Modeling the dispersion of air pollutants in the sugar industry in Trujillo using the software Screen View, WRPLOT View, and ALOHA

Renato Antonio, Barba Encarnación [1]; Marianella Isabell, Herbozo Perez [2]; Olenka Franccesca, Aedo Mejía [3]; Luciana Andrea, Burga Beteta [4]; Daniela Alicia, Huamán Olarte [5]

Universidad Privada del Norte, Perú, renato.barba@upn.pe, n00341304@upn.pe, n00318377@upn.pe, n00322996@upn.pe, n00389264@upn.pe

Abstract- ***This study evaluates the atmospheric dispersion of pollutants and technological risks associated with liquefied petroleum gas (LPG) storage at a sugar agro-industrial facility in Laredo, Peru. The methodology integrated WRPLOT View to analyze wind patterns, Screen View to model boiler emissions (PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, and NO_x), and ALOHA to simulate LPG BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) scenarios and thermal radiation zones. WRPLOT View results showed that prevailing winds transport the pollutant plume toward urban Laredo, reaching a 1.3 km radius. Screen View simulations indicated that the LARE250 monitoring site (500 m from sources) recorded the highest concentrations of PM_{10} (108.8-118.7 µg/m³), $PM_{2.5}$ (54.90-78.80 µg/m³), and NO_x (up to 259.3 µg/m³), exceeding national Environmental Quality Standards (ECA-Air), whereas SO_2 remained within permissible limits. ALOHA simulations revealed that the critical BLEVE scenario reached thermal radiation impact distances of 198 m (red zone), 281 m (orange zone), and 438 m (yellow zone), with hazards intensifying at higher tank filling levels and lower wind speeds. Ultimately, combining WRPLOT View, Screen View, and ALOHA provides an effective methodology for characterizing dispersion, identifying exposure hotspots, and supporting environmental management and emergency response planning in the sugar industry.***

Keywords-- ***WRPLOT View, Screen View, ALOHA, atmospheric dispersion, air quality.***

Modelamiento de la dispersión de contaminantes atmosféricos en la industria azucarera en Trujillo usando los softwares Screen View, WRPLOT View y ALOHA

Renato Antonio, Barba Encarnación [1]; Marianella Isabell, Herbozo Perez [2]; Olenka Franccesca, Aedo Mejía [3]; Luciana Andrea, Burga Beteta [4]; Daniela Alicia, Huamán Olarte [5]

Universidad Privada del Norte, Perú, renato.barba@upn.pe, n00341304@upn.pe, n00318377@upn.pe, n00322996@upn.pe, n00389264@upn.pe

Resumen- ***Este estudio evalúa la dispersión atmosférica de contaminantes y riesgos tecnológicos por almacenamiento de gas licuado de petróleo (GLP) en una agroindustria azucarera en Laredo, Perú. La metodología integró WRPLOT View para analizar patrones de viento, Screen View para modelar emisiones de calderas (PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2 y NO_x) y ALOHA para simular escenarios de explosión BLEVE de GLP y zonas de radiación térmica. Los resultados de WRPLOT View mostraron que los vientos predominantes transportan la pluma contaminante hacia la zona urbana de Laredo, alcanzando un radio de 1.3 km. Las simulaciones con Screen View indicaron que el punto LARE250 (a 500 m) registró las mayores concentraciones de PM_{10} (108.8–118.7 µg/m³), $PM_{2.5}$ (54.90–78.80 µg/m³) y NO_x (hasta 259.3 µg/m³), superando los Estándares de Calidad Ambiental (ECA-Aire), mientras que el SO_2 permaneció dentro de los límites permisibles. Con ALOHA, el escenario crítico BLEVE alcanzó distancias de afectación térmica de 198 m (zona roja), 281 m (naranja) y 438 m (amarilla), intensificándose el peligro a mayor llenado del tanque y menor velocidad del viento. En conclusión, integrar WRPLOT, Screen View y ALOHA constituye una metodología eficaz para caracterizar la dispersión, identificar zonas críticas de exposición y fortalecer la gestión ambiental y planificación ante emergencias agroindustriales.***

Palabras clave-- ***WRPLOT View, Screen View, ALOHA, dispersión atmosférica, calidad del aire.***

I. Introducción

La contaminación atmosférica constituye actualmente uno de los principales problemas ambientales y de salud pública a nivel mundial, siendo considerada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como uno de los mayores riesgos ambientales para la población, junto con el cambio climático. Este problema está relacionado con la presencia de contaminantes como el material particulado (PM), dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono troposférico (O_3), monóxido de carbono (CO) y dióxido de azufre (SO_2), los cuales afectan directamente la calidad del aire y generan impactos negativos sobre la salud humana y el ambiente [3]. Entre los contaminantes atmosféricos más peligrosos destacan las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$. Las PM_{10} pueden ingresar al sistema respiratorio, mientras que las $PM_{2.5}$, debido a su reducido tamaño, tienen la capacidad de penetrar hasta el torrente sanguíneo, ocasionando enfermedades respiratorias, cardiovasculares y un incremento de la mortalidad prematura. Según reportes internacionales, más del 90 % de la población mundial vive en zonas donde la calidad del aire excede los límites recomendados por la OMS, especialmente respecto a las concentraciones de $PM_{2.5}$ [2]. Frente a esta problemática, la OMS ha establecido nuevas directrices de calidad del aire, recomendando límites máximos de exposición de 20 µg/m³ para PM_{10} y 10 µg/m³ para $PM_{2.5}$, con la finalidad de reducir los efectos adversos sobre la salud humana. Sin embargo, numerosos países aún presentan concentraciones superiores a estos valores debido al crecimiento urbano, el aumento de actividades industriales y el uso intensivo de combustibles fósiles [13].

En el Perú, la contaminación atmosférica representa una problemática creciente. De acuerdo con el Informe Mundial de Calidad del Aire 2019 de IQAir, el país ocupa uno de los primeros lugares en contaminación por $PM_{2.5}$ en América Latina. Asimismo, Lima se encuentra entre las ciudades con mayores niveles de contaminación atmosférica de Sudamérica, principalmente por concentraciones elevadas de $PM_{2.5}$, producto del crecimiento urbano desordenado, el incremento del parque automotor y las actividades industriales [15].

En la región norte del país, particularmente en la provincia de Trujillo y los valles agrícolas cercanos, se desarrollan importantes complejos agroindustriales azucareros, los cuales constituyen una de las principales actividades económicas de la zona. Estas industrias se ubican principalmente en áreas agrícolas como Laredo, Casa Grande y Cartavio, donde se realizan procesos de cultivo, cosecha y transformación de la caña de azúcar para la producción de azúcar y derivados [9]. El entorno de estos complejos agroindustriales se caracteriza por la presencia de extensas áreas de cultivo cercanas a centros poblados y zonas urbanas en expansión, lo cual incrementa la exposición de la población a contaminantes atmosféricos generados durante las actividades industriales. Además, las condiciones meteorológicas propias de la costa norte peruana, como la estabilidad atmosférica, la velocidad del viento y la escasa precipitación, favorecen la acumulación y dispersión de contaminantes en determinadas áreas [6].

Dentro de los principales impactos atmosféricos asociados a la industria azucarera destaca la quema de bagazo de caña y chala, utilizada como fuente de energía en calderas industriales. Este proceso de combustión genera emisiones de material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) y

compuestos orgánicos volátiles (COV), los cuales afectan significativamente la calidad del aire. Asimismo, estos contaminantes contribuyen a problemas ambientales como la lluvia ácida, la formación de smog y el cambio climático debido a la liberación de gases de efecto invernadero [10]. Además de las emisiones derivadas de la combustión, la industria azucarera emplea sustancias peligrosas como el amoníaco (NH_3), utilizado principalmente como refrigerante en diversos procesos industriales. El NH_3 representa un riesgo crítico debido a su alta toxicidad y capacidad de dispersión en caso de fugas accidentales, pudiendo ocasionar daños severos a la salud humana, irritación respiratoria, afectación ocular y riesgos ambientales en las zonas cercanas [14].

