento promedio de estos contaminantes y relaciones de interés con las variables meteorológicas vinculadas al medio ambiente atmosférico.

En los puntos evaluados se determinó la Concentración máxima instantánea para 20 minutos y la Concentración promedio diaria (24 horas). Para comparar con los niveles establecidos en las normas cubanas vigentes:

- NC 1020:2014 (concentraciones máximas admisibles de sustancias contaminantes del aire para zonas habitables).
- NC 872:2011 (concentraciones máximas admisibles de sustancias nocivas en el aire de la zona de trabajo).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados fundamentales sobre la operación de los flares instalados en los yacimientos del litoral norte de las provincias Mayabeque y Matanzas se muestran en la tabla 2 (Anexos). En general, se observa para todos los flares, una combustión deficiente que puede originar niveles elevados de H_2S en toda la región donde se ubican.

Las pérdidas de calor de la llama reflejan el proceso de combustión deficiente que origina el tipo de flare empleado en estos yacimientos. Las eficiencias de combustión obtenidas tomando la relación de los valores estimados de calor real liberado a los asociados con una combustión completa del 100% (Leahey et al., 2001), resultaron

menores al 40%, lo cual implica que casi un 60 % del H_2S se emite a la atmósfera sin quemar. Como se aprecia en la tabla, la mayor eficiencia estimada corresponde al flare del CC S y alcanza sólo un 37%, mientras el más deficiente resultó el flare de B PE con apenas un 15% de eficiencia.

Con vistas a lograr una mayor eficiencia en la combustión de los flares instalados en estos yacimientos se requiere modificar algunos parámetros operacionales, aunque esto no garantizará una disminución sensible de la contaminación que originan estas emisiones.

Así tenemos que con una disminución del flujo de gases, un incremento en la temperatura de llama y/o en el diámetro del flare se puede alcanzar cierta mejora de la eficiencia en la combustión.

Se debe tener en cuenta que la combustión en el flare depende también de la composición del gas, su velocidad y las condiciones de viento. En la tabla 3 (Anexos) se muestran las emisiones estimadas de contaminantes (expresadas en kg/d) para estos flares, según los factores de emisión para la categoría de fuentes 1.B.2.c venteo y flare en la extracción de petróleo y gas (EMEP/EEA, 2010).

Aunque los flares no pueden ser eliminados, hay potencial para reducir la cantidad de gas quemada y se pudieran valorar algunas de las tecnologías actuales para reducirlos.

Medidas que se proponen:

- Sistemas de protección de presión de alta integridad (HIPS): las fugas de gas se recogen y se reincorporan al sistema de proceso.
- Uso de nitrógeno como un gas de purga para evitar explosiones (blanqueo) y desoxigenación de agua. (stripping)
- Re-inyección del gas en reservorios de gas.
- Incremento de posibilidades para transporte y capacidad de almacenamiento de gas.
- Reducir requerimientos para una llama piloto.

Modelación de la dispersión de contaminantes:

En todos los casos, las concentraciones máximas de H₂S y SO₂ resultan superiores a la concentración máxima admisible para 20 min, según la NC 1020:2014. También se observa que las concentraciones promedio diarias (24 horas) de ambos contaminantes, resultan superiores a la máxima permisible para puntos habitados (NC 1020:2014) a diferentes distancias de la fuente de emisión, en cada caso.

Para corroborar los resultados obtenidos (Anexos Tablas 4, 5, 6) se utilizó, además, el modelo SCREEN3 (concentraciones horarias) versión 2.5.0 (Lakes Environmental Software, 2007) usando la opción de meteorología completa, de acuerdo a lo recomendado por la norma cubana para el nivel 1 (NC 1059:2014), y el programa DISPER versión 5.2 avanzado (Canarina, 2010).

