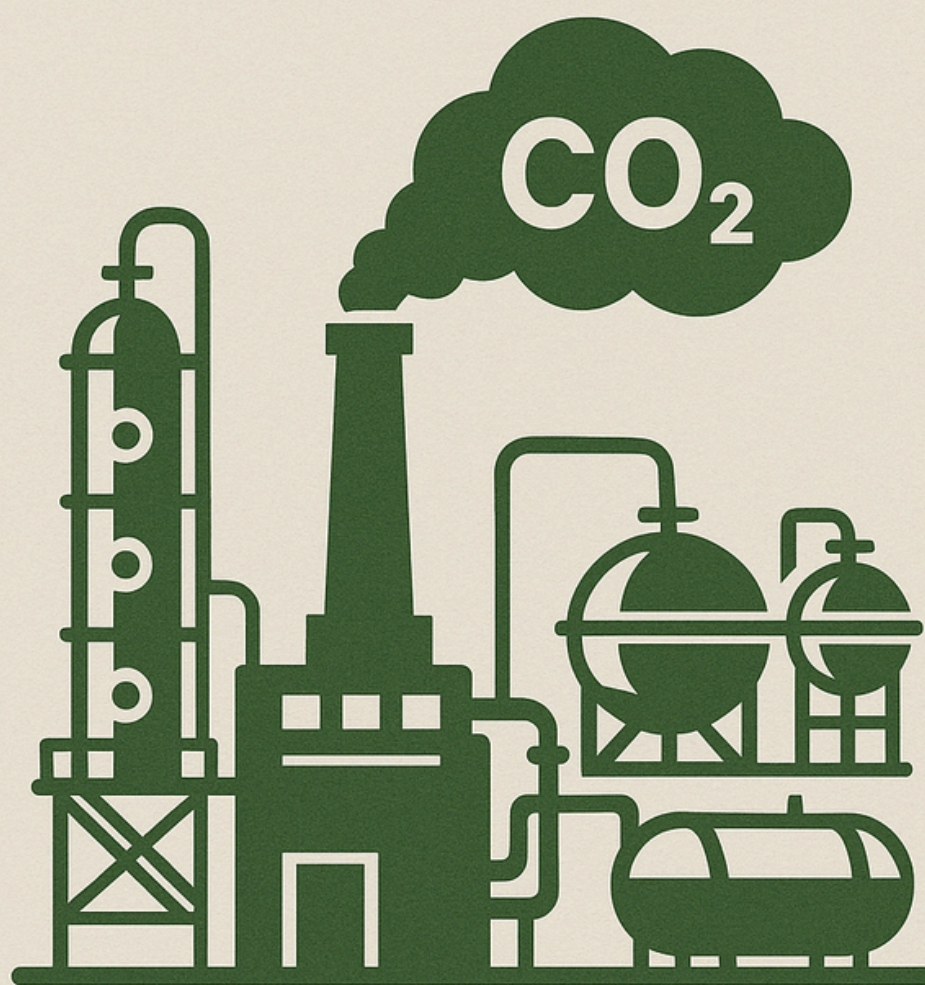


CARLOS ALBERTO ROCHA VELA, JORGE ALEX RENGIFO PEZO,
FERNANDO JAVIER SALAS BARRERA, JORGE ANTONIO SUÁREZ
RUMICHE Y LUIS ANTONIO FLORES FLORES

Evaluación de la emisión de CO₂ desde la Planta Piloto de FIQ-UNAP



Evaluación de la emisión de CO₂ desde la Planta Piloto de la FIQ- UNAP

Editor



Carlos Alberto Rocha Vela

crochave21@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0003-3460-1162>

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana
Facultad de Ingeniería Química, Iquitos – Perú

Jorge Alex Rengifo Pezo

Jorge.rengifo@unapiquitos.edu.pe

 <https://orcid.org/0009-0000-9137-9105>

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana
Facultad de Ingeniería Química, Iquitos – Perú

Fernando Javier Salas Barrera

fernando.salas@unapiquitos.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0002-0177-3553>

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana
Facultad de Ingeniería Química, Iquitos – Perú

Jorge Antonio Suárez Rumiche

jorgeantonio.suarez@unapiquitos.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0001-6823-8734>

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana
Facultad de Ingeniería Química, Iquitos – Perú

Luis Antonio Flores Flores

luis.flores@unapiquitos.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0002-1981-2012>

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana
Facultad de Ingeniería Química, Iquitos – Perú

ÍNDICE

RESEÑA.....	6
INTRODUCCIÓN.....	7
PARTE I.....	10
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	11
Antecedentes	11
Bases teóricas	14
Modelo gaussiano de dispersión de contaminantes.....	14
Formulación de R. W. McMullen.....	16
Ley potencial de Deacon	17
Ecuaciones de Briggs.....	18
Definición de términos básicos	19
Concentración de dióxido de carbono en la atmósfera.....	19
Tasa de emisión de dióxido de carbono.....	20
Altura física de la chimenea	20
Elevación de la pluma de contaminante	20
Altura efectiva de la chimenea	20
Perfil de velocidad del viento	20
Coordenadas de posición	21
Coeficientes de dispersión horizontal y vertical.....	21
Perfiles de concentración de dióxido de carbono en la atmósfera.....	22
PARTE II	23
CAPÍTULO II: VARIABLES E HIPÓTESIS	24
Variables y definiciones operacionales	24
Formulación de la hipótesis	27
Hipótesis general	27
Hipótesis específicas.....	27
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	28
Tipo y diseño de la investigación.....	28
Población y muestra	29
Técnicas e instrumentos	31
Procedimientos de recolección de datos.....	31

Técnicas de procesamiento y análisis de datos	32
Aspectos éticos.....	32
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	33
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	41
CAPÍTULO VI: PROPUESTA	45
CONCLUSIONES	52
RECOMENDACIONES	55
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

RESEÑA

Este libro constituye un aporte riguroso y pertinente al estudio de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) generadas en procesos industriales a escala piloto, con especial énfasis en el contexto académico y de investigación aplicada. La obra se centra en la Planta Piloto de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (FIQ-UNAP), tomando como caso de estudio un espacio formativo donde convergen la teoría, la experimentación y la conciencia ambiental.

A través de una metodología científica clara, los autores abordan la cuantificación y análisis de las emisiones de CO₂, considerando variables como el tipo de combustible utilizado, la eficiencia de los equipos, las condiciones de operación y las normativas ambientales vigentes. El libro destaca por su enfoque integral, que no solo examina el impacto ambiental de las emisiones, sino que también plantea estrategias de mitigación, mejoras tecnológicas y propuestas formativas para estudiantes de ingeniería.

La obra se caracteriza por su lenguaje técnico accesible, su fundamentación teórica en ingeniería de procesos y su compromiso con la sostenibilidad. Además, establece un puente entre el conocimiento académico y la práctica profesional, promoviendo una cultura de responsabilidad ambiental dentro del ámbito universitario.

Este libro no solo documenta una experiencia concreta de evaluación de emisiones en una planta piloto, sino que también ofrece una guía replicable para instituciones educativas, investigadores y profesionales que buscan comprender, medir y reducir el impacto de las emisiones industriales en contextos similares.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad en la Planta Piloto de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Universidad Nacional de la Amazonía (UNAP), se realizan diferentes procesos de producción (destilación, cocción y secado), para los cuales es necesario el uso de vapor de agua que se genera en una caldera que utiliza petróleo (diésel 2) como combustible. Esto indica, que, para realizar los mencionados procesos de producción, necesariamente se tiene que quemar petróleo (diésel 2), produciéndose gases de combustión que son emitidos por medio de una chimenea industrial a la atmósfera. El producto de la combustión, básicamente está formado por los siguientes compuestos: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), vapor de agua (H₂O), nitrógeno (N₂) y oxígeno (O₂). Siendo considerados contaminantes gaseosos los cuatro primeros y entre estos, el dióxido de carbono es el que tiene mayor concentración.

Actualmente en el Perú, el Ministerio del Ambiente (MINAM) por medio de sus organismos adscritos, se encarga de supervisar a las organizaciones o instituciones que se dedican a realizar actividades industriales (producción de alimentos, minería, producción de energía eléctrica, etc.), con el objeto de verificar si cumplen o no con la normativa correspondiente. Es por esto, que toda organización que se dedique a las actividades arriba mencionadas, debe contar con una herramienta que le permita cuantificar las emisiones de gases contaminantes y el impacto que estos tienen al dispersarse en la atmósfera, por lo cual la Planta Piloto FIQ-UNAP no debe ser la excepción.

Para evaluar la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, procedente de una fuente de emisión puntual (chimenea industrial), se puede aplicar el modelo gaussiano de dispersión de contaminantes, pero para esto es necesario conocer datos de la fuente de emisión y las condiciones meteorológicas. Entonces, el problema identificado en la presente investigación es que: “no se puede aplicar ningún modelo de dispersión de contaminantes, para evaluar la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, procedente de la chimenea industrial de la Planta Piloto FIQ-UNAP”, pues se desconocen los valores de las siguientes variables: la tasa de emisión de dióxido de carbono, la altura efectiva de la chimenea industrial y la velocidad media del viento a la altura efectiva de la chimenea industrial; las cuales según el modelo gaussiano de

dispersión de contaminantes, se relacionan directamente con la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera.

La Planta Piloto FIQ-UNAP, debe contar con un plan de gestión ambiental, en el cual se debe incluir estudios sobre sus emisiones de gases contaminantes a la atmósfera, pues puede representar un riesgo para la salud de las personas que habitan a su alrededor.

La presente investigación se fundamenta en el modelo gaussiano de dispersión de contaminantes y tiene como propósito crear una herramienta que permita evaluar la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, procedente de una fuente de emisión puntual.

El informe final de esta investigación, servirá en la Planta Piloto FIQ-UNAP como una herramienta para evaluar la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, procedente de su chimenea industrial; verificando de esta manera si la concentración de dióxido de carbono, está dentro de los límites permisibles que establece la Norma Ambiental de Calidad de Aire.

Cabe mencionar que el informe final de esta investigación, también servirá para realizar múltiples simulaciones, si es que desea modificar las dimensiones de la chimenea industrial (radio y altura física) al aumentar la tasa de emisión de dióxido de carbono. De acuerdo a lo mencionado líneas arriba, es que en la presente investigación se plantea la siguiente interrogante general: ¿Es posible evaluar la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera procedente de la chimenea industrial de la Planta Piloto FIQ-UNAP?

Los problemas específicos que se formulan en la presente investigación son:

¿es posible evaluar la tasa de emisión de dióxido de carbono procedente de la chimenea industrial de la Planta Piloto FIQ-UNAP?, ¿es posible evaluar la altura efectiva de la chimenea industrial de la Planta Piloto FIQ-UNAP?, ¿es posible evaluar la velocidad media del viento a la altura efectiva de la chimenea industrial de la Planta Piloto FIQ-UNAP?, ¿es posible establecer las coordenadas de los puntos de la atmósfera donde se evalúa la concentración de dióxido de carbono?, ¿es posible evaluar los coeficientes de dispersión horizontal y vertical?. De esta forma, el objetivo general de la presente

investigación es: evaluar la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera procedente de la chimenea industrial de la Planta Piloto FIQ-UNAP, y los objetivos específicos son: evaluar la tasa de emisión de dióxido de carbono procedente de la chimenea industrial de la Planta Piloto FIQ-UNAP, evaluar la altura efectiva de la chimenea industrial de la Planta Piloto FIQ-UNAP, evaluar la velocidad media del viento a la altura efectiva de la chimenea industrial de la Planta Piloto FIQ-UNAP, establecer las coordenadas de los puntos de la atmósfera donde se evalúa la concentración de dióxido de carbono, evaluar los coeficientes de dispersión horizontal y vertical.

PARTE I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y CONCEPTUALES

El conocimiento científico se construye a partir de cimientos sólidos que permiten interpretar la realidad de manera rigurosa, crítica y fundamentada. En esta primera parte del libro se presentan los fundamentos teóricos y conceptuales que orientan y sustentan el desarrollo de la investigación, permitiendo delimitar el campo de estudio y precisar las categorías centrales del análisis.

Se inicia con la revisión de los antecedentes más relevantes a nivel internacional, nacional y local, con el objetivo de identificar el estado del arte y las principales contribuciones existentes respecto al fenómeno investigado. Esta contextualización permite reconocer vacíos, coincidencias y tendencias en torno a la problemática abordada, lo cual refuerza la pertinencia del estudio.

Posteriormente, se desarrollan las bases teóricas, entendidas como el conjunto de teorías, enfoques y marcos de referencia que explican, sustentan e interpretan las variables y relaciones analizadas. Esta sección establece el andamiaje intelectual desde el cual se construye la comprensión del objeto de estudio, articulando conceptos clave con la realidad investigada.

Finalmente, se precisan las definiciones de términos básicos, indispensables para asegurar la claridad, coherencia y operatividad del discurso científico. Establecer con rigor el significado de los conceptos empleados evita ambigüedades y fortalece la validez teórica y metodológica de la investigación.

En conjunto, esta primera parte constituye el eje estructural sobre el cual se edifica la propuesta investigativa, garantizando solidez conceptual y coherencia epistemológica a lo largo del desarrollo del estudio.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

El presente capítulo tiene como finalidad construir el marco teórico que sustenta la investigación, proporcionando las bases necesarias para comprender el fenómeno estudiado desde una perspectiva científica y rigurosa. El marco teórico no solo enmarca la problemática dentro de un conjunto de conocimientos previos, sino que también orienta el planteamiento de la hipótesis, el diseño metodológico y la interpretación de los resultados.

En primer lugar, se abordan los antecedentes más significativos a nivel internacional, nacional y local, lo cual permite identificar cómo ha sido tratado el tema por otros investigadores, qué enfoques han predominado y qué brechas persisten en el conocimiento. Esta revisión crítica de la literatura constituye una fuente valiosa para contrastar, complementar y enriquecer el enfoque adoptado en este estudio.

A continuación, se desarrollan las bases teóricas fundamentales que explican las variables y conceptos clave. Se incorporan teorías, modelos y enfoques que aportan una visión comprensiva y sistemática del objeto de estudio, fortaleciendo el sustento conceptual y ampliando el horizonte de interpretación de los hallazgos.