Diversos estudios realizados en zonas agroindustriales de Trujillo evidencian que las concentraciones de contaminantes atmosféricos, especialmente PM_{10}, pueden superar los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), principalmente bajo condiciones meteorológicas desfavorables que limitan la dispersión de contaminantes. Asimismo, contaminantes gaseosos como CO, SOx y NOx presentan concentraciones elevadas en áreas cercanas a las industrias azucareras [1]. El crecimiento urbano desordenado y la proximidad entre áreas industriales y residenciales incrementan el riesgo de exposición de la población y deterioran la calidad de vida de los habitantes, generando impactos negativos tanto en la salud pública como en el ambiente [9].

En este contexto, el modelamiento de dispersión atmosférica constituye una herramienta fundamental para evaluar el comportamiento de los contaminantes emitidos por las industrias azucareras. Estos modelos permiten estimar la concentración y distribución de contaminantes en función de variables meteorológicas y características de las fuentes emisoras, facilitando la identificación de zonas potencialmente afectadas y la evaluación de riesgos ambientales y a la salud [15]. Asimismo, permiten predecir el impacto potencial de las emisiones sobre las poblaciones cercanas, apoyar la toma de decisiones en materia de gestión ambiental y verificar el cumplimiento de los estándares de calidad del aire establecidos por la normativa vigente [16]. De igual manera, el uso de modelos de dispersión contribuye a la planificación de estrategias de prevención y mitigación, al análisis de diferentes escenarios operacionales y al diseño de medidas de control para reducir la exposición de la población y los ecosistemas a contaminantes atmosféricos [17]. Diversos estudios han demostrado que estas herramientas constituyen un apoyo eficaz para la evaluación ambiental, ya que integran información meteorológica, topográfica y de las fuentes emisoras para obtener estimaciones confiables de la dispersión de contaminantes [18].

Para el desarrollo del presente estudio se emplearán los softwares Screen View, WRPLOT View y ALOHA. El software WRPLOT View permitirá elaborar y analizar la rosa de vientos de la zona de estudio, determinando la dirección, frecuencia y velocidad del viento. Screen View será utilizado para estimar las concentraciones máximas de contaminantes atmosféricos generados por la industria azucarera, mientras que ALOHA permitirá simular escenarios de emergencia asociados a la liberación accidental de sustancias peligrosas, como el amoníaco. Screen View destaca por su facilidad de aplicación y su capacidad para proporcionar resultados rápidos y confiables en estudios de dispersión atmosférica [14].

Por lo tanto, la presente investigación tiene como objetivo general modelar la dispersión de contaminantes atmosféricos generados por la industria azucarera en la ciudad de Trujillo mediante el uso de los softwares Screen View, WRPLOT y ALOHA. Asimismo, se busca identificar y caracterizar las principales fuentes de emisión, analizar las condiciones meteorológicas mediante la elaboración de la rosa de vientos, estimar las concentraciones máximas de contaminantes atmosféricos, simular escenarios de emergencia por liberación de sustancias peligrosas como el amoníaco (NH_3), identificar las zonas potencialmente afectadas y evaluar los posibles riesgos ambientales y a la salud asociados a las emisiones generadas por la industria azucarera.

II. METODOLOGÍA

2.1 Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada, ya que utiliza el software Screen View para modelar la dispersión de contaminantes atmosféricos generados por la industria azucarera y comparar los resultados con datos reales de emisiones.

2.2 Diseño de la investigación

El diseño es descriptivo-comparativo y no experimental, porque se basa en el análisis de información secundaria y registros ambientales sin manipulación de variables. Se emplearán los softwares Screen View, WRPLOT View y ALOHA para simular la dispersión de contaminantes y analizar las condiciones meteorológicas.

2.3 Ubicación geográfica del área de estudio

El área de estudio se localiza en la provincia de Trujillo, departamento de La Libertad, específicamente en el valle de Santa Catalina, cerca del río Moche. En esta zona se ubica la fuente de emisión atmosférica objeto de estudio, cuya altura, características y caudal de emisión fueron considerados para el análisis de la dispersión de contaminantes en la atmósfera. Asimismo, el área de estudio se encuentra georreferenciada en el sistema de coordenadas UTM, zona 17L, considerando los vértices establecidos para delimitar el área de análisis.

TABLA I
COORDENADAS UTM DE LOS PUNTOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

N°	Código	Dirección	Distancia de la fuente emisora	Coordenadas UTM Este	Coordenadas UTM Norte
1	LARE250	Calle La Reforma N° 250	0.50 km	754521	9104897
2	MAPA165	Calle Manuel Pasco N° 165	0.90 km	754464	9104964
3	PGG470	Av. Pedro García García N° 470	1.30 km	725464	9105446

2.4 Variables de estudio

Se evaluarán contaminantes atmosféricos como PM_{10}, $PM_{2.5}$, NOx, SO_2 y CO, considerando variables como velocidad y dirección del viento, estabilidad atmosférica, altura de chimenea y caudal de emisión para analizar la dispersión atmosférica.

2.5 Población, Muestra y Muestreo

La población estará conformada por las emisiones atmosféricas generadas por una industria azucarera ubicada en la provincia de Trujillo, departamento de La Libertad, considerando contaminantes como PM_{10}, $PM_{2.5}$, NO_x y SO_2.

La muestra estará constituida por los registros de emisiones $PM_{2.5}$ provenientes de las calderas 4, 5 y 6 de la industria azucarera seleccionada, además de los datos meteorológicos necesarios para el modelamiento de dispersión atmosférica.

El muestreo será de tipo no probabilístico por conveniencia, debido a que se emplearán los datos disponibles y accesibles que cumplan con los criterios requeridos para la simulación de contaminantes atmosféricos.

2.6 Procedimientos

2.6.1 Recopilación de información

Se obtendrán datos de emisiones atmosféricas a partir de informes técnicos y registros ambientales de entidades como OEFA, DIGESA y SENAMHI. La información incluirá características de las fuentes emisoras, como altura y diámetro de chimeneas, temperatura y velocidad de salida de gases, además de datos meteorológicos de la zona.

El estudio comprenderá las etapas de identificación de fuentes de emisión, recolección de datos meteorológicos, cálculo de emisiones contaminantes, elaboración de la rosa de viento en WRPLOT View, modelamiento de dispersión en Screen View, simulación de escenarios en ALOHA y análisis de resultados.

Asimismo, se recopilarán datos meteorológicos relacionados con velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad y estabilidad atmosférica, necesarios para evaluar el comportamiento de la dispersión de contaminantes atmosféricos.

2.6.2 Uso del software WRPLOT View

El software WRPLOT View será utilizado para procesar datos meteorológicos y elaborar la rosa de viento, permitiendo analizar la velocidad y dirección predominante del viento en el área de estudio y su influencia en la dispersión de contaminantes atmosféricos.

Para ello, se emplearán datos de dirección y velocidad del viento, así como la frecuencia de ocurrencia, obtenidos de registros meteorológicos históricos.

2.6.3 Uso del software Screen VIEW

El software Screen View será empleado para modelar la dispersión atmosférica de contaminantes provenientes de fuentes fijas, como chimeneas industriales. Permitirá estimar concentraciones de material particulado, principalmente PM_{10}, considerando variables como altura y diámetro de chimenea, velocidad y temperatura de gases, velocidad del viento y distancia al receptor.