Se aplicó un procesamiento estadístico para la modelación de las emisiones de SO₂ y H₂S por los tres métodos utilizados, mediante un análisis de varianza de dos factores con una sola muestra por grupo. Se observó, en ambos casos, una **diferencia significativa entre los modelos** pero no existieron diferencias significativas ($F_{exp} < F_{0.95}$) entre los flares.

Comprobación de la validez de los pronósticos obtenidos

En los puntos 1 y 2 (Anexos Tablas 7 y 8) con calmas y con vientos del Este, se corresponden con la concentración máxima esperada según pronósticos obtenidos por el modelo de **Berlyand** para el flare de la BY, si se tiene en cuenta que estos puntos reciben además las emisiones fugitivas de las piscinas de residuales cercanas a los mismos y de descomposición de materia orgánica del pastoreo de ganado en la zona.

En el punto 3, con calmas y con vientos del ESE, se corresponden con la concentración máxima esperada por el modelo **SCREEN3** para el flare de la BY, localizado a unos 700m de este punto. En el punto 5, con calmas y con componente E, se corresponden con la concentración máxima

esperada de acuerdo al modelo de **Berlyand** para el flare del CC S, además de las emisiones de descomposición de materia orgánica del pastoreo de ganado en la zona.

En el punto 4 no estuvieron asociados a las emisiones de los flares referidos y se vinculan con la descomposición de la materia orgánica.

CONCLUSIONES

1. La eficiencia de combustión de los flares instalados en los yacimientos del litoral norte de las provincias Mayabeque y Matanzas resulta deficiente.
2. Los valores de concentración de H₂S y de SO₂ encontrados en los puntos del YY se corresponden con la concentración máxima de este contaminante según pronósticos obtenidos por el modelo de Berlyand (NC 1059:2014) para las emisiones de los flares, si se tiene en cuenta que estos puntos reciben además emisiones fugitivas de las actividades asociadas y de descomposición de materia orgánica del pastoreo de ganado en la zona.
3. Los niveles de concentración de H₂S y de SO₂ en los puntos del YS se corresponden con la concentración máxima de este contaminante según pronósticos obtenidos por el modelo SCREEN3.
4. Las concentraciones de H₂S encontradas en los puntos del YPE se corresponden con la concentración máxima de este contaminante según pronósticos obtenidos por el modelo de Berlyand (NC 1059:2014), mientras que los valores de concentración de SO₂ encontrados se corresponden con la concentración máxima de este contaminante con el modelo SCREEN3.

RECOMENDACIONES

1. Aprovechar al máximo el gas asociado en los yacimientos estudiados.
2. Implementar medidas de reducción de la fuente de gas en la máxima extensión posible.