Finalmente, se presenta la definición de términos básicos, los cuales serán utilizados de manera recurrente a lo largo del texto. Estas definiciones permiten establecer un lenguaje común, necesario para mantener la coherencia interna del discurso investigativo y facilitar la comprensión por parte del lector.

Este capítulo, por tanto, constituye el pilar esencial del estudio, ya que clarifica el enfoque teórico desde el cual se aborda la problemática y garantiza la solidez académica del trabajo de investigación.

Antecedentes

Espinoza (2018, pp. 1-2, 37-52), realizó la tesis de pregrado titulada: “Determinación de la dispersión geográfica de los gases NO_x, CO, SO₂ y partículas (PM10), emitidos por una central térmica aplicando el modelo AERMOD”. El desarrollo de este trabajo permitió conocer el desplazamiento de partículas y gases emitidos por una

central térmica, ubicada en el distrito de Ventanilla, mediante el modelo AERMOD de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y así poder evaluar las concentraciones de los contaminantes en las zonas de deposición, verificando si se cumplen los estándares de calidad ambiental. Para llevar a cabo el modelamiento de dispersión de los contaminantes, se realizó un estudio meteorológico en la zona, con un equipo automático de marca Davis y el procesamiento de los datos obtenidos se realizaron en los programas Microsoft Excel y Wrplot. Se efectuaron monitoreos en la fuente de emisión (TG-34) de la central térmica de la empresa Enel Generación Perú S.A.A, evaluando y analizando los parámetros de NO_x, CO, SO₂ y partículas PM₁₀ con los métodos del EPA, CTM-030. Todos estos datos fueron incluidos en el programa AERMOD y AERMED, para demostrar la variabilidad y la dispersión de los contaminantes en el aire. La modelación de los parámetros medidos generó mapas de dispersión de los contaminantes, los cuales mostraron las zonas receptoras de mayor influencia.

Pereira (2018, pp. 376-396), realizó la investigación titulada: “Simulación de la dispersión de contaminantes en la atmósfera de una planta de generación de electricidad a biomasa”. El presente trabajo consiste en la simulación de la dispersión de contaminantes en la atmósfera de módulos termoeléctricos a biomasa, en el marco de lo establecido en el Reglamento de Prevención y Control Ambiental (RPCA) de la Ley del Medio Ambiente N° 1333 para el desarrollo de los Estudios de Evaluación de Impacto Ambiental (EEIAs). El área en estudio se encuentra en la región amazónica de Bolivia, realizándose su clasificación climática y análisis de datos históricos de parámetros meteorológicos y un estudio de línea base ambiental. Se utilizó el modelo gaussiano y las correcciones que corresponden para simular la dispersión de gases y partículas en diferentes categorías de estabilidad atmosférica, considerando la rosa de vientos, distribución de sus direcciones prevalentes, elevación del penacho y flujos máscicos entre otros, lo que permitió predecir y evaluar los impactos ambientales, plantear medidas de mitigación y un Programa de Monitoreo Ambiental (PMA). Los resultados tendrán como fin determinar las modificaciones en la calidad del aire, evaluar efectividad de las medidas y si corresponde realizar ajustes al funcionamiento de la termoeléctrica.

Zambrano (2017-2018, pp. 1, 22-29), realizó el trabajo titulado: Análisis de dispersión de contaminantes emitidos por motores que utilizan petróleo crudo como

combustible”. En este estudio se analizó la dispersión de contaminantes emitidos por seis conjuntos de generadores Hyundai compuesto por motores de la marca Hyundai HiMSEN, acoplados en una misma estructura de diseño denominada HYUNDAI HiMSEN H21/32, con 1800 kW de potencia nominal, que utilizan petróleo crudo como combustible en la Central de Generación Oso B, que pertenece a una industria petrolera ubicada en Ecuador, provincia de Orellana y demanda energía eléctrica para abastecer su operación. La metodología de estudio utilizada es el modelo de dispersión de Pluma de Gauss para los contaminantes SO₂ y NO_x, tomando en cuenta la ubicación del foco emisor, los datos meteorológicos de la provincia de Orellana, la emisión de los contaminantes SO₂ y NO_x por los motores y las categorías de dispersión de Pasquill-Gifford-Turner; con el fin de compararlos con la legislación ecuatoriana de calidad del aire, estipulada en el Acuerdo Ministerial N° 097-A del 30 de julio de 2015.

Hilario (2017, pp. xv, 1, 88-120), para optar el grado académico de Doctora en Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible, realizó la tesis que se titula: “Emisiones contaminantes de vehículos del distrito de Huancayo”. La investigación tuvo como principal objetivo, estimar la cantidad de emisiones contaminantes de vehículos en el distrito de Huancayo para el año 2016, específicamente de emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes criterio, utilizando el Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE). Se caracterizó la flota vehicular y se recopiló información de tecnología vehicular mediante encuestas, grabaciones y conteo vehicular para determinar la fracción de categorías vehiculares. Se determinó los patrones de conducción de las diferentes categorías vehiculares, mediante el software Speed Analysis Evaluation y las unidades de posicionamiento global satelital (GPS). El procesamiento de la información recopilada determinó que, el contaminante criterio y el gas de efecto invernadero que se emiten en mayores cantidades por año, son: el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO₂), respectivamente.

Rojas (2017, pp. 1-3), para optar el grado académico de Doctoris Philosophiae en Ingeniería y Ciencias Ambientales, realizó la tesis titulada: “Modelación numérica del transporte de contaminantes atmosféricos y su relación con las condiciones meteorológicas en Lima Metropolitana”. Este trabajo consistió en modelar numéricamente la concentración del PM₁₀ y PM_{2.5} y sus relaciones con las condiciones

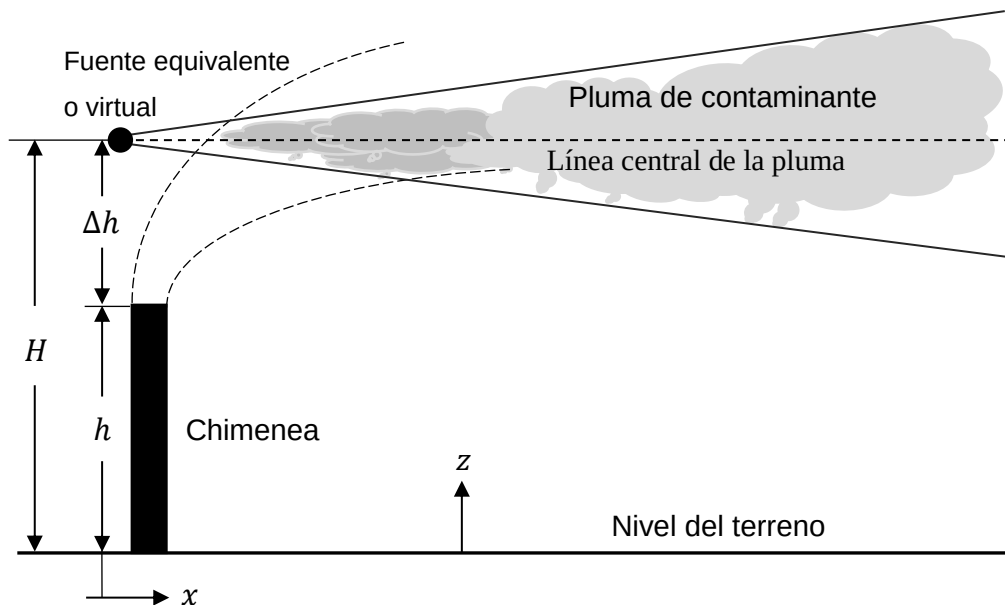
meteorológicas en Lima Metropolitana; usando el modelo CCATT-BRAMS con el programa científico de código abierto denominado CCATT-BRAMS, elaborado en fortran 90 con actualizaciones desarrolladas en INPE/CPTEC (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos), Brasil. Los datos diarios en las distintas estaciones de medida en Lima Metropolitana, fueron obtenidos de la red de monitoreo de SENAMHI, los cuales se denominarán “datos observados”. Posteriormente se realizaron cálculos de emisiones, teniendo en cuenta tipos y número de vehículos, consumos energéticos locales y nacionales del parque automotor, crecimiento poblacional y número de enfermos por enfermedades respiratorias en los periodos del 2006 al 2013; para los cuales se utilizó los factores de emisión según la EPA, que sirven como dato de entrada al código CCATT-BRAMS. Por último, se hicieron proyecciones al 2040 mediante un análisis estadístico.

Cruz (2015, pp. xiv, 1, 123-146), realizó la tesis titulada: “Implementación de un modelo de dispersión atmosférica y cálculo de dosis en la liberación de efluentes radiactivos en el Centro Nuclear”, para obtener el grado académico de Maestro en Ciencias Fisicomatemáticas. En el presente trabajo se desarrolló el software DERA (Dispersión de Efluentes Radiactivos a la Atmósfera) con la finalidad de calcular la dosis equivalente, externa e interna, asociada con la liberación de efluentes radiactivos a la atmósfera provenientes de una instalación nuclear. El software describe tales emisiones en condiciones de operación normal, no considerando las situaciones excepcionales como accidentes. Se integraron distintas herramientas que permiten describir la dispersión de efluentes radiactivos utilizando información meteorológica del sitio (velocidad y dirección promedio del viento, así como el perfil de estabilidad).

Bases teóricas

Modelo gaussiano de dispersión de contaminantes

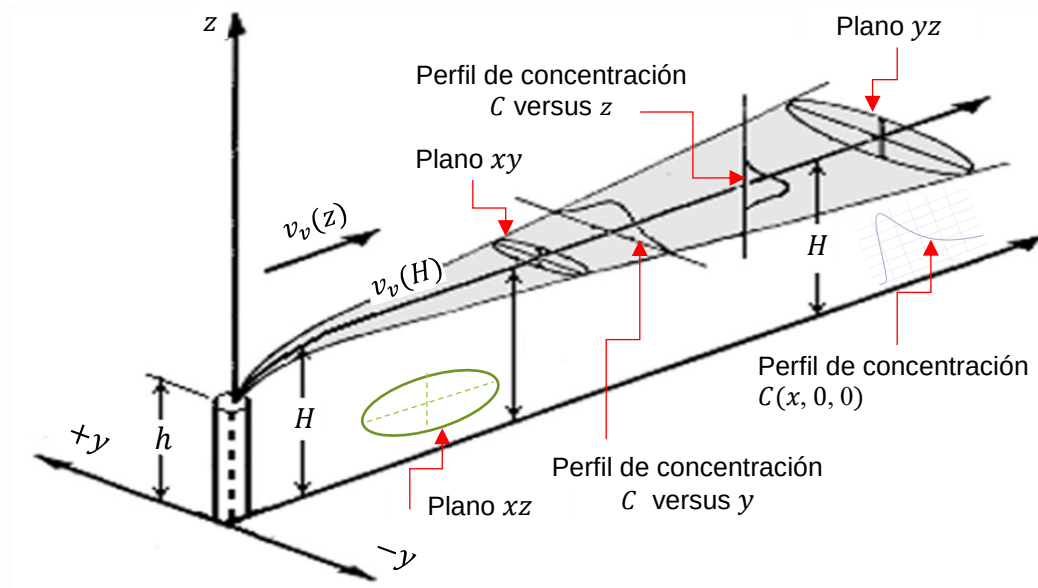
Según Wark y Warner (2007, p. 148), un modelo de dispersión atmosférica debe tratar de simular el comportamiento en conjunto de plumas emitidas desde fuentes a nivel del terreno o a la altura de la chimenea. Para fuentes puntuales como una chimenea, el aspecto general se podría representar por el siguiente esquema:

Figura 1. Modelo de dispersión con la fuente virtual a una altura efectiva H .

Fuente: Modificado de Wark y Warner, 2007, p. 149.

Se puede observar de la figura 1, que la pluma de contaminante tiene su origen a la altura h y se eleva una altura adicional Δh , debido a la cantidad de movimiento de los gases que salen verticalmente de la chimenea. Con fines prácticos, la pluma de contaminante aparece como si se originara a la altura $H = h + \Delta h$. El modelo gaussiano de dispersión de contaminantes, se basa en la difusión de la masa del contaminante en la atmósfera, según un elemento de fluido que es arrastrado por el viento en la dirección x con una velocidad del viento v_p . El modelo gaussiano, supone que la concentración de contaminantes obedece a una distribución normal en torno al eje x , tanto en el eje vertical (z), como en la dirección horizontal (y) (Wark y Warner, 2007, pp. 148-149). El sistema coordenado tridimensional para el modelo gaussiano, se muestra en la figura 2, el cual tiene su origen en la chimenea.

Figura 2. Esquema que representa el modelo gaussiano de dispersión de contaminantes.



Fuente: Modificado de Masters y Ela, 2008, p. 470.

El modelo gaussiano de dispersión de contaminantes, se representa mediante la ecuación (1).

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z v_{v(H)}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]} \left\{ e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right]} + e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right]} \right\}. \quad (1)$$

Donde: $C(x, y, z)$ es la concentración del contaminante en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Q la tasa de emisión del contaminante en $\mu\text{g}/\text{s}$, $v_{v(H)}$ la velocidad lineal media del viento a la altura efectiva de la chimenea en m/s, (x, y, z) las coordenadas de posición en m, H la altura efectiva de la chimenea en m; σ_y y σ_z los coeficientes de dispersión en las direcciones y y z en m, respectivamente. La estabilidad atmosférica es importante porque determina la habilidad de los contaminantes al dispersarse en la atmósfera (Masters y Ela, 2008, p. 472) y se divide en las siguientes clases: A, B, C, D, E y F.

Formulación de R. W. McMullen

Los coeficientes σ_y y σ_z (Cruz, 2015, p. 70), se evalúan mediante la ecuación:

$$\sigma = e^{a + b \ln x + c \ln(x)^2}. \quad (2)$$

Donde el valor de x debe estar en kilómetros (km) para obtener el valor de σ en metros (m). Los valores de las constantes a , b y c , se muestran en las tablas 1 y 2.

Tabla 1. Coeficientes según formulación de McMullen, valores para σ_y .