El procedimiento incluirá el ingreso de características de la fuente emisora, condiciones meteorológicas, definición del área de estudio, ejecución de la simulación y análisis de resultados.

2.6.4 Uso del software ALOHA

El software ALOHA será utilizado para simular escenarios de dispersión de gases peligrosos y evaluar posibles zonas de riesgo ante liberaciones accidentales de contaminantes como amoniaco y GLP.

Para las simulaciones se considerarán variables meteorológicas y características de emisión, permitiendo identificar distancias de impacto y niveles de concentración del contaminante en el ambiente.

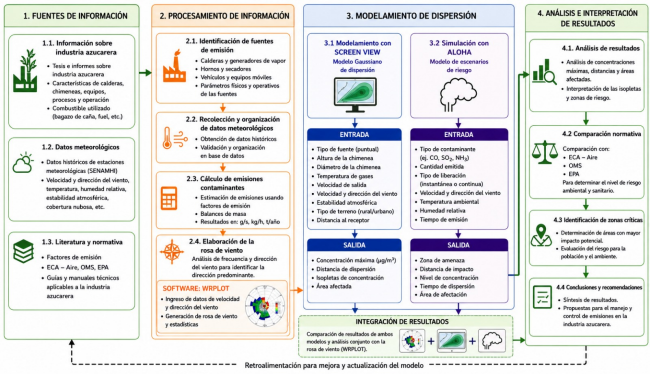


Fig. 1 Diagrama metodológico sobre el modelamiento de dispersión de contaminantes usando WRPLOT, SCREEN VIEW y ALOHA

III. RESULTADOS

3.1 Procesamiento de Datos Meteorológicos y Modelamiento de Rosas de Viento mediante WRPLOT View

Para la caracterización meteorológica del área de estudio, el análisis se estructuró en dos etapas. En primer lugar, para una mayor precisión, se integraron datos específicos de la zona de Laredo, obtenidos a partir de fuentes revisadas previamente y registros locales, los cuales fueron procesados mediante el software WRPLOT View para ejecutar una modelación multitemporal (abril 2026) que refleja con mayor fidelidad la dinámica atmosférica local.

A. Punto de monitoreo 1 (MAPA165)

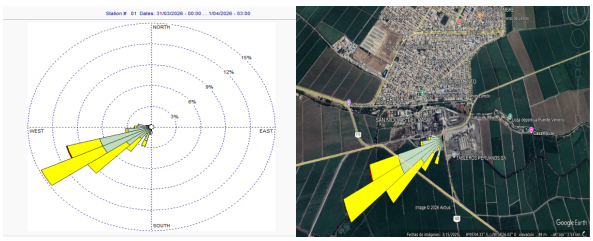




Fig. 2 Rosa de Vientos para el punto de monitoreo 1

La rosa de vientos evidenció una dispersión predominante hacia el Suroeste (SW) y Oeste-Suroeste (WSW), dirigiendo principalmente las emisiones de PM2.5 hacia zonas cercanas al área industrial. Debido a la corta distancia del receptor (500 m), se identificó un impacto directo sobre terrenos adyacentes y sectores próximos de San Nicolás del Paso, incrementando el riesgo de afectación ambiental.

B. Punto de monitoreo 2 (LARE250)

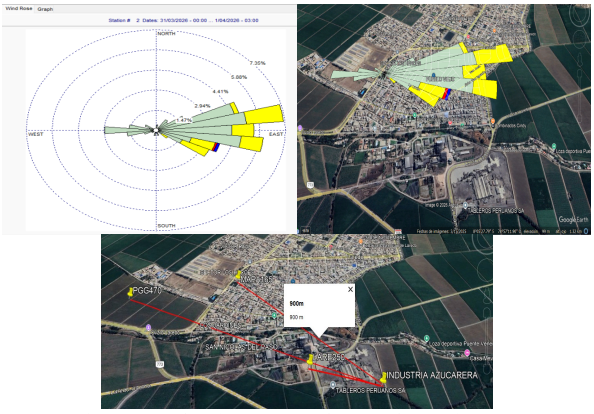


Fig. 3 Rosa de Vientos para el punto de monitoreo 2

Mostró un comportamiento de alto impacto por su posicionamiento, proyectando los flujos hacia el Este (E) y Este-Sureste (ESE). La trayectoria atravesó directamente el casco urbano de Laredo, abarcando áreas residenciales críticas como Pueblo Viejo, Ex Campamento y San José, lo que implicó el transporte directo de material particulado y gases sobre la población.

C. Punto de monitoreo 3 (PGG470)

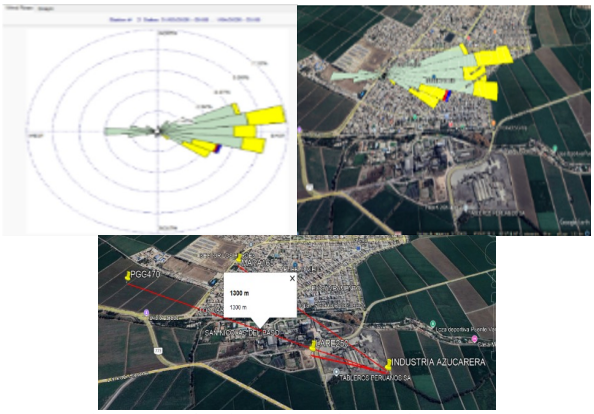


Fig. 4 Rosa de Vientos para el punto de monitoreo

Establecido en el límite exterior, reflejó un ensanchamiento del flujo en forma de abanico hacia el Sureste (SE) y Este-Sureste (ESE) con una frecuencia máxima del 11.1%. La pluma atravesó la Ruta 773 e impactó áreas de equipamiento urbano como el acceso a la Av. Trujillo, la Tienda Víctor y el Parque "TIRSO MAESTRO", evidenciando que la distancia amplió el área total de afectación periférica.



Fig. 5 Rosas de viento del área de estudio

El modelamiento presentado permite identificar el área de influencia directa según la distancia de cada punto. A los 500 metros (Punto 2), la dispersión se concentra principalmente en zonas agrícolas adyacentes; no obstante, al extenderse a 900 metros (Punto 1) y 1300 metros (Punto 3), la pluma contaminante alcanza sectores urbanos de alta densidad como Pueblo Viejo, Ex Campamento y San José. En este radio de alcance, se ven involucrados puntos de alta concurrencia y equipamiento urbano, tales como la Av. Trujillo, la Tienda Víctor, el Parque Tirso Maestro y la Plaza de Armas de Laredo, lo cual evidencia un riesgo de exposición para los residentes y usuarios de estas áreas públicas.

En segundo lugar, se consideró la información de la estación meteorológica “Casa Grande”, ubicada en el distrito de Casa Grande, provincia de Ascope, departamento de La Libertad, Perú, a una altitud de 142 m s.n.m., para establecer un perfil base de las condiciones regionales. Posteriormente, fueron procesados mediante el software WRPLOT View para ejecutar una modelación multitemporal de mayo del 2025 a mayo del 2026 (anual).

TABLA II
COORDENADAS DE LA ESTACIÓN CASAGRANDE (SENAMHI)

Estación	Latitud	Longitud	Altitud
Casa Grande	7°45'1.11" S	79°11'19.3" O	142 msnm

El análisis anual demuestra una consistencia marcada en la dirección del viento, con un flujo predominante orientado hacia el sector suroeste (SO) y sur (S) durante la mayor parte del año.