3. Modificar y/o rediseñar los flares instalados.
4. Uso de puntas de flare eficientes y optimizar el tamaño y número de boquillas del quemador.
5. Maximizar la eficiencia de combustión del flare controlando y optimizando el flujo aire/ combustible.
6. Minimizar la quema de purgas y pilotos sin comprometer la seguridad mediante la instalación de un medio de reducción de gas de purga, unidad de recuperación de gas, purga de gas inerte, tecnología de sello de válvula blando, donde sea posible, e instalación de pilotos de conservación.
7. Minimizar riesgos de apagado del piloto, asegurando velocidad de salida suficiente y guarda vientos.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, O. 1994. Diagnóstico y pronóstico de la contaminación por SO₂ y H₂S en Moa. Modelación con consideraciones de terreno plano. Tesis en opción al Grado Científico de Dr. en Ciencias Geográficas, La Habana.
- Argo Flare. 2013. 2.0 Flare types. <http://www.argoflare.com/>.
- ASTM. D1357-95. 2001. Standard Practice for Planning the Sampling of the Ambient Atmosphere. Annual Book of ASTM Standards, Vol 11.03, PA, USA. CD-ROM.
- Canarina. 2010. Disper versión 5.2. Manual del usuario. España.
- Castiñeira, D., & T. F. Edgar. 2008. CFD for simulation of crosswind on the efficiency of high momentum jet turbulent combustion flames. *Journal of Environmental Engineering*. 134:7:561-571.
- CUPET. 2000. Regulación Ambiental 09/99. Calidad del aire para los sitios de perforación de pozos petroleros en tierra (onshore). La Habana.
- Degges, M. J., J.E. Boyer, K.K. Kuo, & L. Basini. 2010. Influence of steam on the flammability limits of premixed natural gas/oxygen/steam mixtures. *Chemical Engineering Journal* 165(2): 633-638.
- Draeger. 2000. Multiwarn II Technical Handbook. 4th edition. Dräger Sicherheitstechnik GmbH. Hamburg, Germany. 94 pp.
- EMEP/EEA. 2010. Oil – Exploration, production, transport. Emission inventory guidebook 2009, updated June 2010.
- EPA. 2012. *Parameters for Properly Designed and Operated Flare*. Report for Flare Review Panel. U.S. EPA Office of Air Quality Planning and Standards.
- Evans, S., & D. Roseler. 2011. Establishing a dynamic indicator of flare performance using lower flammability limits. Marathon Petroleum Co., LLC.
- Gogolek, P., A. Caverly, R. Schwartz, J. Seebold, & J. Pohl. 2010. Emissions from elevated flare - A survey of the literature. International Flaring Consortium.
- Hu, E., Z. Huang, J. He, C. Jin, and J. Zheng. 2009. Experimental and numerical study on laminar burning characteristics of premixed methane–hydrogen–air flames. *International Journal of Hydrogen Energy* 34(1): 4876-4888.
- ISO. 2016. ISO Fields 13.040.20 Ambient atmospheres. <http://www.iso.org/>.
- IFC - World Bank Group. 2007. *Environmental, Health, and Safety Guidelines for Onshore Oil and Gas Development*. Washington D.C. USA. 27 pp.
- Lakes Environmental Software. 2007. Screen View. Screening Air Dispersion Model (SCREEN3). Version 2.5.0.
- Leahey, D., & M. B. Schroeder. 1990. *Atmospheric Environment* 24A: 2527-2529.
- Leahey, D., & K. Preston. 2001. Theoretical and observational assessments of flare efficiencies. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 51:1610-1616.
- Leahey, D. M., Strosher, M. & Preston, K. 2001. Theoretical and observational assessments of flare efficiencies. Ex. 2082: 1-14. Calgary.
- NC 111: 2004. Reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos.
- NC 872:2011. Sustancias nocivas en el aire de la zona de trabajo. Evaluación de la exposición laboral. Requisitos generales.
- NC 1020: 2014. Calidad del aire. Contaminantes. Concentraciones máximas admisibles y valores guías en zonas habitables.
- NC 1059: 2014. Calidad del aire. Metodología para modelar las afectaciones de la calidad del aire a escala local debido a las emisiones de contaminantes atmosféricos desde fuentes fijas.
- Peterson, J., N. Tuttle, H. Cooper, and C. Baukal. 2007. Minimize facility flaring. *Hydrocarbon Processing*. pp. 111–115.
- Tornado Combustion. 2013. Flare Systems. <http://www.tornadotech.net/>.62.

ANEXOS

Tabla 2. Resultados fundamentales sobre la operación de los flare

FLARE	Calor sensible ganado por el aire	Calor perdido por la llama por radiación	Pérdida de calor de la llama	Calor liberado de combustión completa	Eficiencia de combustión	Altura efectiva de emisión
	J/s	J/s	J/s	J/s	(%)	(m)
BY	538436	1675066	2213501	7441551	30	37.93
CC S	984090	2651616	3635706	9803241	37	30.05
BPE	919753	2312657	3232410	22012731	15	28.74
CC PE	592495	1807777	2400272	9134838	26	26.19
ENER PE	3133660	6760989	9894648	40104167	25	103.51

Tabla 3. Emisiones estimadas de contaminantes (kg/d) para los flares.