Clase de estabilidad	a	b	c
A	5.357	0.8828	-0.0076
B	5.058	0.9024	-0.0096
C	4.651	0.9181	-0.0076
D	4.230	0.9222	-0.0087
E	3.922	0.9222	-0.0064
F	3.533	0.9181	-0.0070

Fuente: Cruz, 2015, p. 70.

Tabla 2. Coeficientes según formulación de McMullen, valores para σ_z .

Clase de estabilidad	a	b	c
A	6.035	2.1097	0.2270
B	4.694	1.0629	0.0136
C	4.110	0.9201	-0.0020
D	3.414	0.7370	-0.0316
E	3.057	0.6794	-0.0450
F	2.621	0.6564	-0.0540

Fuente: Cruz, 2015, p. 70.

Ley potencial de Deacon

Esta ley permite evaluar la velocidad del viento a pocos cientos de metros a partir de una medición sobre el nivel del suelo con un anemómetro (Bayala, 2017, pp. 22-23).

$$\left(\frac{v_{v(H)}}{v_{v(a)}} \right) = \left(\frac{H}{Z_a} \right)^p. \quad (3)$$

Donde: $v_{v(H)}$ es la velocidad del viento a la altura H , $v_{v(a)}$ la velocidad del viento a la altura del anemómetro, H la altura a la que se calcula $v_{v(H)}$, Z_a la altura del anemómetro sobre el suelo y p un parámetro adimensional que depende de la estabilidad atmosférica.

Tabla 3. Exponente de perfil de viento p para medio urbano.

Clase de estabilidad	Descripción	Exponente p
A	Altamente inestable	0.15
B	Moderadamente inestable	0.15
C	Ligeramente inestable	0.20
D	Neutro	0.25
E	Levemente estable	0.40
F	Estable	0.60

Fuente: Masters y Ela, 2008, p. 472.

Ecuaciones de Briggs

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), recomienda las ecuaciones de Briggs para calcular la elevación de la pluma de contaminante. Para condiciones estables (categorías de estabilidad E y F), (Masters y Ela, 2008, pp. 480-481), dicha ecuación es:

$$\Delta h = 2.6 \left[\frac{T_a r^2 v_s (T_s - T_a)}{T_s v_{v(h)} \left(\frac{\Delta T_a}{\Delta z} + 0.01 \right)} \right]^{1/3} \quad (4)$$

Donde: Δh es la elevación de la pluma de contaminante en m, r el radio interior de la chimenea en m, $v_{v(h)}$ la velocidad del viento a la altura física de la chimenea en m/s, v_s la velocidad de los gases a la salida de la chimenea en m/s, T_s la temperatura de los gases a la salida de la chimenea en K, T_a la temperatura del ambiente en K y $\Delta T_a/\Delta z$ la tasa de cambio de la temperatura ambiente con la altitud en °C/m. Para condiciones neutras o inestables (categorías de estabilidad A-D), la ecuación de Briggs es:

$$\Delta h = \frac{1.6 F^{1/3} x_f^{2/3}}{v_{v(h)}} \quad (5)$$

Donde x_f es la distancia en la dirección del viento hasta el final de la elevación de la pluma en m, g la aceleración de la gravedad en m/s² y F el parámetro de flujo por flotación en m⁴/s³. F y x_f se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$F = \frac{g r^2 v_s (T_s - T_a)}{T_s} \quad (6)$$

$$x_f = 120 F^{0.4}, \text{ si } F \geq 55 \text{ m}^4/\text{s}^3. \quad (7)$$

$$x_f = 50F^{5/8}, \text{ si } F < 55 \text{ m}^4/\text{s}^3. \quad (8)$$

Definición de términos básicos

Toda investigación científica requiere delimitar con exactitud el significado de los términos y conceptos fundamentales que serán empleados a lo largo del estudio. Esta necesidad responde a la exigencia de coherencia terminológica, claridad expositiva y precisión conceptual, elementos indispensables para garantizar la validez y comprensión del marco teórico y metodológico.

En esta sección se presentan las definiciones operativas y conceptuales de los términos clave que constituyen el núcleo del objeto de estudio. Estas definiciones no son meramente nominales, sino que se fundamentan en la revisión de fuentes académicas confiables y en el enfoque teórico adoptado por la investigación. Al establecer el sentido preciso de cada término, se busca evitar ambigüedades semánticas y asegurar una comunicación efectiva del conocimiento producido.

Asimismo, la definición de los términos básicos permite establecer los límites del fenómeno investigado, clarificando el campo de acción del estudio y los criterios que guiarán la medición y análisis de las variables involucradas.

En suma, este apartado proporciona el lenguaje técnico y conceptual que da sustento al resto del trabajo, constituyéndose en un instrumento clave para la rigurosidad y consistencia del proceso investigativo.

Concentración de dióxido de carbono en la atmósfera

Se denota como $C(x, y, z)$ y relaciona la cantidad de masa en microgramos de dióxido de carbono y el volumen en metros cúbicos de aire atmosférico, es decir:

$$\frac{\text{microgramos de CO}_2}{\text{metros cúbicos de aire}} = \frac{\mu g}{\text{m}^3}.$$

Tasa de emisión de dióxido de carbono

Es el flujo másico del dióxido de carbono que sale de la chimenea, se denota como Q y de acuerdo a sus unidades indica la cantidad de microgramos de dióxido de carbono que emite la chimenea en un segundo, es decir:

$$\frac{\text{microgramos de CO}_2}{\text{segundo}} = \frac{\mu g}{s}.$$

Altura física de la chimenea

Es la altura real o longitud de la chimenea, se denota como h y se mide en metros (m).

Elevación de la pluma de contaminante

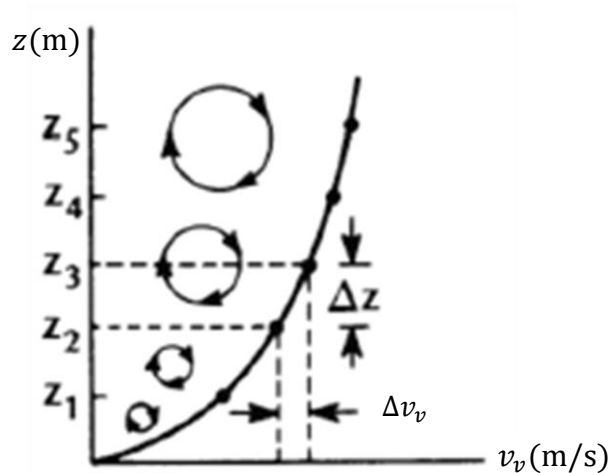
Se denota como Δh y representa la altura de la pluma de contaminante en metros (m).

Altura efectiva de la chimenea

Se denota como H , se mide en metros (m) y se obtiene sumando la altura física de la chimenea con la elevación de la pluma, es decir: $H = h + \Delta h$.

Perfil de velocidad del viento

Es la representación gráfica de la velocidad del viento en función a la altura (figura 3). El perfil de velocidad del viento, se puede construir haciendo una medida inicial de dicha velocidad con un anemómetro y luego se aplica la ecuación (3) para calcularla a diferentes alturas.

Figura 3. Perfil de velocidad del viento.

Fuente: Modificado de Wark y Warner, 2007, p. 122.

Coordenadas de posición

Son las coordenadas de los puntos de la atmósfera. Un punto en la atmósfera se representa como (x, y, z) , en donde las tres coordenadas se miden en metros (m).

Un punto con las coordenadas $(x, y, 0)$, se encuentra en el plano xy .

Un punto con las coordenadas $(x, 0, z)$, se encuentra en el plano xz .

Un punto con las coordenadas $(0, y, z)$, se encuentra en el plano yz .

Un punto con las coordenadas $(x, 0, 0)$, se encuentra en el eje x .

Un punto con las coordenadas $(0, y, 0)$, se encuentra en el eje y .

Un punto con las coordenadas $(0, 0, z)$, se encuentra en el eje z .

Coefficientes de dispersión horizontal y vertical

Son las desviaciones estándar de las distribuciones gaussianas horizontal y vertical. Se denotan como σ_y y σ_z , respectivamente.

Perfiles de concentración de dióxido de carbono en la atmósfera

Son las representaciones gráficas de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, mediante un conjunto de puntos. Para la presente investigación se usará las siguientes representaciones:

$C(x, 0, z)$ representa la concentración de dióxido de carbono, de puntos que están en el plano xz .

$C(x, y, H)$ representa la concentración de dióxido de carbono, de puntos que están en un plano paralelo al plano xy , pero a la altura H .

$C(x, 0, 0)$ representa la concentración de dióxido de carbono de puntos que están en el eje x .

PARTE II

PLANTEAMIENTO CIENTÍFICO

La construcción de una investigación rigurosa exige no solo una base teórica sólida, sino también un planteamiento científico claro, preciso y coherente con los objetivos del estudio. En esta segunda parte se definen los elementos estructurales que orientan la indagación empírica, articulando los componentes conceptuales con las rutas metodológicas que permitirán validar o refutar las hipótesis formuladas.

Esta sección tiene como propósito identificar y operacionalizar las variables centrales del estudio, delimitando su naturaleza, dimensiones e indicadores, de modo que puedan ser medibles, observables y analizadas con criterios objetivos. La definición operativa de las variables constituye un paso esencial para transformar conceptos abstractos en elementos susceptibles de estudio empírico.

Asimismo, se formula la hipótesis de investigación, la cual representa una proposición tentativamente explicativa sobre la relación entre las variables. Esta hipótesis orienta el diseño metodológico, guía la recolección de datos y anticipa los posibles hallazgos. Su planteamiento responde tanto a la lógica del problema como al sustento teórico desarrollado previamente.

En conjunto, esta segunda parte traza el marco lógico y estructural del proceso investigativo, articulando la teoría con la práctica científica, y estableciendo los fundamentos que darán sentido a la recolección, análisis e interpretación de los datos.

CAPÍTULO II: VARIABLES E HIPÓTESIS

Este capítulo constituye un componente esencial del planteamiento científico de la investigación, pues define y estructura los elementos clave que guiarán el proceso empírico: las variables y la hipótesis. Su formulación rigurosa permite establecer un vínculo coherente entre el marco teórico y la metodología, garantizando así la validez del estudio.

En primer lugar, se presentan las variables de la investigación, detallando sus definiciones conceptuales y operacionales. Esta distinción permite identificar con claridad qué se va a investigar y cómo se va a medir. Las variables, al ser formuladas de manera operativa, se transforman en unidades observables y cuantificables, facilitando el diseño de instrumentos y la aplicación de técnicas de análisis de datos.

A continuación, se plantea la hipótesis, entendida como una proposición tentativa que establece una relación entre las variables previamente definidas. La hipótesis guía el desarrollo metodológico del estudio y ofrece una anticipación racional de los posibles resultados, que luego será contrastada con la evidencia empírica.

Este capítulo, por tanto, no solo delimita con precisión el objeto de estudio, sino que también establece el punto de partida para el diseño metodológico, permitiendo a la investigación avanzar de manera estructurada, lógica y fundamentada.

Variables y definiciones operacionales

Para evaluar la concentración de dióxido de carbono, fue necesario que se realice cinco (5) procesos operacionales, que se definen a continuación.

Proceso 1. Se realizó para evaluar la tasa de emisión de dióxido de carbono, mediante la multiplicación del factor de emisión del dióxido de carbono (E_{CO_2}) con el consumo de combustible ($\hat{C}_{com}$), es decir: $Q = E_{CO_2} \hat{C}_{com}$. Donde E_{CO_2} y $\hat{C}_{com}$ se expresan como $\left(\frac{\mu g \text{ CO}_2 \text{ generado}}{\text{kg combustible consumido}}\right)$ y $\left(\frac{\text{kg combustible consumido}}{s}\right)$, respectivamente.

Variables independientes

- Factor de emisión del dióxido de carbono = E_{CO_2}
- Consumo de combustible = $\hat{C}_{\text{com}}$.

Variable dependiente

- Tasa de emisión de dióxido de carbono = Q .

Proceso 2. Se realizó para evaluar la altura efectiva de la chimenea, pero primeramente fue necesario evaluar la elevación de la pluma de contaminante haciendo uso de las ecuaciones de Briggs y seguidamente se suma con la altura física de la chimenea, es decir: $H = h + \Delta h$.

Variables independientes

- Radio interior de la chimenea = r
- Velocidad del viento a la altura física de la chimenea = $v_{v(h)}$
- Velocidad de los gases a la salida de la chimenea = v_s
- Temperatura de los gases a la salida de la chimenea = T_s
- Temperatura del ambiente = T_a
- Tasa de cambio de la temperatura ambiente con la altitud = $\Delta T_a / \Delta Z$
- Elevación de la pluma de contaminante = Δh
- Altura física de la chimenea = h .

Variable dependiente

- Altura efectiva de la chimenea = H .

Proceso 3. Se realizó para evaluar la velocidad lineal media del viento a la altura efectiva de la chimenea, haciendo uso de la ley potencial de Deacon.

Variables independientes

- Altura del anemómetro sobre el suelo = Z_a
- Velocidad del viento a la altura del anemómetro = $v_{v(a)}$
- Altura efectiva de la chimenea = H
- Parámetro adimensional que depende de la estabilidad atmosférica = p .

Variable dependiente

- Velocidad del viento a la altura efectiva de la chimenea = $v_{v(H)}$.

Proceso 4. Se realizó para evaluar los coeficientes de dispersión horizontal y vertical, haciendo uso de la formulación de R. W. McMullen.

Variable independiente

- Coordenada de posición = x .

Variables dependientes

- Coeficiente de dispersión horizontal = σ_y y coeficiente de dispersión vertical = σ_z .

Proceso 5. Se realizó para evaluar la concentración de dióxido de carbono, haciendo uso del modelo gaussiano de dispersión de contaminantes.

Variables independientes

- Tasa de emisión de dióxido de carbono = Q
- Altura efectiva de la chimenea = H
- Velocidad lineal media del viento a la altura efectiva de la chimenea = $v_{v(H)}$
- Coordenadas de posición = (x, y, z)
- Coeficiente de dispersión horizontal = σ_y y coeficiente de dispersión vertical = σ_z .

Variable dependiente

- Concentración de dióxido de carbono en la atmósfera = $C(x, y, z)$.