Fig. 6 Rosas de viento de la estación Casagrande

Esta tendencia meteorológica es determinante en el modelo de dispersión espacial, además demostró un alcance estimado de hasta 1.5 km, concentrando el impacto de las emisiones sobre las áreas agrícolas colindantes a la industria. Esta trayectoria proyecta las emisiones sobre terrenos de cultivo, minimizando significativamente el impacto directo sobre el casco urbano de Casa Grande, el Centro Médico Especializado y la zona de la Plaza de Armas, los cuales se encuentran situados al norte de la fuente emisora, fuera del radio de dispersión principal.

3.2 Dispersión de contaminantes con SCREEN VIEW

Con el fin de evaluar la dispersión atmosférica de los contaminantes generados por las calderas de la agroindustria, se realizaron simulaciones mediante el software Screen View, considerando distintos escenarios operacionales y condiciones meteorológicas. El modelamiento permitió estimar las concentraciones máximas de contaminantes y analizar su comportamiento en función de variables como la estabilidad atmosférica, la velocidad del viento y las características físicas de las fuentes emisoras dentro del área de estudio.

Para la ejecución del modelamiento, se emplearon como datos de entrada los parámetros reportados en una investigación previa desarrollada en la agroindustria evaluada. A continuación, se presentan los datos físicos, operacionales y de ubicación utilizados para la configuración del modelo (Tablas III, IV y V).

TABLA III
DATOS POR PUNTO DE MUESTREO

Punto	Distancia de la fuente emisora	Altura del muestreador
MAPA165	900	5
LARE250	500	5
PGG470	1300	7.5

TABLA IV
PARÁMETROS DE LA FUENTE PUNTUAL PARA MATERIAL PARTICULADO

Punto	Fecha	Tasa PM10 (g/s)	Tasa PM2.5 (g/s)	Altura (m)	Chimenea	Diámetro (m)	Velocidad salida (m/s)	Flujo salida (m³/s)	Temperatura (K)
MAPA165	25/03	4.56	2.30	12.2		3.7	15	119.65	310.15
LARE250	28/03	6.46	3.26	12.2	4	3.7	10.8	125.1	308.15
PGG470	01/04	4.46	2.25	12.2		3.7	14	120.96	310.15
MAPA165	14/04	5.04	2.56	32		2.3	11.9	154.56	310.15
LARE250	17/04	5.21	2.72	32	5	2.3	12.5	155.46	310.15
PGG470	20/04	5.22	2.88	32		2.3	14.1	151.56	310.15
MAPA165	18/05	5.01	2.47	22.1		3	16.1	145.37	308.15
LARE250	21/05	7.82	5.34	22.1	6	3	15.0	148.84	310.15
PGG470	24/05	4.86	2.76	22.1		3	14.9	141.11	310.15

TABLA V
PARÁMETROS DE LA FUENTE PUNTUAL PARA GASES CONTAMINANTES

Punto	Fecha	SO_2 (g/s)	NOx (g/s)	Altura (m)	Chimenea	Diámetro (m)	Velocidad salida (m/s)	Temperatura (K)
MAPA165	25/03	0.82	9.80	12.2		3.7	15.0	310.15
LARE250	28/03	1.05	11.40	12.2	4	3.7	10.8	308.15
PGG470	01/04	0.76	9.20	12.2		3.7	14.0	310.15
MAPA165	14/04	0.95	10.60	32		2.3	11.9	310.15
LARE250	17/04	1.02	11.20	32	5	2.3	12.5	310.15
PGG470	20/04	1.10	11.80	32		2.3	14.1	310.15
MAPA165	18/05	0.88	10.10	22.1		3	16.1	308.15
LARE250	21/05	1.35	13.50	22.1	6	3	15.0	310.15
PGG470	24/05	0.93	10.40	22.1		3	14.9	310.15

En la configuración general del modelo, ejemplificada para la evaluación de PM_{10} en el punto MAPA165 (25/03/2026, Chimenea 4), las fuentes fueron catalogadas como de tipo puntual (*Point Source*), asignando un coeficiente de dispersión correspondiente a entorno urbano (*Urban*). Las alturas de los receptores se fijaron según la elevación real de los equipos de monitoreo en las azoteas de las viviendas: 5 m para MAPA165 y LARE250, y 7.5 m para PGG470. Se consideró un terreno simple plano (*Terrain Height* = 0.00 m), dado que las cotas de medición no sobrepasan la altura de la plataforma de las chimeneas evaluadas.

Respecto a las variables meteorológicas, se seleccionó la opción de clase de estabilidad única (*Single Stability Class*), fijando la clase C - Ligeramente inestable (*Slightly Unstable*), por ser representativa de las condiciones de velocidad promedio del viento en el área de estudio. Asimismo, en las opciones no reguladas (*Non-Regulatory Options*), se habilitó el método *Brode 2 Mixing Height* para obtener una estimación más representativa de la altura de mezcla. La altura del anemómetro se mantuvo en el valor estándar de 10 m, sin activar los módulos de fumigación (*Fumigation*) ni turbulencia de edificios (*Building Downwash*), al no existir cuerpos de agua contiguos ni estructuras que generen arrastre descendente de la pluma.

Para el análisis espacial de concentraciones, se configuraron dos modalidades de evaluación: un barrido de distancias automatizadas (*Automated Distances*) en un rango de 200 m a 1600 m, y un análisis de distancias discretas (*Discrete Distances*) correspondientes a la ubicación exacta de las estaciones de control (500 m para LARE250, 900 m para MAPA165 y 1300 m para PGG470).

La gráfica obtenida en SCREEN View para el parámetro PM10 para el punto MAPA165 - 25/03/2026 de la Chimenea 4, muestra la relación entre la distancia desde la fuente emisora y la concentración del contaminante PM10 en un rango comprendido entre 200 m y 1600 m, considerando un terreno plano (Terrain Height = 0.00 m).

La Fig. 7 muestra la curva de dispersión obtenida para PM_{10} en el rango automatizado (200-1600 m). Los resultados evidencian que la concentración disminuye progresivamente conforme aumenta la distancia desde la fuente de emisión. La concentración máxima se presenta aproximadamente a los 200 m, con un valor cercano a 85 µg/m³, indicando que el mayor impacto atmosférico ocurre en las zonas inmediatas a la infraestructura industrial. A medida que la distancia aumenta, los procesos de dispersión y dilución atmosférica reducen los valores a ~62 µg/m³ a 400 m, ~39 µg/m³ a 800 m, y alcanzar valores próximos a 23 µg/m³ a 1600 m. Este comportamiento concorda con el modelo gaussiano de dispersión, confirmando que el impacto de PM_{10} es predominantemente local y que la exposición más crítica se ubica dentro de los primeros 1000 m.

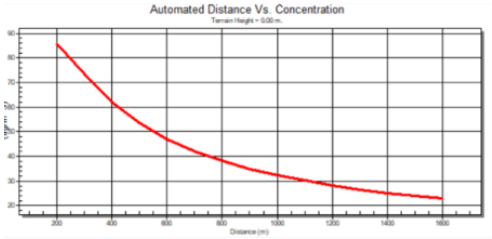


Fig. 7 Concentraciones PM_{10} simuladas para MAPA165 -25/03/2026 de la chimenea 4 (Distancia Automatizada)

Por su parte, la Fig. 8 representa el modelamiento en distancias discretas, evidenciando cómo evoluciona la pluma hasta el receptor específico. Se observa que la concentración máxima modelada alcanza un valor de 34.1 µg/m³ a 900 m de la fuente emisora. Este comportamiento indica que la pluma contaminante experimenta un ascenso inicial y posterior descenso hasta tocar el suelo, por lo que el punto de impacto superficial no es inmediato a la chimenea, sino que depende de la altura de emisión, la velocidad de salida de los gases y la clase de estabilidad atmosférica.