FLARE	NOx	COV	CO
BY	200	1.67	16.7
CC S	264	2.20	22.0
BPE	50	0.42	4.2
CC PE	593	4.94	49.4
ENER PE	18	0.15	1.5

Tabla 4. Comparación de resultados de la modelación de emisiones de SO₂

FLARE	Disper Canarina		Screen View		Dispers NC	
	C máx. (mg/m ³)	Distancia (m)	C máx. (mg/m ³)	Distancia (m)	C máx. (mg/m ³)	Distancia (m)
BY	0.177	547	0.020	765	0.081	765
CC S	2.489	587	0.208	778	1.030	778
BPE	3.012	528	0.182	960	1.170	960
CC PE	2.180	617	0.150	776	0.820	776
ENER PE	0.736		0.169	978	0.336	978

Dónde:

C máx.: Concentración máxima.

Tabla 5. Comparación de resultados de la modelación de emisiones de H₂S

FLARE	Disper Canarina		Screen View		Dispers NC	
	C máx. (mg/m ³)	Distancia (m)	C máx. (mg/m ³)	Distancia (m)	C máx. (mg/m ³)	Distancia (m)
BY	0.093	547	0.011	765	0.043	765
CC S	0.712	587	0.060	778	0.300	778
BPE	1.878	528	0.113	960	0.73	960
CC PE	1.359	617	0.093	776	0.51	776
ENER PE	0.587		0.093	547	0.011	765

Tabla 6. Modelación de la dispersión del flare.

BY							
Contaminantes	M (g/s)	Cm (mg/m ³)	Xm (m)	CmU (mg/m ³)	XmU (m)	CUx ³ (mg/m ³)	CMA ⁽¹⁾ (mg/m ³)
H ₂ S	1.841	0.109	196	0.11	203	0.043	0.007
SO ₂	3.465	0.205	196	0.20	203	0.081	0.25
CC S							
H ₂ S	10.84	0.93	177	0.092	177	0.30	0.007
SO ₂	37.90	3.25	177	3.21	177	1.03	0.25
B PE							
H ₂ S	40.73	2.60	226	0.05	235	0.73	0.007
SO ₂	65.31	4.18	226	3.29	235	1.17	0.25
CC PE							
H ₂ S	16.73	1.886	160	1.84	160	0.51	0.007
SO ₂	26.82	3.024	160	2.95	160	0.82	0.25
Ener PE							
H ₂ S	80.222	0.309	674	0.30	674	0.27	0.007
SO ₂	100.671	0.388	674	0.38	674	0.34	0.25

⁽¹⁾ Concentración máxima admisible para 20 min (NC 1020:2014)

Dónde:

M (g/s): Emisión de contaminante.

Cm (mg/m³): Concentración máxima del contaminante bajo condiciones meteorológicas desfavorables.

Xm (m): Distancia a la que ocurre Cm.

CmU (mg/m³): Concentración máxima del contaminante para velocidad del viento diferente de la crítica.

XmU (m): Distancia donde se produce la CmU.

CUx (mg/m³): Concentración de un contaminante, a una distancia dada, en un punto de eje X de traslado del penacho de gases.

Tabla 7. Concentración de H₂S en función del rumbo de vientos, mg/m³

Dirección	BY	CC S	BPE	CC PE	Ener PE
Calma	0.072	0.082	0.028	0.071	0.669
NE		0.000	0.000		
E	0.088	0.107	0.000	0.000	0.156
ESE			0.016	0.000	0.046
SE		0.161		0.121	

Tabla 8. Concentración de SO₂ en función del rumbo de vientos, mg/m³

Dirección	BY	CC S	BPE	CC PE	Ener PE
Calma	0.076	0.112	0.097	0.049	0.186
NE		0.089	0.234		
E	0.091	0.080	0.077	0.000	0.030
ESE			0.245	0.027	0.000
SE		0.016		0.081	