Formulación de la hipótesis

Hipótesis general

Sí, es posible evaluar la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera procedente de la chimenea industrial de la Planta Piloto FIQ-UNAP.

Hipótesis específicas

- Sí, es posible evaluar la tasa de emisión de dióxido de carbono procedente de la chimenea industrial de la Planta Piloto FIQ-UNAP.
- Sí, es posible evaluar la altura efectiva de la chimenea industrial de la Planta Piloto FIQ-UNAP.
- Sí, es posible evaluar la velocidad media del viento a la altura efectiva de la chimenea industrial de la Planta Piloto FIQ-UNAP.
- Sí, es posible establecer las coordenadas de los puntos de la atmósfera donde se evalúa la concentración de dióxido de carbono.
- Sí, es posible evaluar los coeficientes de dispersión horizontal y vertical.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

La metodología constituye el eje operativo de toda investigación científica, ya que determina el camino sistemático a seguir para alcanzar los objetivos propuestos y dar respuesta a las hipótesis planteadas. En este capítulo se expone con detalle el enfoque metodológico adoptado, así como los procedimientos utilizados para la recolección, procesamiento y análisis de los datos.

En primer lugar, se describe el tipo y diseño de investigación, lo cual permite situar el estudio dentro de un marco metodológico preciso que responde a la naturaleza del problema y a los propósitos investigativos. Esta definición es clave para comprender la lógica interna del estudio y sus alcances.

Posteriormente, se presenta la población y muestra, identificando el universo de estudio y los criterios de selección de los sujetos o unidades de análisis, así como el tamaño muestral utilizado. Esta información es fundamental para evaluar la representatividad y generalización de los resultados.

Asimismo, se detallan las técnicas e instrumentos empleados para la recolección de datos, así como los procedimientos aplicados para su procesamiento y análisis. Estos métodos garantizan la rigurosidad del estudio y aseguran que los resultados obtenidos se basen en evidencias válidas y confiables.

Finalmente, se abordan los aspectos éticos que rigen la investigación, asegurando el respeto a los derechos de los participantes y el cumplimiento de principios fundamentales como la confidencialidad, el consentimiento informado y la integridad científica.

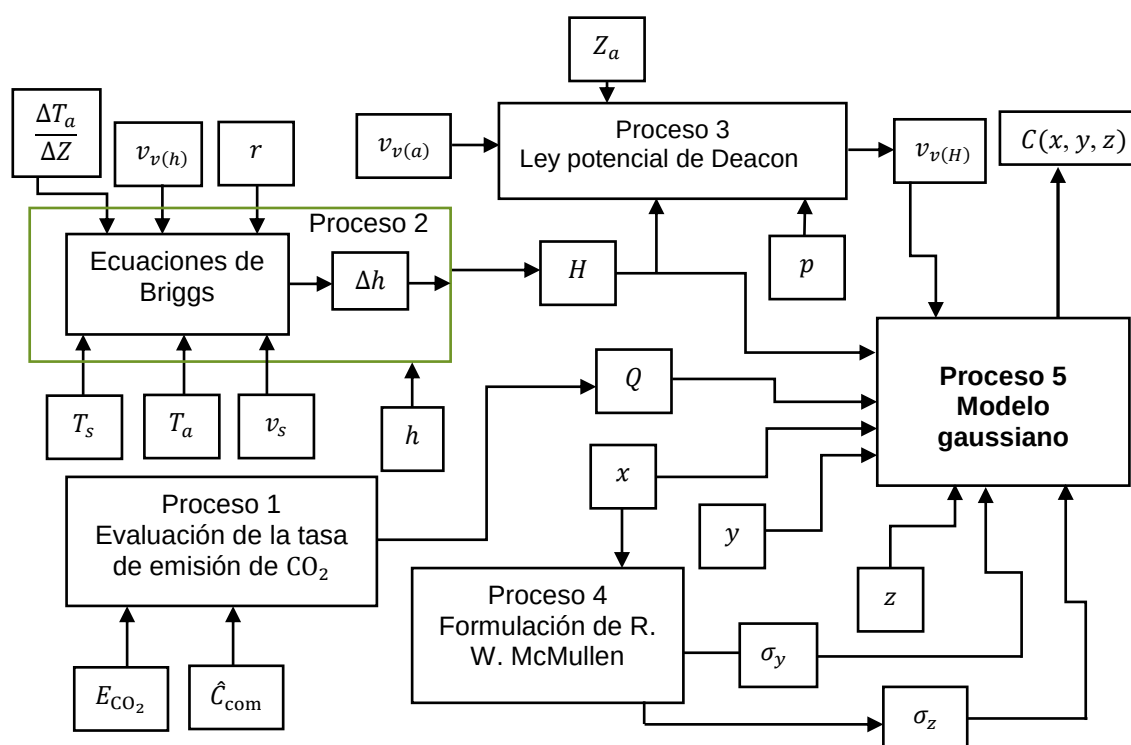
Este capítulo proporciona, por tanto, una visión integral del diseño metodológico, constituyéndose en una guía estructurada para la ejecución del estudio de manera técnica, responsable y científicamente fundamentada.

Tipo y diseño de la investigación

La presente investigación, se puede clasificar de las siguientes formas: según el tipo de datos empleados es cuantitativa, porque se realizó la evaluación y medición de

variables cuantitativas. Según el objetivo es aplicada, porque se ha buscado procedimientos que nos han permitido llegar al objetivo general, teniendo previamente el conocimiento teórico necesario. Según el nivel de profundización en el objeto de estudio es explicativa, porque se identificó las causas (variables independientes) y consecuencias (variables dependientes) de cada proceso operacional; también es predictiva, porque mediante el modelo gaussiano se ha podido predecir con gran exactitud la concentración de contaminantes atmosféricos. Según Hernández, Fernández y Baptista (2014, pp. 157-158), en los estudios correlacionales-causales, la causalidad ya existe, pero es el investigador quien determina su dirección y establece cuál es la causa y cuál el efecto (o causas y efectos). Un diseño correlacional-causal, puede abarcar modelos o estructuras muy complejas. Entonces, de acuerdo a esa definición el diseño de la presente investigación es “correlacional-causal” y se muestra en la figura siguiente.

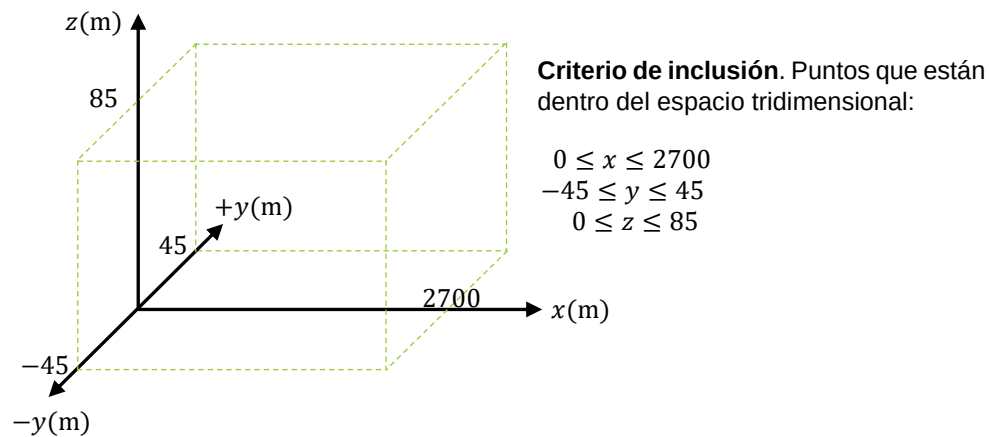
Figura 4. Esquema del diseño de investigación.



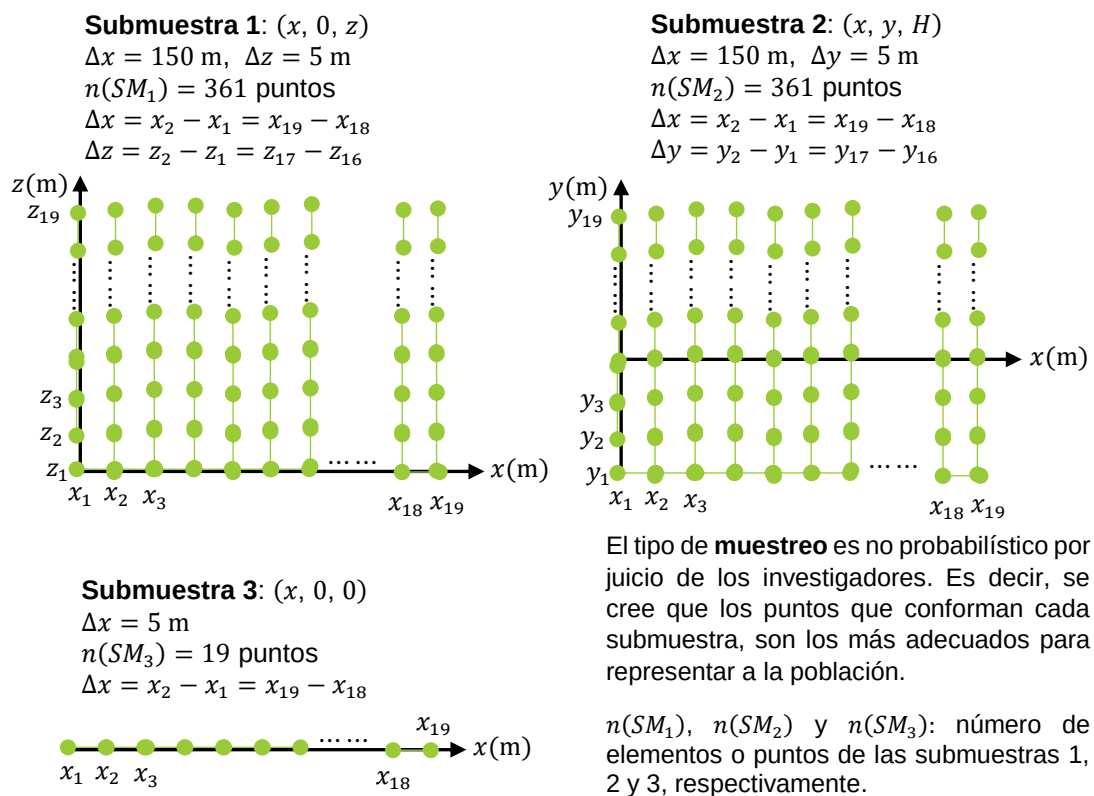
Fuente: Elaboración propia.

Población y muestra

La población es infinita, pues es el conjunto de todos los puntos de la atmósfera que están dentro del siguiente espacio tridimensional:

Figura 5. Espacio tridimensional que representa la población de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Diseño muestral.

Fuente: Elaboración propia.

Muestra. Está conformada por 3 submuestras, las cuales son conjuntos de puntos de la atmósfera, definidos como se indican en la figura 6.

Técnicas e instrumentos

- Para evaluar la tasa de emisión de dióxido de carbono, se utilizó técnicas de revisión documental y como instrumentos la [Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero \(GEI\)](#) y la hoja de cálculo de Microsoft Excel.
- Para medir las dimensiones de la chimenea, se utilizó como instrumento la wincha-flexómetro.
- Para medir la temperatura de los gases salientes de la chimenea y del ambiente, se utilizó como instrumento un termómetro digital.
- Para evaluar la altura efectiva de la chimenea, se utilizó técnicas de revisión documental y como instrumento la hoja de cálculo de Excel para la ecuación de Briggs (ecuación (4)), considerando la categoría de estabilidad E.
- Para evaluar la velocidad del viento a la altura efectiva de la chimenea, se utilizó técnicas de revisión documental y como instrumentos el anemómetro digital y la hoja de cálculo de Excel para la ley potencial de Deacon (ecuación (3)).
- Para evaluar los coeficientes de dispersión horizontal y vertical, se utilizó técnicas de revisión documental y como instrumento la hoja de cálculo de Excel y la formulación de R. W. McMullen (ecuación (2)).
- Para evaluar la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, se utilizó técnicas de revisión documental y como instrumento la hoja de cálculo de Excel para el modelo gaussiano de dispersión de contaminantes (ecuación(1)).

Procedimientos de recolección de datos

- Revisión bibliográfica.
- Identificación de la población, muestra y submuestras.
- Determinar los procesos operacionales que permitirán evaluar la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera.

- Determinar las variables independientes y dependientes en cada proceso operacional.
- Medición de las dimensiones de la chimenea.
- Medición de la temperatura de los gases a la salida de la chimenea y la temperatura del ambiente.

Técnicas de procesamiento y análisis de datos

- Para el procesamiento de la información, también se utilizó las hojas de cálculo de Excel para las ecuaciones de Briggs, ley potencial de Deacon, formulación de R. W. McMullen y el modelo gaussiano de dispersión de contaminantes.
- Para el análisis de la información se utilizó los perfiles de concentración: $C(x, 0, z)$, $C(x, y, H)$ y $C(x, 0, 0)$, en lo cual sea hecho uso de la ecuación (1).

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z v_{v(H)}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]} \left\{ e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right]} + e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right]} \right\}. \quad (1)$$

El perfil $C(x, 0, 0)$, se utilizará para comparar con el límite máximo permisible de dióxido de carbono (CO₂) a nivel del suelo.

Aspectos éticos

Como egresados de la Maestría en Ciencias y Tecnologías Ambientales con Mención en Industria del Petróleo y Medio Ambiente, de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, declaramos que en nuestro trabajo de investigación no existe plagio de ningún tipo de otro trabajo de tesis, informe, proyecto de investigación o artículo científico. Asimismo, nos comprometemos a respetar la veracidad de los resultados que se obtengan en la presente investigación. Se adjunta el consentimiento informado (véase el anexo 3).

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

El presente capítulo tiene como finalidad exponer los hallazgos obtenidos a partir del proceso de recolección y análisis de los datos. Los resultados presentados responden directamente a los objetivos de investigación y se organizan de manera lógica y coherente, de acuerdo con las variables e hipótesis previamente formuladas.

Los datos recopilados han sido tratados mediante procedimientos estadísticos e interpretativos pertinentes, que permiten observar tendencias, contrastar relaciones y evidenciar patrones significativos. La presentación de los resultados se realiza de forma clara, utilizando tablas, gráficos y descripciones analíticas que facilitan su comprensión por parte del lector.