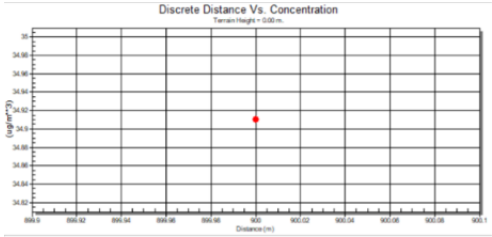


Fig. 8 Concentraciones PM_{10} simuladas para MAPA165 -25/03/2026 de la chimenea 4 (Distancia Discreta)

Los procedimientos descritos fueron aplicados de manera sistemática para cada una de las calderas evaluadas (N° 4, 5 y 6), ajustando las tasas específicas de emisión para material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) y gases (SO_2 y NO_x). Los resultados de concentración superficial se contrastaron con la normativa ambiental nacional e internacional, presentándose resumidos en la Tabla VII y la Tabla IX.

TABLA VI
ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL PARA AIRE

Parámetro	Periodo	Valor [µg/m3]
PM2,5	24 horas	50
PM10	24 horas	100

TABLA VII
CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO

Punto	Fecha	Distancia (m)	Concentración PM10 (µg/m³)	Concentración PM2.5 (µg/m³)
MAPA165	25/03	900	34.91	43.29
LARE250	28/03	500	108.8	54.90
PGG470	01/04	1300	89.79	13.79
MAPA165	14/04	900	77.24	39.23
LARE250	17/04	500	118.7	62.96
PGG470	20/04	1300	53.47	29.50
MAPA165	18/05	900	52.22	25.75
LARE250	21/05	500	115.4	78.80
PGG470	24/05	1300	37.10	21.07

Como se detalla en la Tabla VII, al comparar los valores modelados con el ECA-Aire peruano (Tabla VI; D. S. N.° 003-2017-MINAM), el punto LARE250 (500 m) registró las concentraciones más elevadas de PM_{10} (108.8, 118.7 y 115.4 µg/m³) superando en todos los escenarios el estándar de 100 µg/m³ (24 horas). En contraste, los puntos MAPA165 (900 m) y PGG470 (1300 m) se mantuvieron por debajo del límite legal, aunque MAPA165 mostró un pico de 77.24 µg/m³ en abril. Para el parámetro $PM_{2.5}$, LARE250 también superó sistemáticamente el ECA de 50 µg/m³ alcanzando valores entre 54.90 y 78.80 µg/m³, mientras que las demás estaciones permanecieron en rangos normativamente conformes.

TABLA VIII
ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL Y EPA PARA AIRE

Parámetro	Periodo	ECA [µg/m3]	EPA [µg/m3]
SO2	24 horas	250	-
NO2	1 hora	200	-
NOX	1 hora	-	180.68

TABLA IX
CONCENTRACIONES DE GASES CONTAMINANTES

Punto	Fecha	Distancia (m)	Concentración SO2 (µg/m³)	Concentración NOX (µg/m³)
MAPA165	25/03	900	6.278	75.03
LARE250	28/03	500	17.68	192.0
PGG470	01/04	1300	4.657	56.37
MAPA165	14/04	900	14.56	162.5
LARE250	17/04	500	23.61	259.3
PGG470	20/04	1300	11.27	120.9
MAPA165	18/05	900	9.172	105.3
LARE250	21/05	500	19.92	199.2
PGG470	24/05	1300	7.099	79.39

Respecto a los gases contaminantes (Tabla IX), las concentraciones de SO_2 oscilaron entre 4.657 y 23.61 µg/m³, manteniéndose considerablemente por debajo del ECA nacional de 250 µg/m³ (24 horas; Tabla VIII) en todas las estaciones. En contraste, las concentraciones de NO_x variaron entre 56.37 y 259.3 µg/m³. Al contrastar con el ECA para NO_2 (200 µg/m³ en 1 hora), el monitoreo de abril en LARE250 (259.3 µg/m³) excede el estándar, y el valor de mayo (199.2 µg/m³) se ubica en el margen crítico. Asimismo, bajo el criterio de referencia de la EPA (180.68 µg/m³), las tres fechas evaluadas en LARE250 exceden el umbral permitido.

En conjunto, las modelaciones ratifican que el sector colindante a la estación LARE250 (a 500 m de las calderas) constituye la zona de mayor criticidad ambiental para material particulado y óxidos de nitrógeno, reduciéndose progresivamente la inmisión hacia los puntos lejanos por efecto de la dispersión atmosférica.

3.3 Simulación de escenarios en ALOHA: Explosión de tanque de GLP

El uso de GLP en empresas agroindustriales azucareras se justifica por su aplicación como combustible complementario en procesos térmicos, sistemas auxiliares y operación de quipos industriales. Su alta capacidad calorífica, facilidad de almacenamiento y rápida combustión lo convierten en una alternativa eficiente para el soporte energético de

determinadas operaciones fabriles. No obstante, debido a su naturaleza altamente inflamable, el almacenamiento y manipulación de GLP representan un riesgo tecnológico significativo, especialmente ante escenarios de fuga, incendio o explosión tipo BLEVE, los cuales pueden comprometer la seguridad de trabajadores, infraestructura y la población.

A. Escenario 1: Explosión leve de GLP tipo BLEVE

El Escenario 1 corresponde a una explosión leve de GLP tipo BLEVE, simulada bajo condiciones atmosféricas moderadamente estables, considerando una velocidad del viento de 4 m/s proveniente del sureste (SE), temperatura ambiental de 23 °C, humedad relativa de 50 % y estabilidad atmosférica clase D. Asimismo, se estableció una rugosidad del terreno tipo “urbano o forestal” y una altura de medición del viento de 3 m.

El tanque modelado presentó un diámetro de 1.2 m, longitud de 7 m, volumen de 7 917 L y un nivel de llenado del 50 %, representando un almacenamiento moderado de GLP. Bajo estas condiciones, la simulación generó un evento BLEVE con formación de una bola de fuego de 80 yardas de diámetro y una duración aproximada de combustión de 6 segundos.

Los resultados obtenidos mostraron una zona roja de 173 m, correspondiente al área de mayor peligro con posible afectación letal por radiación térmica; una zona naranja de 244 m, asociada a quemaduras graves; y una zona amarilla de 380 m, donde podrían presentarse efectos térmicos leves y dolor por exposición al calor.

En general, aunque el escenario se clasifica como leve, los resultados evidencian un alcance considerable de afectación térmica, influenciado por las características del tanque, el porcentaje de llenado y las condiciones meteorológicas empleadas en la simulación.

TABLA X
DATOS UTILIZADOS EN EL ESCENARIO 1 DEL CASO 2: EXPLOSIÓN LEVE DE GLP TIPO BLEVE

PARÁMETRO	VALOR
Velocidad del viento	4 metros/segundo
Dirección del viento	SE
Altura de medición del viento	3 metros sobre el suelo
Temperatura del aire	23°C
Rugosidad del terreno	Urbano o forestal
Cobertura de nubes	5 décimas (parcialmente nublado)
Clase de estabilidad atmosférica	D
Humedad relativa	50%
Diámetro del tanque	1.2 m
Longitud del tanque	7 m
Volumen del tanque	7917 L
Nivel de llenado del tanque	50%

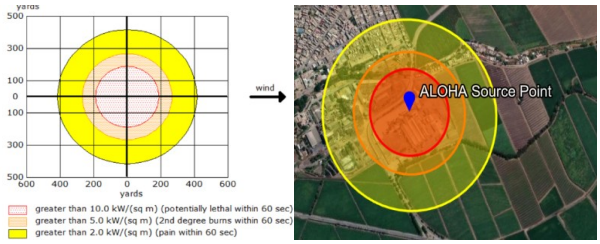


Fig. 9 Zona de amenaza y área de afectación térmica del Escenario 1: explosión leve de GLP tipo BLEVE en el área de estudio.

