

ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO EN OPERACIONES AÉREAS DEL AEROPUERTO EL DORADO USANDO TECNOLOGÍA ADS-B

J. Daza^a, C. Lozano^a, P. Melo^a, J. Orduy^a, D. Aldana^b y E. Vacca^a

^aIngeniería Aeronáutica – Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas – Fundación Universitaria Los Libertadores

Carrera 16 #63^a – 68, Bogotá - Colombia

^bIngeniería Aeronáutica – Escuela de Aviación del Ejército (ESAVE)

Aeropuerto Internacional El Dorado Nueva zona de Aviación General, Bogotá - Colombia

Email: jcdazar01@libertadores.edu.co

RESUMEN

El incremento en las operaciones aéreas genera desafíos medioambientales, siendo las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) uno de los principales. Durante 2022, Colombia experimentó un incremento del 57,2% en el número de pasajeros transportados respecto al año previo. Ante este panorama, el presente trabajo se enfoca en cuantificar las emisiones de CO₂ producidas por aeronaves en el espacio aéreo de Bogotá, basándose en datos proporcionados por el sistema ADS-B in terrestre. Estos datos se emplearon para calcular el consumo de combustible utilizando la base de datos de rendimiento de aeronaves (BADA). Posteriormente, se estimaron las emisiones de CO₂ y se representaron en un mapa de Bogotá, facilitando una comparación con el Índice Bogotano de Calidad de Aire (IBOCA). Finalmente, se implementó un algoritmo de random forest con el propósito de predecir futuros niveles de CO₂ en la ciudad a partir de altitud y latitud y longitud."

Palabras clave: ADS-B, CO₂, predicción, contaminación, aeronaves.

INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento del sector aéreo, potenciado por la recuperación post-pandemia, ha llevado a un aumento significativo en las operaciones aéreas a nivel global. Solo en Colombia, el número de pasajeros transportados se incrementó en un 57,2% en 2022 en comparación al año previo. A pesar de los evidentes beneficios económicos, este crecimiento conlleva desafíos medioambientales. Uno de los problemas más relevantes es el incremento en las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) producidas por las aeronaves [1].

Mientras las aeronaves operan, no solo generan CO₂, sino también una variedad de compuestos químicos, como vapor de agua (H₂O), óxidos nitrosos (NO_x), y muchos otros. Estos contaminantes, dependiendo de la fase operativa de la aeronave y del combustible consumido, pueden afectar significativamente la calidad del aire en las ciudades cercanas a aeropuertos. En Bogotá, para monitorizar y actuar ante la contaminación, se ha implementado el Índice Bogotano de Calidad de Aire (IBOCA). Este índice, mediante sensores distribuidos en la ciudad, mide en tiempo real la calidad del aire, incluyendo la cantidad de partículas PM_{2,5} y PM₁₀, que poseen un marcado impacto en la salud humana, esto lo que nos indica es la cantidad de partículas con diámetro aerodinámico menor que 2,5 micrómetros y 10 micrómetros respectivamente [2], [3].

Para abordar la problemática de las emisiones en el espacio aéreo de Bogotá, este estudio se centra en el uso del sistema ADS-B. A través de este sistema, es posible recopilar datos esenciales de las aeronaves, como su posición y nivel de vuelo. Al integrar estos datos con la base de datos de rendimiento de aeronaves (BADA), se pueden estimar los niveles de combustible y, consecuentemente, calcular las emisiones de CO₂ mediante un factor definido por la OACI. [4].

El sistema ADS-B es un sistema de vigilancia automático que permite la recopilación de datos de las aeronaves sin la intervención de un operador. Dependiendo de sistemas a bordo, como el de navegación global por satélite, transmite información como identificador de la aeronave, posición, y rumbo [5], [6]. Está compuesto por dos componentes principales: el ADS-B OUT, que procesa y transmite los datos de la aeronave, y el ADS-B IN, encargado de la recepción de datos en tierra y potencialmente en otras

aeronaves. Este sistema ha sido respaldado por la Administración Federal de Aviación (FAA) como un avance significativo para la gestión del tráfico aéreo [7], [8]. Para superar las limitaciones de rango visual, especialmente en zonas con obstrucciones, se ha integrado el uso de satélites, garantizando una transmisión efectiva de la señal entre la aeronave y las estaciones receptoras en tierra [9]. La Figura 1 presenta los actores clave involucrados en el funcionamiento del sistema ADS-B.