Cabe resaltar que en este capítulo se prioriza la objetividad y la neutralidad; es decir, los resultados se exponen tal como han sido obtenidos, sin interpretaciones subjetivas o valoraciones personales, las cuales se desarrollarán en el capítulo siguiente, dedicado a la discusión.

Este apartado representa el núcleo empírico del estudio y constituye la base sobre la cual se sustentarán las conclusiones y recomendaciones. Su claridad, precisión y consistencia metodológica son esenciales para validar la calidad científica de la investigación.

Tabla 5. Resultados de variables del proceso 1.

E_{CO_2}	$\hat{C}_{\text{com}}$	Q
$\frac{\mu\text{g}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	$\frac{\mu\text{g}}{\text{s}}$
3.07×10^9	0.0036	1.10×10^7

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 6. Resultados de variables del proceso 2.

T_s	T_a	v_s	$v_{v(h)}$	$\frac{\Delta T_a}{\Delta Z}$	r
K	K	m/s	m/s	°C/m	m
561.15	303.15	5	2.089	-0.006	0.13
	Δh	h	H		
	m	m	m		
	29.150	6	35.150		

Fuente: [Elaboración propia](#).

Tabla 7. Resultados de variables del proceso 3.

$v_{v(a)}$	Z_a	p	$v_{v(H)}$
m/s	m	Adimensional	m/s
1.2	1.5	0.4	4.238

Fuente: [Elaboración propia](#).

Tabla 8. Resultados del coeficiente de dispersión horizontal.

a	b	c
3.922	0.9222	-0.0064
x	σ_y	
m	m	
0.001	0.00018	
150	8.99581	
300	16.8965	
450	24.4306	
600	31.7361	
750	38.8762	
900	45.8872	
1050	52.7925	
1200	59.6088	

1350	66.3481
1500	73.0198
1650	79.6311
1800	86.1882
1950	92.6959
2100	99.1583
2250	105.579
2400	111.961
2550	118.307
2700	124.619

Fuente: [Elaboración propia](#).

El consumo promedio de diésel 2, de la caldera de la Planta Piloto FIQ-UNAP, es de 4 gal/h, lo cual es igual a 15.14 L/h. Si se multiplica este valor por la densidad (0.850 kg/L) del diésel 2, se obtiene el consumo de diésel 2 en kg/h y kg/s (véase la tabla 5):

$$\hat{C}_{\text{com}} = \left(15.14 \frac{\text{L}}{\text{h}}\right) \left(0.850 \frac{\text{kg}}{\text{L}}\right) = 12.869 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 0.0036 \frac{\text{kg}}{\text{s}}.$$

Según la [Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero \(GEI\) \(2011, p. 19\)](#), el factor de emisión del dióxido de carbono para el diésel 2, es: 2.61 kg CO₂/L, lo cual es equivalente a 3.07 kg CO₂/kg diésel 2. Entonces, el E_{CO_2} , queda (véase la tabla 5):

$$E_{\text{CO}_2} = 3.07 \times 10^9 \mu\text{g CO}_2/\text{kg diésel 2}.$$

El valor de la tasa de emisión (Q), que se muestra en la tabla 5, se calculó de la forma siguiente:

$$Q = E_{\text{CO}_2} \hat{C}_{\text{com}} = \left(3.07 \times 10^9 \mu\text{g} \frac{\text{CO}_2}{\text{kg}}\right) \left(0.0036 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) = 1.10 \times 10^7 \frac{\mu\text{g CO}_2}{\text{s}}.$$

El valor de la velocidad de los gases a la salida de la chimenea, $v_s = 5 \text{ m/s}$, que se muestra en la tabla 6, se midió haciendo uso de un anemómetro digital.

El radio interior de la chimenea, $r = 0.13 \text{ m}$, el cual se puede observar en la tabla 6, se midió haciendo uso de una wincha-flexómetro.

La temperatura de los gases a la salida de la chimenea, $T_s = 561.15$ K, se determinó, mediante un termómetro que está instalado en la misma chimenea (véase la tabla 6).

La altura física de la chimenea $h = 6$ m, que se muestra en la tabla 6, se midió haciendo uso de una wincha-flexómetro.

La velocidad del viento a la altura física de la chimenea, $v_{v(h)} = 2.089$ m/s, que se muestra en la tabla 6, se evaluó haciendo uso de la ecuación (3), para lo cual se midió previamente la velocidad del viento, $v_{v(a)} = 1.2$ m/s, a la altura ($Z_a = 1.5$ m). En este caso se considera la estabilidad atmosférica de nivel E ($p = 0.4$, véase la tabla 3).

$$v_{v(h)} = v_{v(a)} \left(\frac{h}{Z_a} \right)^p = (1.2 \text{ m/s}) \left(\frac{6 \text{ m}}{1.5 \text{ m}} \right)^{0.4} = 2.089 \text{ m/s}.$$

La temperatura del ambiente resultó: $T_a = 303.15$ K.

Se considera la tasa de cambio de la temperatura ambiente con la altitud:

$$\frac{\Delta T_a}{\Delta Z} = -0.006 \frac{^\circ\text{C}}{\text{m}}.$$

La elevación de la pluma de contaminante, $\Delta h = 29.150$ m, se evaluó mediante la ecuación (4) (véase la tabla 6).

$$\Delta h = 2.6 \left[\frac{T_a r^2 v_s (T_s - T_a)}{T_s v_{v(h)} \left(\frac{\Delta T_a}{\Delta Z} + 0.01 \right)} \right]^{1/3}$$

$$\Delta h = 2.6 \left[\frac{(303.15) (0.13)^2 (5) (561.15 - 303.15)}{(561.15) (2.089) (-0.006 + 0.01)} \right]^{1/3} = 29.150 \text{ m}.$$

Entonces, la altura efectiva de la chimenea, que se muestra en la tabla 6, se evaluó de la forma siguiente:

$$H = h + \Delta h = (6 + 29.150) \text{ m} = 35.150 \text{ m}.$$

La velocidad del viento a la altura efectiva de la chimenea, $v_{v(H)} = 4.238$ m/s, que se muestra en la tabla 7, se evaluó haciendo uso de la ecuación (3), para lo cual se midió previamente la velocidad del viento, $v_{v(a)} = 1.2$ m/s, a la altura ($Z_a = 1.5$ m). En este caso se considera la estabilidad atmosférica de nivel E ($p = 0.4$, véase la tabla 3).

$$v_{v(H)} = v_{v(a)} \left(\frac{H}{Z_a} \right)^p = (1.2 \text{ m/s}) \left(\frac{35.175 \text{ m}}{1.5 \text{ m}} \right)^{0.4} = 4.238 \text{ m/s}.$$

Los valores $a = 3.922$, $b = 0.9222$ y $c = -0.0064$, que se muestran en la tabla 8, se obtuvieron de la tabla 1 (clase de estabilidad E). Esto sirvió para evaluar los valores de σ_y , haciendo uso de la ecuación (2), para el intervalo de valores de $0.001 \leq x \leq 2700$, donde σ_y y x están en m. Hay que tener en cuenta que el valor de x , en la ecuación (2) se debe reemplazar en km. Por ejemplo, para evaluar el valor $\sigma_y = 45.8872$ m, correspondiente a $x = 900$ m, se realizó de la forma siguiente (véase la tabla 8):

$$\sigma_y = e^{a + b \ln x + c \ln(x)^2} = e^{3.922 + 0.9222 \ln(900/1000) - 0.0064 \ln(900/1000)^2} = 45.8872 \text{ m}.$$

Tabla 9. Resultados del coeficiente de dispersión vertical.

a	b	c
3.057	0.6794	-0.045
x	σ_z	
m	m	
0.001	0.006184	
150	6.950666	
300	10.45812	
450	13.28133	
600	15.7355	
750	17.94731	
900	19.98337	
1050	21.88403	
1200	23.67596	
1350	25.37797	
1500	27.0039	
1650	28.56428	
1800	30.0674	
1950	31.51989	

2100	32.92716
2250	34.29372
2400	35.62335
2550	36.91926
2700	38.18423

Fuente: Elaboración propia.

Los valores $a = 3.057$, $b = 0.6794$ y $c = -0.045$, que se muestran en la tabla 9, se obtuvieron de la tabla 2 (clase de estabilidad E). De la misma forma que se evaluó σ_y , se evaluaron los valores de σ_z , que se muestran en la tabla 9. Por ejemplo, para evaluar el valor $\sigma_z = 19.98337$ m, correspondiente a $x = 900$ m, se realizó de la forma siguiente (véase la tabla 9):

$$\sigma_z = e^{a + b \ln x + c \ln(x)^2} = e^{3.057 + 0.6794 \ln(900/1000) - 0.045 \ln(900/1000)^2} = 19.98337 \text{ m.}$$

Figura 7. Perfil de concentración $C(x, 0, z)$.

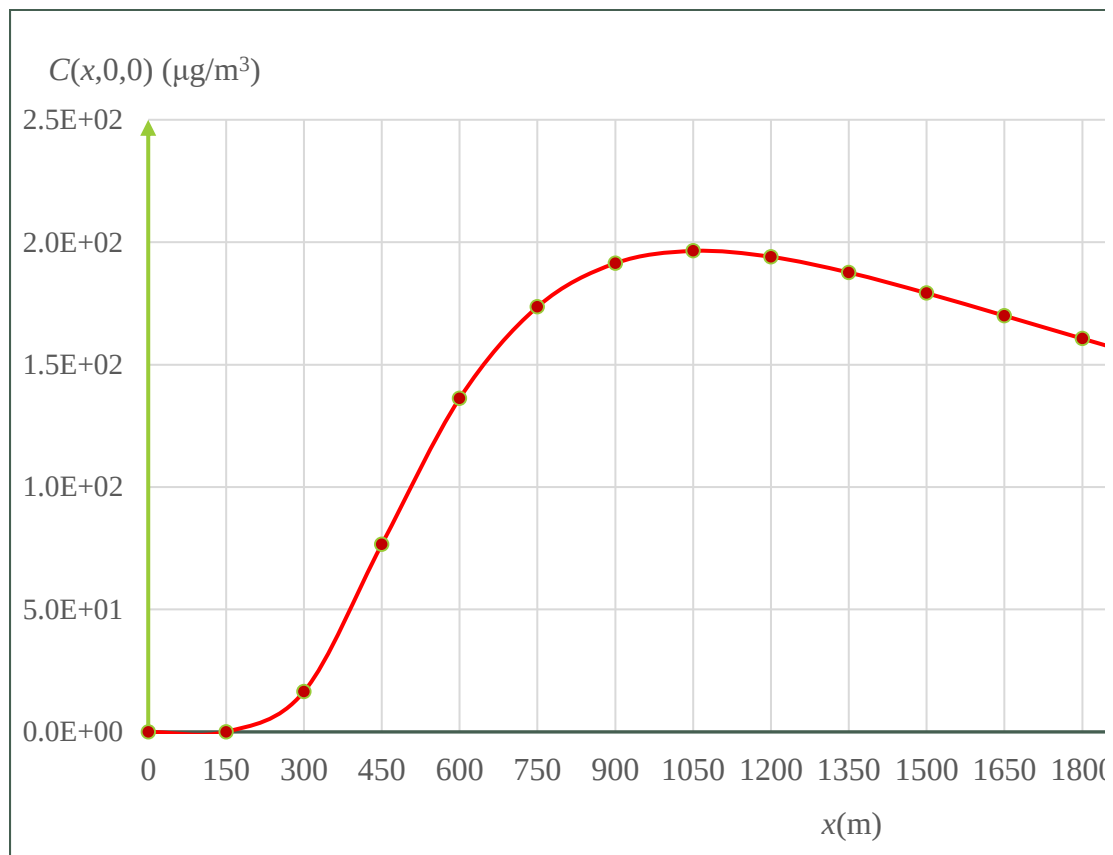
=(\$E\$11/(2*PI())*\$F\$11*\$E\$41*\$E\$46))*EXP((-1/2)*(((\$G\$11/\$E\$41)^2))*EXP((-1/2)*((											
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
z (m)											
85	0.0E+00	4.5E-08	2.7E-02	1.1E+00	5.5E+00	1.2E+01	2.0E+01	2.7E+01	3.2E+01	3.6E+01	3.8E+01
80	0.0E+00	6.0E-06	2.4E-01	4.2E+00	1.4E+01	2.6E+01	3.6E+01	4.4E+01	4.9E+01	5.1E+01	5.3E+01
75	0.0E+00	4.8E-04	1.6E+00	1.4E+01	3.3E+01	5.0E+01	6.2E+01	6.8E+01	7.1E+01	7.1E+01	7.0E+01
70	0.0E+00	2.3E-02	9.0E+00	4.1E+01	7.1E+01	9.0E+01	9.8E+01	1.0E+02	9.9E+01	9.5E+01	9.1E+01
65	0.0E+00	6.5E-01	4.0E+01	1.0E+02	1.4E+02	1.5E+02	1.5E+02	1.4E+02	1.3E+02	1.2E+02	1.1E+02
60	0.0E+00	1.1E+01	1.4E+02	2.2E+02	2.4E+02	2.3E+02	2.1E+02	1.9E+02	1.7E+02	1.5E+02	1.4E+02
55	0.0E+00	1.1E+02	3.9E+02	4.2E+02	3.7E+02	3.2E+02	2.7E+02	2.4E+02	2.1E+02	1.8E+02	1.6E+02
50	0.0E+00	6.7E+02	8.5E+02	6.8E+02	5.3E+02	4.2E+02	3.4E+02	2.8E+02	2.4E+02	2.1E+02	1.8E+02
45	0.0E+00	2.4E+03	1.5E+03	9.6E+02	6.8E+02	5.1E+02	4.0E+02	3.2E+02	2.7E+02	2.3E+02	2.0E+02
35.1499	3.8E+11	6.6E+03	2.3E+03	1.3E+03	8.3E+02	5.9E+02	4.5E+02	3.6E+02	3.0E+02	2.5E+02	2.2E+02
40	0.0E+00	5.2E+03	2.1E+03	1.2E+03	7.9E+02	5.7E+02	4.4E+02	3.5E+02	2.9E+02	2.4E+02	2.1E+02
35	1.0E-116	6.6E+03	2.3E+03	1.3E+03	8.3E+02	5.9E+02	4.5E+02	3.6E+02	3.0E+02	2.5E+02	2.2E+02
30	0.0E+00	5.0E+03	2.1E+03	1.2E+03	7.8E+02	5.7E+02	4.4E+02	3.5E+02	2.9E+02	2.5E+02	2.2E+02
25	0.0E+00	2.3E+03	1.5E+03	9.5E+02	6.7E+02	5.1E+02	4.0E+02	3.3E+02	2.8E+02	2.4E+02	2.1E+02
20	0.0E+00	6.1E+02	8.2E+02	6.6E+02	5.2E+02	4.2E+02	3.5E+02	3.0E+02	2.6E+02	2.3E+02	2.0E+02
15	0.0E+00	9.9E+01	3.6E+02	4.0E+02	3.7E+02	3.3E+02	2.9E+02	2.6E+02	2.3E+02	2.1E+02	2.0E+02
10	0.0E+00	9.5E+00	1.3E+02	2.2E+02	2.4E+02	2.5E+02	2.4E+02	2.3E+02	2.1E+02	2.0E+02	1.9E+02
5	0.0E+00	5.4E-01	3.8E+01	1.1E+02	1.6E+02	1.9E+02	2.0E+02	2.0E+02	2.0E+02	1.9E+02	1.8E+02
0	0.0E+00	3.7E-02	1.6E+01	7.7E+01	1.4E+02	1.7E+02	1.9E+02	2.0E+02	1.9E+02	1.9E+02	1.8E+02
x (m)	0.001	150	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500

Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Perfil de concentración $C(x, y, H)$.