B. Escenario 2: Explosión moderada de GLP tipo BLEVE

El Escenario 2 corresponde a una explosión moderada de GLP tipo BLEVE, simulada bajo condiciones atmosféricas de estabilidad clase D, con una velocidad del viento de 2.5 m/s proveniente del sureste (SE), temperatura ambiental de 23 °C, humedad relativa de 50 % y una rugosidad del terreno tipo “urbano o forestal”. Asimismo, se estableció una altura de medición del viento de 3 m.

El tanque modelado presentó un diámetro de 1.2 m, longitud de 7 m, volumen de 7 917 L y un nivel de llenado del 65 %, incrementando la cantidad de GLP disponible para el evento explosivo. Bajo estas condiciones, la simulación generó una bola de fuego de 87 yardas de diámetro y una duración aproximada de combustión de 6 segundos.

Los resultados obtenidos mostraron una zona roja de 191 m, correspondiente al área de mayor peligro con posible afectación letal por radiación térmica; una zona naranja de 263 m, asociada a quemaduras graves; y una zona amarilla de 412 m, donde podrían presentarse efectos térmicos leves y dolor por exposición al calor.

En general, el incremento del nivel de llenado del tanque y la menor velocidad del viento ocasionaron un mayor alcance de las zonas de amenaza en comparación con el escenario leve, evidenciando una mayor severidad del evento explosivo.

TABLA XI
DATOS UTILIZADOS EN EL ESCENARIO 2 DEL CASO 2: EXPLOSIÓN MODERADA DE GLP TIPO BLEVE

PARÁMETRO	VALOR
Velocidad del viento	2.5 metros/segundo
Dirección del viento	SE
Altura de medición del viento	3 metros sobre el suelo
Temperatura del aire	23°C
Rugosidad del terreno	Urbano o forestal
Cobertura de nubes	5 décimas
Clase de estabilidad atmosférica	D
Humedad relativa	50%
Diámetro del tanque	1.2 m
Longitud del tanque	7 m
Volumen del tanque	7917 L
Nivel de llenado del tanque	65%

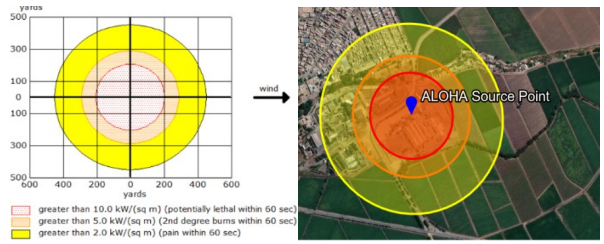


Fig. 10 Zona de amenaza y área de afectación térmica del Escenario 2: explosión moderada de GLP tipo BLEVE en el área de estudio.

C. Escenario 3: Explosión crítica de GLP tipo BLEVE

El Escenario 3 corresponde a una explosión crítica de GLP tipo BLEVE, simulada bajo condiciones atmosféricas más favorables para una mayor afectación térmica. Para la simulación se consideró una velocidad del viento de 1.5 m/s proveniente del sureste (SE), temperatura ambiental de 23 °C, humedad relativa de 50 %, estabilidad atmosférica clase E y una rugosidad del terreno tipo “urbano o forestal”. Asimismo, se estableció una altura de medición del viento de 3 m.

El tanque modelado presentó un diámetro de 1.2 m, longitud de 7 m, volumen de 7 917 L y un nivel de llenado del 80 %, incrementando significativamente la cantidad de GLP

disponible para la explosión. Bajo estas condiciones, la simulación generó una bola de fuego de 93 yardas de diámetro y una duración aproximada de combustión de 7 segundos.

Los resultados obtenidos mostraron una zona roja de 198 m, correspondiente al área de mayor peligro con posible afectación letal por radiación térmica; una zona naranja de 281 m, asociada a quemaduras graves; y una zona amarilla de 438 m, donde podrían presentarse efectos térmicos leves y dolor por exposición al calor.

En general, la menor velocidad del viento, la estabilidad atmosférica clase E y el mayor nivel de llenado del tanque favorecieron un incremento del alcance de las zonas de amenaza, evidenciando el escenario de mayor severidad y riesgo térmico entre los casos evaluados.

TABLA XII
DATOS UTILIZADOS EN EL ESCENARIO 3 DEL CASO 2: EXPLOSIÓN CRÍTICA DE GLP TIPO BLEVE

PARÁMETRO	VALOR
Velocidad del viento	1.5 metros/segundo
Dirección del viento	SE
Altura de medición del viento	3 metros sobre el suelo
Temperatura del aire	23°C
Rugosidad del terreno	Urbano o forestal
Cobertura de nubes	5 décimas
Clase de estabilidad atmosférica	E
Humedad relativa	50%
Diámetro del tanque	1.2 m
Longitud del tanque	7 m
Volumen del tanque	7917 L
Nivel de llenado del tanque	80%

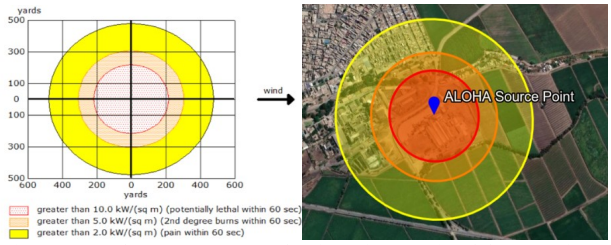


Fig. 11 Zona de amenaza y área de afectación térmica del Escenario 3: explosión crítica de GLP tipo BLEVE en el área de estudio.

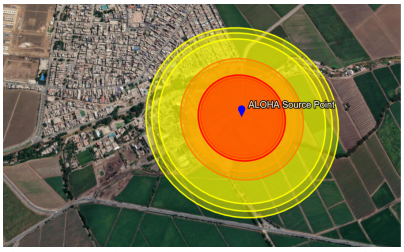


Fig. 12 Visualización conjunta de los 3 escenarios en el lugar de estudio

El modelo de afectación, centrado en la zona agroindustrial de Laredo, describe un radio de riesgo decreciente que impacta de manera diferenciada a la infraestructura local según su proximidad al epicentro. La zona roja concentra el impacto máximo, comprometiendo severamente las instalaciones industriales adyacentes. La zona naranja, que envuelve al núcleo central, representa un nivel de exposición crítico para puntos estratégicos como el restaurante Combinados Cindy, la Compañía de Bomberos de Laredo 188, el Establo Laredo y la mayor parte de las instalaciones del Colegio Louis Pasteur. Finalmente, la zona amarilla se extiende hacia la periferia urbana, incluyendo instituciones como el Centro del Adulto Mayor (CAM) Laredo y el restaurante Plaza Garibaldi; si bien estas áreas se encuentran en el perímetro de menor intensidad del modelo, permanecen dentro del radio de influencia y riesgo potencial determinado por la simulación.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados evidenciaron que las simulaciones realizadas con las direcciones de viento predominantes en la zona de Laredo generaron áreas de afectación principalmente sobre sectores con cobertura vegetal y escasa presencia poblacional.

La dispersión de $PM_{2.5}$ en Laredo muestra una relación directa con la variabilidad meteorológica local. Los modelos indican que, al expandirse la pluma contaminante desde la fuente emisora en un radio entre 500 m y 1 300 m, el impacto se traslada desde áreas periféricas hacia zonas urbanas consolidadas como Pueblo Viejo, Ex Campamento, San José y la Av. Trujillo. Estudios sobre la quema de caña de azúcar en Laredo reportan que las concentraciones máximas ocurren cerca de las fuentes y superan los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para aire durante junio–noviembre, cuando predominan vientos del sur-sureste y condiciones de inversión por subsidencia [16]. Bajo estos parámetros, el Ministerio del Ambiente exige control estricto de emisiones industriales en periodos de alta estabilidad atmosférica para evitar la vulneración de los ECA [17].

En Casa Grande, la dinámica de dispersión evaluada hasta 1.5 km muestra menor riesgo directo para la población urbana concentrada. Las series temporales (mayo 2025–mayo 2026) registran persistencia eólica marcada con flujos predominantes hacia el suroeste (SO), lo que canaliza sistemáticamente la pluma contaminante hacia corredores agrícolas de baja densidad poblacional. Este comportamiento eólico genera una zona de sombra atmosférica para el casco urbano y el Centro Médico Especializado (ubicados al norte de la fuente emisora), donde las concentraciones de $PM_{2.5}$ permanecen significativamente menores respecto a la trayectoria principal de la pluma. Los gradientes térmicos costa-andina característicos de los valles de La Libertad canalizan las masas de aire hacia corredores agrícolas abiertos, funcionando como un mecanismo natural de mitigación que desvía la mayor carga de la pluma hacia terrenos de cultivo [18]. A diferencia del escenario urbano de Laredo, donde la rugosidad del terreno y la proximidad de receptores aceleran la exposición, en Casa Grande la orientación eólica predominante respecto a la fuente es el factor crítico que determina la viabilidad ambiental de la actividad, minimizando la inmisión en zonas residenciales de alta densidad [19].

La orientación eólica predominante y los gradientes térmicos costa-andina en Casa Grande actúan como factores de mitigación natural que reducen la inmisión urbana de PM2.5; el riesgo para la población es menor que en Laredo, pero se requiere vigilancia estacional de cambios de viento y

eventos extremos para evitar desviaciones temporales de la pluma hacia zonas sensibles.

Los resultados obtenidos presentan similitudes con el estudio [20], quien empleó Screen View para evaluar la dispersión de contaminantes atmosféricos y demostró la influencia de las condiciones meteorológicas y las características de la fuente emisora sobre las concentraciones en superficie. En ambos estudios se observó que las concentraciones disminuyen conforme aumenta la distancia desde la fuente debido a los procesos de dispersión y dilución atmosférica. Asimismo, se evidenció una marcada fluctuación de las concentraciones contaminantes asociada a la variabilidad de las condiciones atmosféricas y de las emisiones, comportamiento también reportado por [21]. No obstante, mientras el estudio de referencia analizó emisiones volcánicas con impacto regional, la presente investigación evaluó fuentes fijas industriales, identificando que los mayores impactos se concentran en las zonas cercanas a las calderas, donde las concentraciones de PM_{10}, $PM_{2.5}$ y NO_x llegaron a superar los ECA, evidenciando un potencial riesgo para la calidad del aire y la salud de la población expuesta.

Por otro lado, el presente estudio también presento similitudes con el estudio [23], quien empleó Screen View para modelar la dispersión de contaminantes atmosféricos bajo condiciones de estabilidad atmosférica C. En ambos estudios se evidenció que las concentraciones de los contaminantes presentan una variación significativa en función de la distancia a la fuente emisora y de las condiciones meteorológicas predominantes, observándose una marcada fluctuación de las concentraciones debido a los procesos de dispersión atmosférica. Asimismo, los resultados confirman que la estabilidad atmosférica influye directamente en el comportamiento de la pluma contaminante y en la distribución de las concentraciones en superficie. Sin embargo, mientras el estudio [23] reportó concentraciones máximas que se mantuvieron dentro de los límites normativos para los contaminantes evaluados, en la presente investigación se identificaron concentraciones de PM_{10}, $PM_{2.5}$ y NO_x que superaron los ECA en determinados puntos de monitoreo, especialmente en LARE250 (500 m), lo que evidencia un mayor potencial de afectación a la calidad del aire asociado a las emisiones de las calderas de la agroindustria azucarera evaluada.

Respecto a los escenarios de GLP, las simulaciones realizadas con el software ALOHA evidenciaron que el incremento de la severidad del evento produce una ampliación progresiva de las zonas de amenaza y del alcance de la radiación térmica, aumentando el riesgo para las personas, las instalaciones y la infraestructura ubicada en el área de influencia. En el escenario leve, las distancias de afectación fueron reducidas; sin embargo, en los escenarios moderado y crítico se observó un incremento considerable del área expuesta, lo que demuestra que la magnitud de la fuga y las condiciones meteorológicas influyen directamente en el comportamiento del evento y en la extensión de sus efectos.

Estos resultados coinciden con lo reportado por [22], quien empleó el software ALOHA para analizar escenarios con GLP y concluyó que las áreas de exposición al peligro dependen de la cantidad de combustible involucrado, las características del evento y las condiciones atmosféricas. Al comparar ambos estudios, se observa que, aunque las distancias de afectación difieren debido a los parámetros específicos considerados en cada simulación, en ambos casos se evidencia que los escenarios de mayor magnitud generan impactos más extensos y confirman la utilidad del software ALOHA como herramienta para la evaluación de riesgos tecnológicos y la planificación de medidas preventivas y de respuesta ante emergencias.

V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos mediante WRPLOT View permitieron caracterizar el comportamiento del viento en la zona de estudio, evidenciando que la dirección predominante favorece el transporte de la pluma contaminante hacia sectores específicos dependiendo del punto de monitoreo. En Laredo, la dispersión alcanzó distancias de hasta 1300 m, comprometiendo zonas urbanas como Pueblo Viejo, Ex Campamento, San José, la Av. Trujillo y otros espacios públicos, mientras que en Casa Grande la dirección predominante del viento proyectó la pluma principalmente hacia áreas agrícolas, con un alcance aproximado de 1.5 km, reduciendo la exposición directa de la población urbana. Estos resultados demuestran que las condiciones meteorológicas constituyen el principal factor que determina la dirección y el alcance de la dispersión atmosférica, proporcionando información fundamental para la planificación territorial y la gestión ambiental.

La modelación realizada mediante Screen View permitió estimar las concentraciones máximas de PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2 y NO_x generadas por las calderas de la agroindustria, evidenciando que las concentraciones disminuyen progresivamente conforme aumenta la distancia desde la fuente emisora debido a los procesos de dispersión y dilución atmosférica. El punto de monitoreo LARE250 (500 m) presentó las mayores concentraciones de PM_{10} (108.8, 118.7 y 115.4 µg/m³) y $PM_{2.5}$ (54.90, 62.96 y 78.80 µg/m³), superando los Estándares de Calidad Ambiental establecidos por el MINAM. Asimismo, para NO_x se registró una concentración máxima de 259.3 µg/m³, superior al ECA de 200 µg/m³, mientras que las concentraciones de SO_2 oscilaron entre 4.657 y 23.61 µg/m³, manteniéndose dentro del límite permisible de 250 µg/m³. Estos resultados identifican a LARE250 como la zona de mayor impacto atmosférico y demuestran la utilidad de Screen View para evaluar el cumplimiento de la normativa ambiental e identificar áreas prioritarias para el control de emisiones.