$=(\$E\$11/(2*PI())*\$F\$11*\$E\$41*\$E\$46))*EXP((-1/2)*((\$D26/\$E\$41)^2))*(EXP((-1/2)*(($											
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
y(m)											
45	0.0E+00	2.4E-02	6.7E+01	2.3E+02	3.0E+02	3.0E+02	2.8E+02	2.5E+02	2.2E+02	2.0E+02	1.8E+02
40	0.0E+00	3.4E-01	1.4E+02	3.3E+02	3.7E+02	3.5E+02	3.1E+02	2.7E+02	2.4E+02	2.1E+02	1.9E+02
35	0.0E+00	3.4E+00	2.7E+02	4.6E+02	4.5E+02	3.9E+02	3.4E+02	2.9E+02	2.5E+02	2.2E+02	1.9E+02
30	0.0E+00	2.5E+01	4.8E+02	6.0E+02	5.3E+02	4.4E+02	3.6E+02	3.1E+02	2.6E+02	2.3E+02	2.0E+02
25	0.0E+00	1.4E+02	7.8E+02	7.5E+02	6.1E+02	4.8E+02	3.9E+02	3.2E+02	2.7E+02	2.3E+02	2.0E+02
20	0.0E+00	5.6E+02	1.2E+03	9.1E+02	6.8E+02	5.2E+02	4.1E+02	3.3E+02	2.8E+02	2.4E+02	2.1E+02
15	0.0E+00	1.6E+03	1.6E+03	1.1E+03	7.4E+02	5.5E+02	4.3E+02	3.4E+02	2.9E+02	2.4E+02	2.1E+02
10	0.0E+00	3.6E+03	2.0E+03	1.2E+03	7.9E+02	5.7E+02	4.4E+02	3.5E+02	2.9E+02	2.5E+02	2.1E+02
5	0.0E+00	5.6E+03	2.2E+03	1.2E+03	8.2E+02	5.9E+02	4.5E+02	3.6E+02	2.9E+02	2.5E+02	2.2E+02
0.0000	3.8E+11	6.6E+03	2.3E+03	1.3E+03	8.3E+02	5.9E+02	4.5E+02	3.6E+02	3.0E+02	2.5E+02	2.2E+02
-5	0.0E+00	5.6E+03	2.2E+03	1.2E+03	8.2E+02	5.9E+02	4.5E+02	3.6E+02	2.9E+02	2.5E+02	2.2E+02
-10	0.0E+00	3.6E+03	2.0E+03	1.2E+03	7.9E+02	5.7E+02	4.4E+02	3.5E+02	2.9E+02	2.5E+02	2.1E+02
-15	0.0E+00	1.6E+03	1.6E+03	1.1E+03	7.4E+02	5.5E+02	4.3E+02	3.4E+02	2.9E+02	2.4E+02	2.1E+02
-20	0.0E+00	5.6E+02	1.2E+03	9.1E+02	6.8E+02	5.2E+02	4.1E+02	3.3E+02	2.8E+02	2.4E+02	2.1E+02
-25	0.0E+00	1.4E+02	7.8E+02	7.5E+02	6.1E+02	4.8E+02	3.9E+02	3.2E+02	2.7E+02	2.3E+02	2.0E+02
-30	0.0E+00	2.5E+01	4.8E+02	6.0E+02	5.3E+02	4.4E+02	3.6E+02	3.1E+02	2.6E+02	2.3E+02	2.0E+02
-35	0.0E+00	3.4E+00	2.7E+02	4.6E+02	4.5E+02	3.9E+02	3.4E+02	2.9E+02	2.5E+02	2.2E+02	1.9E+02
-40	0.0E+00	3.4E-01	1.4E+02	3.3E+02	3.7E+02	3.5E+02	3.1E+02	2.7E+02	2.4E+02	2.1E+02	1.9E+02
-45	0.0E+00	2.4E-02	6.7E+01	2.3E+02	3.0E+02	3.0E+02	2.8E+02	2.5E+02	2.2E+02	2.0E+02	1.8E+02
x(m)	0.001	150	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500

Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Perfil de concentración $C(x, 0, 0)$.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se lleva a cabo el análisis e interpretación crítica de los resultados obtenidos, estableciendo conexiones directas con el marco teórico, los antecedentes revisados y la hipótesis planteada. A diferencia del capítulo anterior, donde se presentaron los datos de manera objetiva, aquí se busca comprender su significado, implicancias y coherencia con lo que la teoría y estudios previos sugieren.

La discusión no solo consiste en contrastar los hallazgos con las expectativas iniciales, sino también en profundizar en las razones que explican dichos resultados, considerando factores contextuales, metodológicos y teóricos. De este modo, se evalúa si las evidencias respaldan o refutan la hipótesis y se identifican posibles aportes, contradicciones o nuevas perspectivas que emergen a partir del estudio.

Asimismo, se destacan los hallazgos más relevantes, se identifican patrones significativos y se exploran sus posibles implicancias para el campo de estudio. Se reconocen también las limitaciones que pudieron haber influido en los resultados y se plantean interrogantes que pueden orientar futuras investigaciones.

Este capítulo representa un espacio de reflexión científica donde se articula el conocimiento empírico con la teoría, permitiendo consolidar el aporte del estudio al saber disciplinar.

En la figura 7, se muestra el perfil de concentración $C(x, 0, z)$. Este perfil fue obtenido, haciendo uso de la ecuación (1) y evaluándose previamente las variables que intervienen en los procesos 1, 2, 3 y 4. Por ejemplo, el valor de $C(300, 0, 30) = 2.1 \times 10^3 \mu g/m^3$, se evaluó de la forma siguiente:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z v_{v(H)}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]} \left\{ e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right]} + e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right]} \right\}$$

Como $y = 0$, la ecuación (1), queda:

$$C(x, 0, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z v_{v(H)}} \left\{ e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right]} + e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right]} \right\}$$

$$C(300, 0, 30) = \frac{1.10 \times 10^7}{2\pi(16.8965)(10.45812)(4.238)} \left\{ e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{30-35.150}{10.45812}\right)^2\right]} + e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{30+35.150}{10.45812}\right)^2\right]} \right\}$$

$$C(300, 0, 30) = 2.1 \times 10^3 \frac{\mu g}{m^3} .$$

En la figura 7, también se puede observar, que la concentración máxima en el perfil $C(x, 0, z)$ es $3.8 \times 10^{11} \mu g/m^3$ y se encuentra en el punto (0.001, 0, 35.150).

En la figura 8, se muestra el perfil de concentración $C(x, y, H)$. Este perfil fue obtenido, haciendo uso de la ecuación (1) y evaluándose previamente las variables que intervienen en los procesos 1, 2, 3 y 4. Por ejemplo, el valor de $C(300, 15, 35.150) = 1.6 \times 10^3 \mu g/m^3$, se evaluó de la forma siguiente:

$$C(300, 15, 35.150) =$$

$$= \frac{1.10 \times 10^7}{2\pi(16.8965)(10.45812)(4.238)} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{15}{16.8965}\right)^2\right]} \left\{ e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{35.150-35.150}{10.45812}\right)^2\right]} + e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{35.150+35.150}{10.45812}\right)^2\right]} \right\}$$

$$C(300, 15, 35.150) = 1.6 \times 10^3 \frac{\mu g}{m^3} .$$

La figura 8, también muestra, que la concentración máxima en el perfil $C(x, y, H)$ es $3.8 \times 10^{11} \mu g/m^3$ y se encuentra en el punto (0.001, 0, 35.150) (punto de emisión de la chimenea).

En la figura 9, se muestra el perfil de concentración $C(x, 0, 0)$. Este perfil también fue obtenido, haciendo uso de la ecuación (1) y evaluándose previamente las variables que intervienen en los procesos 1, 2, 3 y 4. Por ejemplo, el valor de $C(300, 0, 0) = 16 \mu g/m^3$, se evaluó de la forma siguiente:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z v_{v(H)}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]} \left\{ e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right]} + e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right]} \right\}$$

Como $y = 0$ y $z = 0$, la ecuación (1) se simplifica a:

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z v_{v(H)}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{0}{\sigma_y}\right)^2\right]} \left\{ e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{0-H}{\sigma_z}\right)^2\right]} + e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{0+H}{\sigma_z}\right)^2\right]} \right\}$$

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z v_{v(H)}} \left\{ e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right]} + e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{-H}{\sigma_z}\right)^2\right]} \right\}$$

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z v_{v(H)}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right]}$$

Reemplazando los valores de Q , H , $v_{v(H)}$, (σ_y y σ_z en $x = 300$), se tiene:

$$C(300, 0, 0) = \frac{1.10 \times 10^7}{\pi(16.8965)(10.45812)(4.238)} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{35.150}{10.45812}\right)^2\right]}$$

$$C(300, 0, 0) = 16 \frac{\mu g}{m^3}.$$

La figura 9, también indica que la concentración en el perfil $C(x, 0, 0)$, aumenta considerablemente hasta llegar al valor máximo de $2.0 \times 10^2 \mu g/m^3$ en el punto (1050, 0, 0) y luego disminuye hasta $1.1 \times 10^2 \mu g/m^3$ en el punto (2700, 0, 0).

En <https://www.carlessuria.com/toxicos/co2-dioxido-carbono/>, se menciona que el dióxido de carbono (CO₂), a partir de 5000 ppm, tiene efectos sobre la salud de las personas, disminuyendo las capacidades cognitivas, produciendo fatiga, dolores de cabeza, la interrupción del sueño, la irritación emocional y la lentitud mental. Por tanto, se considera 5000 ppm, la concentración máxima permisible de dióxido de carbono ($C_{CO_2(MP)}$). Una forma de convertir la concentración en ppm a $\mu g/m^3$, es mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\mu g}{m^3} = \frac{ppm \times M}{24.5} \times 10^3.$$

Donde $M = 44$ g/mol, es la masa molar del dióxido de carbono. Entonces, si los 5000 ppm se convierte a $\mu g/m^3$, queda:

$$C_{\text{CO}_2(\text{MP})} = \frac{5000 \times 44}{24.5} \times 10^3 = 8.98 \times 10^6 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}.$$

Si se compara la concentración máxima de dióxido de carbono ($2.0 \times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$), en el perfil $C(x, 0, 0)$, con la concentración de dióxido de carbono máxima permisible ($C_{\text{CO}_2(\text{MP})} = 8.98 \times 10^6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se puede decir que la concentración de dióxido de carbono a nivel del suelo procedente de la chimenea industrial de la Planta Piloto FIQ-UNAP, está muy por debajo de la concentración máxima permisible, de modo que esto no afectará la salud de las personas que habitan a su alrededor. Cabe mencionar que para generar los perfiles $C(x, 0, z)$, $C(x, y, H)$ y $C(x, 0, 0)$, se ha mantenido los siguientes parámetros:

$$Q = 1.10 \times 10^7 \frac{\mu\text{g CO}_2}{\text{s}}, \quad H = 35.150 \text{ m} \quad \text{y} \quad v_{v(H)} = 4.238 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

CAPÍTULO VI: PROPUESTA

Este capítulo presenta una propuesta concreta derivada del análisis teórico y de los hallazgos empíricos obtenidos a lo largo de la investigación. Su propósito es ofrecer una solución viable, pertinente y sustentada a la problemática identificada, contribuyendo así a la mejora del contexto estudiado desde un enfoque práctico y transformador.

La propuesta no surge de manera aislada, sino como resultado de un proceso reflexivo que integra el diagnóstico de la realidad, la evidencia empírica y el marco conceptual desarrollado previamente. En este sentido, se plantea una intervención fundamentada, realista y contextualizada, que busca generar cambios positivos y sostenibles.

Se describen aquí los objetivos de la propuesta, su estructura, componentes, estrategias de implementación y los recursos necesarios para su ejecución. Además, se incluyen las condiciones de viabilidad, los posibles impactos esperados y los criterios de evaluación que permitirán valorar su eficacia.

Este capítulo representa la culminación propositiva de la investigación, al trascender el análisis descriptivo y explicativo para proyectarse hacia la acción, el cambio y la mejora. De esta manera, se reafirma el compromiso de la investigación con la generación de conocimiento útil, aplicable y transformador para la realidad social o institucional abordada.

A pesar de que la concentración máxima de dióxido de carbono a nivel del suelo ($2.0 \times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$), procedente de la chimenea industrial de la Planta Piloto FIQ-UNAP está muy por debajo de la concentración máxima permisible ($8.98 \times 10^6 \mu\text{g}/\text{m}^3$); se cree que aún se puede reducir más dicha concentración, mediante el aumento de la altura física de la chimenea y utilizando otro combustible que tenga un factor de emisión menor que el diésel 2.

Para esto se propone que la altura física de la chimenea sea: $h = 10$ m. Se propone que el combustible sea una mezcla que tenga la siguiente composición en volumen: 70% diésel 2 y 30% biodiésel. La [Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero \(GEI\) \(2011, p. 19\)](#), indica que el factor de emisión del dióxido de carbono

para dicha mezcla, es: 1.83 kg CO₂/L, lo cual si se divide entre la densidad (0.860 kg/L), se obtiene un factor de emisión igual a 2.13 kg CO₂/kg combustible. Entonces, el factor de emisión (E_{CO_2}), queda:

$$E_{\text{CO}_2} = 2.13 \times 10^9 \mu\text{g CO}_2/\text{kg combustible}.$$

Se considera para este caso el mismo consumo promedio para esta mezcla, es decir: 4 gal/h, lo cual es igual a 15.14 L/h. Si se multiplica este valor por la densidad (0.860 kg/L) de dicha mezcla (70% diésel 2 y 30% biodiésel), se obtiene el consumo de la mezcla en kg/h y kg/s:

$$\hat{C}_{\text{com}} = \left(15.14 \frac{\text{L}}{\text{h}}\right) \left(0.860 \frac{\text{kg}}{\text{L}}\right) = 13.0204 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 0.00362 \frac{\text{kg}}{\text{s}}.$$

Entonces, el nuevo valor de la tasa de emisión (Q), considerando la propuesta es:

$$Q = E_{\text{CO}_2} \hat{C}_{\text{com}} = \left(2.13 \times 10^9 \mu\text{g} \frac{\text{CO}_2}{\text{kg}}\right) \left(0.00362 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) = 7.7 \times 10^6 \frac{\mu\text{g CO}_2}{\text{s}}.$$

A continuación, se muestran los resultados de las variables para los procesos 1, 2 y 3, considerando la propuesta.

Tabla 10. Resultados de variables del proceso 1, considerando la propuesta.

E_{CO_2} $\frac{\mu\text{g}}{\text{kg}}$	$\hat{C}_{\text{com}}$ $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Q $\frac{\mu\text{g}}{\text{s}}$
2.13×10^9	0.00362	7.7×10^6

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 11. Resultados de variables del proceso 2, considerando la propuesta.

T_s	T_a	v_s	$v_{v(h)}$	$\frac{\Delta T_a}{\Delta Z}$	r
-------	-------	-------	------------	-------------------------------	-----

K	K	m/s	m/s	°C/m	m
561.15	303.15	5	2.563	-0.006	0.13
	Δh	h	H		
	m	m	m		
	27.231	10	37.321		

Fuente: [Elaboración propia](#).

Tabla 12. Resultados de variables del proceso 3, considerando la propuesta.

$v_{v(a)}$	Z_a	p	$v_{v(H)}$
m/s	m	Adimensional	m/s
1.2	1.5	0.4	4.336

Fuente: [Elaboración propia](#).

Como la altura física de la chimenea en la propuesta es $h = 10$ m, la velocidad del viento ($v_{v(h)}$) correspondiente a esta altura se evalúa nuevamente haciendo uso de la ecuación (3) (véase la tabla 11). Se ha considerado la clase de estabilidad E ($p = 0.4$, véase la tabla 3)

$$v_{v(h)} = v_{v(a)} \left(\frac{h}{Z_a} \right)^p = (1.2 \text{ m/s}) \left(\frac{10 \text{ m}}{1.5 \text{ m}} \right)^{0.4} = 2.563 \text{ m/s.}$$

De esta forma, la elevación de la pluma de contaminante, $\Delta h = 27.231$ m, se evaluó nuevamente mediante la ecuación (4) (véase la tabla 11).

$$\Delta h = 2.6 \left[\frac{T_a r^2 v_s (T_s - T_a)}{T_s v_{v(h)} \left(\frac{\Delta T_a}{\Delta Z} + 0.01 \right)} \right]^{1/3}$$

$$\Delta h = 2.6 \left[\frac{(303.15) (0.13)^2 (5) (561.15 - 303.15)}{(561.15)(2.563)(-0.006 + 0.01)} \right]^{1/3} = 27.231 \text{ m.}$$

De esta forma, la altura efectiva de la chimenea, para la propuesta, se muestra en la tabla 11 y se evaluó de la forma siguiente:

$$H = h + \Delta h = (10 + 27.231) \text{ m} = 37.231 \text{ m.}$$

Entonces, la velocidad del viento a la altura efectiva de la chimenea, en la propuesta, resultó ($v_{v(H)} = 4.336 \text{ m/s}$), la cual se muestra en la tabla 12. Para la evaluación correspondiente, se ha hecho uso de la ecuación (3), para lo cual se midió previamente la velocidad del viento, $v_{v(a)} = 1.2 \text{ m/s}$, a la altura ($Z_a = 1.5 \text{ m}$). También se ha considerado la estabilidad atmosférica de nivel E ($p = 0.4$, véase la tabla 3).

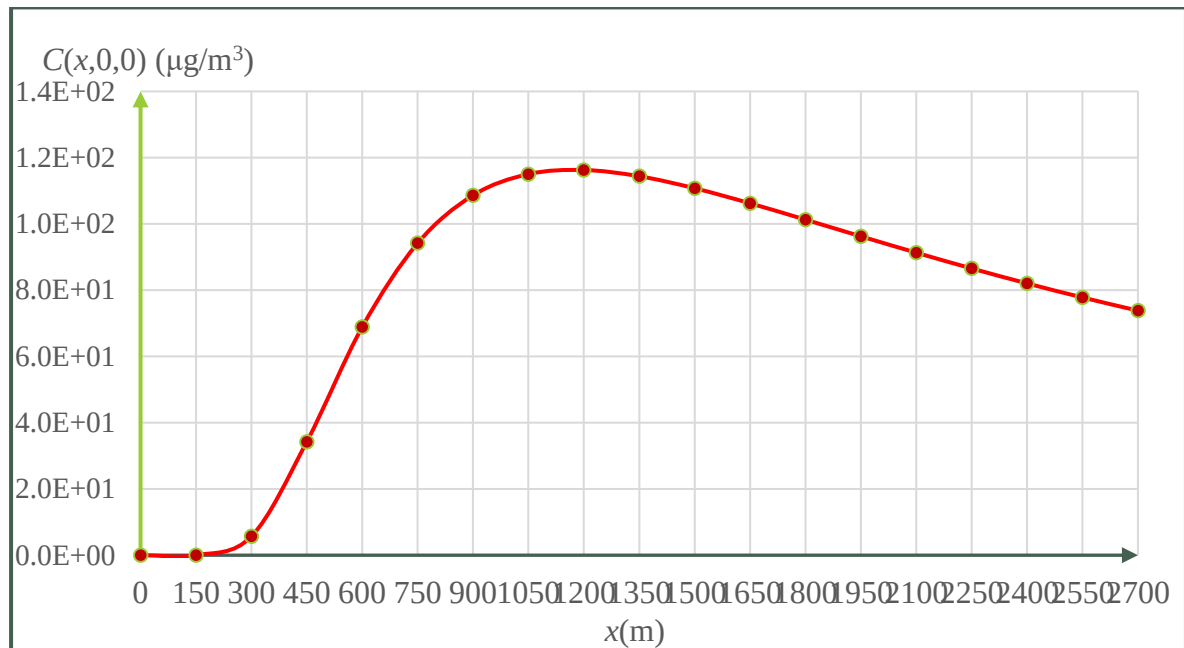
$$v_{v(H)} = v_{v(a)} \left(\frac{H}{Z_a} \right)^p = (1.2 \text{ m/s}) \left(\frac{37.231 \text{ m}}{1.5 \text{ m}} \right)^{0.4} = 4.336 \text{ m/s.}$$

Los valores de σ_y y σ_z , se evalúan de la misma que en el caso anterior.

Figura 10. Perfil de concentración $C(x, 0, z)$, para la propuesta.

$=(\$E\$11/(2*PI())*\$F\$11*\$I\$41*\$I\$46))*EXP((-1/2)*((\$G\$11/\$I\$41)^2))*(EXP((-1/2)*((\$$											
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
$z(m)$											
85	0.0E+00	2.5E-07	4.7E-02	1.4E+00	5.6E+00	1.2E+01	1.8E+01	2.3E+01	2.6E+01	2.9E+01	3.0E+01
80	0.0E+00	2.7E-05	3.7E-01	4.9E+00	1.4E+01	2.4E+01	3.1E+01	3.6E+01	3.9E+01	4.1E+01	4.1E+01
75	0.0E+00	1.8E-03	2.4E+00	1.5E+01	3.2E+01	4.4E+01	5.2E+01	5.5E+01	5.6E+01	5.5E+01	5.4E+01
70	0.0E+00	6.7E-02	1.2E+01	4.1E+01	6.5E+01	7.6E+01	8.0E+01	8.0E+01	7.7E+01	7.3E+01	6.9E+01
65	0.0E+00	1.5E+00	4.7E+01	9.8E+01	1.2E+02	1.2E+02	1.2E+02	1.1E+02	1.0E+02	9.2E+01	8.5E+01
60	0.0E+00	2.1E+01	1.5E+02	2.0E+02	2.0E+02	1.8E+02	1.6E+02	1.4E+02	1.3E+02	1.1E+02	1.0E+02
55	0.0E+00	1.7E+02	3.8E+02	3.6E+02	3.0E+02	2.5E+02	2.1E+02	1.8E+02	1.5E+02	1.3E+02	1.2E+02
50	0.0E+00	8.4E+02	7.6E+02	5.5E+02	4.1E+02	3.1E+02	2.5E+02	2.1E+02	1.7E+02	1.5E+02	1.3E+02
45	0.0E+00	2.4E+03	1.2E+03	7.3E+02	5.0E+02	3.7E+02	2.9E+02	2.3E+02	1.9E+02	1.6E+02	1.4E+02
37.2306	2.6E+11	4.5E+03	1.6E+03	8.7E+02	5.7E+02	4.0E+02	3.1E+02	2.5E+02	2.0E+02	1.7E+02	1.5E+02
40	0.0E+00	4.2E+03	1.5E+03	8.5E+02	5.6E+02	4.0E+02	3.1E+02	2.4E+02	2.0E+02	1.7E+02	1.4E+02
35	0.0E+00	4.3E+03	1.6E+03	8.6E+02	5.6E+02	4.0E+02	3.1E+02	2.4E+02	2.0E+02	1.7E+02	1.5E+02
30	0.0E+00	2.6E+03	1.3E+03	7.5E+02	5.1E+02	3.7E+02	2.9E+02	2.3E+02	1.9E+02	1.7E+02	1.4E+02
25	0.0E+00	9.6E+02	8.1E+02	5.7E+02	4.2E+02	3.2E+02	2.6E+02	2.1E+02	1.8E+02	1.6E+02	1.4E+02
20	0.0E+00	2.1E+02	4.1E+02	3.8E+02	3.1E+02	2.6E+02	2.2E+02	1.9E+02	1.6E+02	1.5E+02	1.3E+02
15	0.0E+00	2.7E+01	1.7E+02	2.1E+02	2.1E+02	1.9E+02	1.8E+02	1.6E+02	1.5E+02	1.3E+02	1.2E+02
10	0.0E+00	2.1E+00	5.4E+01	1.1E+02	1.3E+02	1.4E+02	1.4E+02	1.4E+02	1.3E+02	1.2E+02	1.2E+02
5	0.0E+00	9.7E-02	1.4E+01	5.1E+01	8.5E+01	1.1E+02	1.2E+02	1.2E+02	1.2E+02	1.2E+02	1.1E+02
0	0.0E+00	5.3E-03	5.7E+00	3.4E+01	6.9E+01	9.4E+01	1.1E+02	1.2E+02	1.2E+02	1.1E+02	1.1E+02
$x(m)$	0.001	150	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500

Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Perfil de concentración $C(x, 0, 0)$, para la propuesta.

Fuente: Elaboración propia.

Si se compara las figuras 7 y 10, se podrá observar que, mediante la propuesta, se reduce la concentración máxima en el perfil $C(x, 0, z)$, de $3.8 \times 10^{11} \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $2.6 \times 10^{11} \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Al comparar las figuras 9 y 11, se podrá observar que, mediante la propuesta, se reduce la concentración máxima en el perfil $C(x, 0, 0)$, de $2.0 \times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $1.2 \times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual representa casi la mitad de $2.0 \times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

También se puede observar, al comparar las figuras 9 y 11, que, mediante la propuesta, se reduce la concentración mínima en el perfil $C(x, 0, 0)$, de $1.1 \times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $74 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para visualizar mejor la reducción de las concentraciones del perfil $C(x, 0, 0)$, se ha elaborado la figura 12. En esta figura se puede observar claramente en qué medida disminuyen las concentraciones en este perfil.