Las simulaciones realizadas con ALOHA para escenarios de explosión tipo BLEVE de GLP demostraron que el incremento del nivel de llenado del tanque y la disminución de la velocidad del viento generan una expansión progresiva de

las zonas de amenaza por radiación térmica. En el escenario leve se obtuvo una zona roja de 173 m, una zona naranja de 244 m y una zona amarilla de 380 m; en el escenario moderado estas distancias aumentaron a 191 m, 263 m y 412 m, respectivamente; mientras que en el escenario crítico alcanzaron 198 m, 281 m y 438 m, con una bola de fuego de 93 yardas y una duración aproximada de 7 segundos. Estas condiciones incrementaron significativamente el riesgo para instalaciones industriales, la Compañía de Bomberos de Laredo N° 188, el Colegio Louis Pasteur, el Centro del Adulto Mayor (CAM) y otros establecimientos cercanos. Los resultados evidencian que ALOHA constituye una herramienta eficaz para estimar áreas de afectación térmica, definir perímetros de seguridad y fortalecer la planificación de medidas de prevención y respuesta frente a emergencias con GLP.

REFERENCIAS

[1] V. N. Bailon Hilario, A. M. Bailon Vega, F. J. Balbin Pérez, B. A. Mellisho Quito y S. M. Meza Arquinigo, "Parámetros ambientales en las industrias," Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú, 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.scribd.com/document/890866445/PARAMETROS-INDUSTRIALES

[2] S. I. Cabanillas Naño, "Producción de azúcar en Agroindustrial Laredo y su efecto en los factores ambientales del entorno, año 2018," Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú, 2019. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.unitru.edu.pe/server/api/core/bitstreams/b2a30900-2a55-4834-8aa5-a256dfd2f578/content

[3] J. P. Carrera, E. Loyola y S. Iglesias, "Impacto ambiental ocasionado por la quema de la caña de azúcar en Laredo Trujillo," Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, 2020. [En línea]. Disponible en: https://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtual/publicaciones/geologia/v13_n26/pdf2/a13v13n26.pdf

[4] G. M. Castillo Avila y A. M. Guerrero Padilla, "Impacto de material particulado PM2.5 en la calidad del aire por la quema de Saccharum officinarum en Laredo, Trujillo-Perú," *SCIÉNDO INGENIUM*, vol. 21, no. 1, pp. 109-120, 2025.

[5] J. S. Chávez Parimango, "Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales, para reuso en riego de parques y jardines en el distrito de Laredo provincia Trujillo La Libertad 2021," Tesis de pregrado, Universidad Privada de Trujillo, Trujillo, Perú, 2021. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uprit.edu.pe/handle/UPRIT/454

[6] M. T. Gurav *et al.*, "Air contaminants from sugar industry chimneys: Evaluating environmental hazards and mitigation strategies," *ChemSci Advances*, vol. 1, no. 1, e0177, 2024.

[7] U. A. Hernández-Sánchez, R. Á. Meléndez-Armenta, H. R. González-Moreno, M. C. López-Méndez y A. A. Rico-Barragán, "Impacts of sugarcane industry on air quality and public health in a rural area of Atoyac, México," *Urban Climate*, vol. 64, p. 102700, 2025.

[8] H. A. Herrera Vega, "Contaminación del agua superficial por un ingenio azucarero y su impacto en el medio ambiente en Andahuasi 2017," Tesis de maestría, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú, 2018. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/UNJFSC/2161

[9] L. E. Inocente Díaz y J. D. Castillo Valladares, "Determinación de dispersión de contaminantes atmosféricos a través del modelo AERMOD en la Empresa Agraria Azucarera Andahuasi S.A.A. 2024," Tesis de grado, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú, 2025. [En línea]. Disponible en: http://hdl.handle.net/20.500.14067/12185

[10] J. J. López Vásquez, "Problemática y propuesta de gestión ambiental en la ciudad de Laredo, Trujillo, Perú," *Revista Ciencia y Tecnología*, 2012. [En línea]. Disponible en: https://es.scribd.com/document/158113588/Problematica-y-propuesta-de-gestion-ambiental-en-la-ciudad-de-Laredo-Trujillo-Peru

[11] J. E. Malimba Flores, "Quema de caña de azúcar y su incidencia en la contaminación atmosférica en la localidad de Andahuasi Sayán - 2020," Tesis de grado, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú, 2023. [En línea]. Disponible en: http://hdl.handle.net/20.500.14067/7353

[12] S. Mardiana, R. Widhiastuti, Sumono y L. Erningpraja, "Model of sugar industrial waste management based on cleaner production (Case study: Sei Semayang plantation and sugar mill)," *BirEx Journal*, vol. 1, no. 1, 2020. [En línea]. Disponible en: http://www.bircu-journal.com/index.php/birex

[13] S. Mori Nonato, "La producción de azúcar y el impacto ambiental de la Empresa Azucarera Andahuasi 2020," Tesis de maestría, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú, 2024. [En línea]. Disponible en: http://hdl.handle.net/20.500.14067/10135

[14] L. Valverde Nolasco, "Modelo pronóstico para la producción de caña de azúcar en la Empresa Agroindustrial Laredo S.A.A periodo enero 2012-noviembre 2019," Tesis de grado, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú, 2021. [En línea]. Disponible en: https://hdl.handle.net/20.500.14414/16397

[15] J. R. Veliz Ríos, "Impacto socioambiental de la quema de caña de azúcar por parte de la empresa Pomalca en la provincia de Chiclayo, 2024," Tesis de pregrado, Universidad Católica Los Ángeles de Chimbote, 2025. Disponible en: https://repositorio.uladech.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13032/42623/IMPACTO_SOCIO_AMBIENTAL_QUEMA_DE_CANA_DE_AZUCAR_VELIZ_RIOS_JHANIRA_ROSMERY.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[16] A. Martinez y R. López, "Impacto de material particulado PM2.5 en la calidad del aire por la quema de Saccharum officinarum en Laredo, Trujillo-Perú," *SCIÉNDO INGENIUM*, vol. 21, no. 1, pp. 109-120, 2025.

[17] Ministerio del Ambiente (MINAM), "Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM: Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire," Lima, Perú, 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/274483-decreto-supremo-n-003-2017-minam.

[18] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), "Vigilancia de la calidad del aire en el Área Metropolitana de Lima y Callao - Diciembre 2024," Lima, Perú, 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03201_SENA-141.pdf

[19] H. Choquetico Apaza, "Modelo de regresión funcional para la predicción de PM2.5 en función de PM10 en Lima Perú," Tesis de grado, Universidad Peruana Unión, Lima, Perú, 2024. [En línea]. Disponible en: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UEPU_c03c1577c0f6519ef4cb9c3eb4806a47

[20] J. R. Velastegui Sánchez, "Simulación de la dispersión de cenizas volcánicas mediante los software ambientales Screen View y Disper 5.2," *UNIANDES Episteme: Revista de Ciencia, Tecnología e Innovación*, vol. 3, no. 1, 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.redalyc.org/pdf/5646/564677239002.pdf

[21] S. A. Sono Alba, "Análisis del software ALOHA como metodología para modelar el área de exposición al peligro en accidentes con materiales peligrosos," *Espiral, Revista de Geografías y Ciencias Sociales*, vol. 6, no. 11, pp. 125-135, 2024.

[22] M. A. Arciniega Galaviz, "Metodología para simulaciones de liberación de sustancias peligrosas empleando el programa ALOHA," en *Métodos cuantitativos aplicados a recursos naturales, medioambiente y la sostenibilidad*, Astra Editorial, 2024, p. 212.

[23] O. Guzmán-López, L. Álvarez Pérez, A. D. Reyes Martínez y M. del C. Cuevas Díaz, "Modelación con Screen View de la dispersión de contaminantes atmosféricos con datos de la estación de monitoreo de Minatitlán, Veracruz," en *Transdisciplinariedad en educación ambiental para la sustentabilidad*, R. Á. A. Mendieta, A. Salinas Castro y L. Victorino Ramírez, Eds. Ediciones Comunicación Científica, 2026, pp. 117-125.