De la misma forma que en el caso actual (con diésel 2), se ha evaluado las concentraciones en el perfil $C(x, 0, 0)$. Por ejemplo, para evaluar el valor de la concentración $C(300, 0, 0) = 16 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para la propuesta, se hizo uso de la ecuación (1) de la forma siguiente:

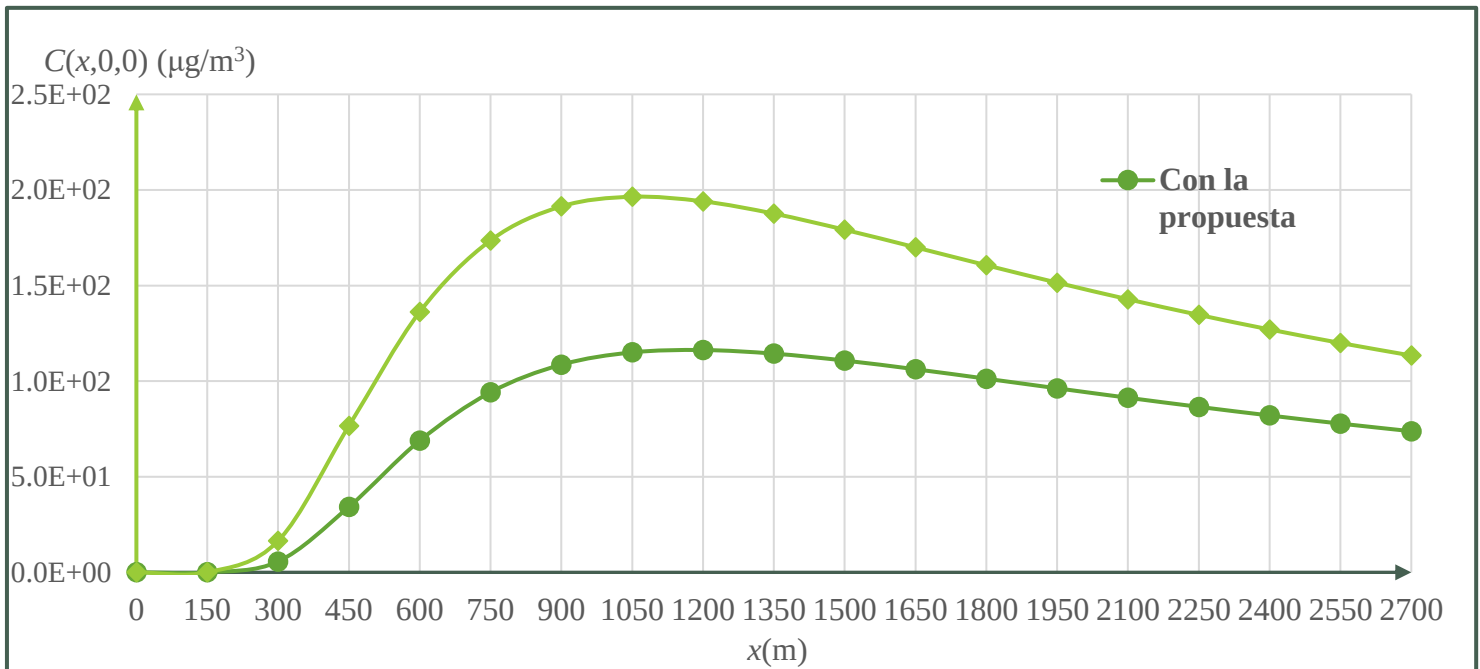
$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z v_{v(H)}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{0}{\sigma_y}\right)^2\right]} \left\{ e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{0-H}{\sigma_z}\right)^2\right]} + e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{0+H}{\sigma_z}\right)^2\right]} \right\}$$

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z v_{v(H)}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right]}$$

$$C(300, 0, 0) = \frac{7.7 \times 10^6}{\pi(16.8965)(10.45812)(4.336)} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{37.231}{10.45812}\right)^2\right]}$$

$$C(300, 0, 0) = 5.7 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}.$$

Figura 12. Comparación de los perfiles de concentración $C(x, 0, 0)$, actual con la propuesta.



Fuente: [Elaboración propia](#).

CONCLUSIONES

La presente sección sintetiza los hallazgos más relevantes de la investigación, articulando los resultados obtenidos con los objetivos planteados y el marco teórico que dio sustento al estudio. Las conclusiones constituyen el cierre lógico del proceso investigativo, y permiten ofrecer una mirada integradora, crítica y fundamentada sobre el fenómeno analizado.

Cada conclusión expuesta responde directamente a las preguntas de investigación y refleja el grado de cumplimiento de los objetivos específicos. A través de ellas, se evidencia si las hipótesis fueron confirmadas o refutadas, y se destacan los aportes que el estudio realiza tanto al conocimiento académico como a la práctica profesional o institucional.

Asimismo, las conclusiones permiten reconocer patrones, tendencias y relaciones significativas entre las variables, así como identificar aspectos que merecen atención futura. Estas apreciaciones finales no solo condensan lo aprendido, sino que también abren nuevas interrogantes y caminos de exploración para investigaciones posteriores.

En suma, esta sección representa el punto de llegada de una construcción científica rigurosa, y a la vez, un punto de partida para el desarrollo de nuevas propuestas, intervenciones o estudios que profundicen en la problemática abordada.

Se ha evaluado la tasa de emisión de dióxido de carbono procedente de la chimenea industrial de la Planta Piloto FIQ-UNAP, siendo este valor igual a $1.10 \times 10^7 \mu g \text{ CO}_2/\text{s}$. De esta forma se prueba la primera hipótesis específica y a la vez se está cumpliendo con el primer objetivo específico.

Se ha evaluado la altura efectiva de la chimenea industrial de la Planta Piloto FIQ-UNAP, siendo este valor igual a 35.150 m, probando de esta forma la segunda hipótesis específica y a la vez cumpliendo con el segundo objetivo específico.

Se evaluó, la velocidad media del viento a la altura efectiva de la chimenea industrial de la Planta Piloto FIQ-UNAP, resultando su valor igual a 4.238 m/s; de esta

manera se prueba la tercera hipótesis específica y se cumple con el tercer objetivo específico.

Se estableció las coordenadas de los puntos de la atmósfera donde se evaluó la concentración de dióxido de carbono, esto se puede observar claramente en las figuras 5 y 6. De esta forma se prueba la cuarta hipótesis específica y se cumple con el cuarto objetivo específico.

Haciendo uso de la ecuación (2) y las tablas 1 y 2, se evaluó los coeficientes de dispersión horizontal y vertical, para un rango de valores de x , que va de 0 a 2700 m. Esto prueba la quinta hipótesis específica y se cumple con el quinto objetivo específico.

Se ha evaluado la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera procedente de la chimenea industrial de la Planta Piloto FIQ-UNAP, para esto se ha graficado los perfiles $C(x, 0, z)$ y $C(x, y, H)$, en los cuales se hizo uso de la ecuación (1). La concentración máxima para los perfiles $C(x, 0, z)$ y $C(x, y, H)$ resultó $3.8 \times 10^{11} \mu g/m^3$ y estaba ubicada en el punto (0.001, 0, 35.150). La concentración máxima para el perfil $C(x, 0, 0)$, resultó $2.0 \times 10^2 \mu g/m^3$ y está ubicada en el punto (1050, 0, 0). Con esto se está probando la hipótesis general y a su vez también se está cumpliendo con el objetivo general.

Se propuso que la altura física de la chimenea sea 10 m y que el combustible a utilizarse sea una mezcla cuya composición en volumen es: 70% diésel 2 y 30% biodiésel. De esta forma se disminuyó la tasa de emisión de $1.10 \times 10^7 \mu g \text{ CO}_2/s$ a $7.6 \times 10^6 \mu g \text{ CO}_2/s$.

Mediante la propuesta, se estaría reduciendo la concentración máxima en el perfil $C(x, 0, z)$, de $3.8 \times 10^{11} \mu g/m^3$ a $2.6 \times 10^{11} \mu g/m^3$.

Mediante la propuesta, se estaría reduciendo la concentración máxima en el perfil $C(x, 0, 0)$, de $2.0 \times 10^2 \mu g/m^3$ a $1.2 \times 10^2 \mu g/m^3$.

Al disminuir la tasa de emisión, disminuye también la concentración en los perfiles $C(x, 0, z)$, $C(x, y, H)$ y $C(x, 0, 0)$, esto se debe a que la tasa de emisión es

directamente proporcional a la $C(x, y, z)$ en la atmósfera, tal como se muestra en la ecuación (1).

Los coeficientes de dispersión horizontal y vertical, sólo dependen de la coordenada x y no de las otras coordenadas (y y z), tal como se muestra en la ecuación (2).

El modelo gaussiano de dispersión de contaminantes, que se representa mediante la ecuación (1), en el presente trabajo de investigación, permite evaluar con gran exactitud la concentración de cualquier contaminante que se dispersa en la atmósfera, pero para eso se debe tener en cuenta la estabilidad atmosférica y evaluar una serie de variables adicionales como: la velocidad lineal media del viento a la altura efectiva de la chimenea, las coordenadas de posición, la altura efectiva de la chimenea y los coeficientes de dispersión en las direcciones y y z . De esta manera se concluye el presente trabajo de investigación, donde se está probando cada una de las cinco (5) hipótesis específicas y la hipótesis general y en forma simultánea también se está cumpliendo con cada uno de los objetivos específicos y el objetivo general.

RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos y las conclusiones formuladas, esta sección presenta un conjunto de recomendaciones orientadas a mejorar, transformar o fortalecer aspectos clave relacionados con la problemática investigada. Las recomendaciones se derivan directamente de la evidencia empírica y teórica del estudio, y están formuladas de manera concreta, viable y contextualizada.

Estas sugerencias están dirigidas a los actores principales del entorno analizado —sean instituciones, autoridades, profesionales o grupos sociales— y buscan facilitar la toma de decisiones informadas, el diseño de políticas, la implementación de estrategias o la adopción de buenas prácticas.

Cada recomendación responde a una necesidad identificada en el proceso investigativo y tiene como finalidad contribuir al logro de cambios significativos, sostenibles y alineados con los objetivos del estudio. Asimismo, se consideran aspectos de factibilidad, impacto y pertinencia para asegurar su aplicabilidad y eficacia en el contexto real.

En conjunto, esta sección representa el aporte práctico de la investigación, al traducir el conocimiento generado en acciones concretas que pueden mejorar la realidad abordada y fomentar procesos de mejora continua.

Se recomienda hacer uso del modelo gaussiano (ecuación (1)), para hacer el estudio de la dispersión de otros contaminantes en la atmósfera, como el monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂) y partículas (PM₁₀), emitidos por la chimenea industrial de la Planta Piloto FIQ-UNAP.

Se recomienda hacer uso en la caldera de la Planta Piloto FIQ-UNAP, de un combustible que tenga el factor de emisión del dióxido de carbono (E_{CO_2}), menor que el diésel 2, de esta forma se reducirá considerablemente la tasa de emisión (Q) y la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera.

Se recomienda hacer uso de la formulación de McMullen (ecuación (2)) y las tablas 1 y 2, para evaluar los coeficientes de dispersión horizontal (σ_y) y vertical (σ_z), en función de la dirección a la que se dispersan los contaminantes emitidos por una fuente puntual (chimenea).

Para evaluar la velocidad del viento a una determinada altura, se recomienda hacer uso de la Ley potencial de Deacon (ecuación (3)) y la tabla 3, pero para esto se debe medir previamente la velocidad del viento a una altura de 1.5 m.

Para hacer el estudio de contaminantes en la atmósfera, emitidos por fuentes puntuales de otras instituciones que se dediquen a realizar actividades industriales (producción de alimentos, refinería, triplayeras, producción de energía eléctrica, etc.) en la región Loreto, se recomienda hacer uso de la Ecuación de Briggs (ecuación (4)) con categorías de estabilidad E y F, para evaluar la elevación de la pluma de contaminante.

Al aumentar la producción en la Planta Piloto FIQ-UNAP, aumentaría el consumo de combustible en la caldera y por ende aumentaría la tasa de emisión de dióxido de carbono; para esto se recomienda hacer uso de las hojas de cálculo que se han elaborado en la presente investigación, pues esto permitiera realizar múltiples simulaciones, para evaluar cuales serían las nuevas dimensiones de la chimenea industrial (radio y altura física).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAYALA, María. Concentraciones máximas esperables de contaminantes atmosféricos en una fábrica de cemento. Trabajo final de Licenciatura en Tecnología Ambiental. Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, 2017, pp. 22-23.

Comisión Interdepartamental del Cambio Climático. Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), 2011, 19 p.
<http://www.caib.es/sacmicrofront/archivopub.do?ctrl=MCRST234ZI97531&id=97531>.

CRUZ, Carlos. Antonio. Implementación de un modelo de dispersión atmosférica y cálculo de dosis en la liberación de efluentes radiactivos en el Centro Nuclear. Tesis para optar el grado académico de Maestro en Ciencias Fisicomatemáticas. México: Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Física y Matemáticas, 2015, pp. xiv, 1, 70, 123-146.

ESPINOZA, Cristhian. José. Determinación de la dispersión geográfica de los gases NO_x, CO, SO₂ y partículas (PM₁₀), emitidos por una central térmica aplicando el modelo AERMOD. Trabajo de suficiencia profesional para optar el título profesional de ingeniero ambiental. Lima, Perú: Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Villa EL Salvador, 2018, pp. 1-2, 37-52.

HERNÁNDEZ, Roberto; FERNÁNDEZ, Carlos y BAPTISTA, María del Pilar. Metodología de la investigación. 6a ed. México: McGraw-Hill/ Interamericana Editores, S.A. de C.V., 2014, pp. 157-158.

HILARIO, Nilda. Emisiones contaminantes de vehículos del distrito de Huancayo. Tesis para optar el grado académico de Doctora en Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible. Huancayo, Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú, Unidad

de Posgrado de la Facultad de Ciencias Forestales y del Ambiente, 2017-2018, pp. xv, 1, 88-120. <https://www.carlessuria.com/toxicos/co2-dioxido-carbono/>

MASTERS, Gilbert. M. y ELA, Wendell. P. Introducción a la ingeniería medioambiental. 3a ed. Madrid-España: Pearson Educación, S.A., 2008, pp. 470, 472, 480-481. ISBN: 978-84-8322-444-1.

PEREIRA, Daniel. Simulación de la dispersión de contaminantes en la atmósfera de una planta de generación de electricidad a biomasa. Acta Nova, 8 (3), 376-396, 2018.

ROJAS, Freddy. Jesús. Modelación numérica del transporte de contaminantes atmosféricos y su relación con las condiciones meteorológicas en Lima Metropolitana. Tesis para optar el grado académico de Doctoris Philosophiae en Ingeniería y Ciencias Ambientales. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria la Molina, 2017, pp. 1-3.

WARK, Kenneth y WARNER, Cecil. F. Contaminación del aire, origen y control. 1a ed. México: Editorial Limusa, S.A. de C.V, Noriega Editores, 2007, pp. 122, 148-149. ISBN-13: 978-968-18-1954-5.

ZAMBRANO, Milly. Elizabeth. Análisis de dispersión de contaminantes emitidos por motores que utilizan petróleo crudo como combustible. Curso académico de Máster en Energías Renovables y Sostenibilidad Energética. Barcelona, España: Universitat de Barcelona, 2017-2018, pp. 1, 22-29.