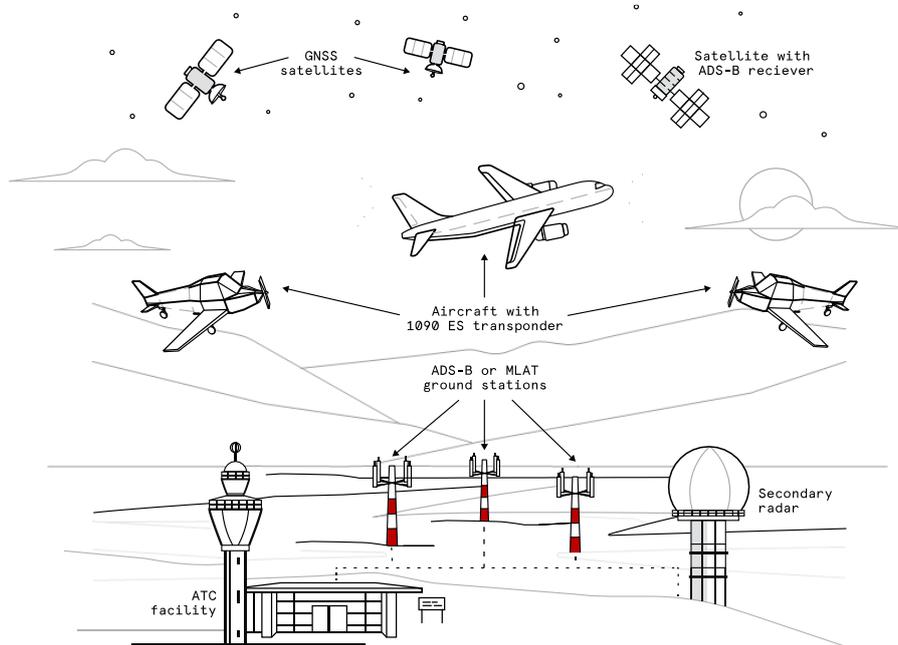


Figura 1. Actores principales del sistema ADS-B [10], [11].

Los datos provenientes del sistema vienen contenidos en un mensaje o trama con una longitud de 112 bits separados en 5 bloques, cada una de estas secciones tienen asociadas un número de bits que permite identificar de qué está compuesta como se puede evidenciar en la tabla 1 [12]. La Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (UAEAC) ha regulado el uso del sistema ADS-B en la frecuencia 1090 MHz en Colombia. Para capturar estos datos, se requieren antenas omnidireccionales y receptores basados en Software Defined Radio (SDR). Aunque hay plataformas con redes de antenas disponibles, su acceso completo puede ser costoso. Por ello, esta investigación empleó una antena y receptor propios, utilizando MATLAB para procesar las señales y obtener los datos directamente [13].

Tabla 1. Composición de las tramas ADS-B [6].

Bit	No. Bits	Abreviación	Información
1-5	5	DF	Downlink format
6-8	3	CA	Transponder Capability
9-32	24	ICAO	ICAO aircraft address
33-38 (33-37)	56 (5)	ME (TC)	Message, extended squitter (Type code)
89-112	24	PI	Parity/Interrogator ID

La Base de Datos de Rendimiento de Aeronaves (BADA, por sus siglas en inglés), es una herramienta esencial en el análisis y modelado de operaciones aéreas. Desarrollada y mantenida por la Organización Europea para la Seguridad de la Navegación Aérea (EUROCONTROL), BADA proporciona información detallada sobre el rendimiento de las aeronaves, incluyendo aspectos como el consumo de combustible en distintas fases del vuelo. Esta base de datos se ha convertido en una referencia en la industria aeronáutica, permitiendo a investigadores realizar estimaciones precisas sobre emisiones y otras variables operativas.

El principal objetivo de esta investigación es estimar las emisiones de CO₂ originadas por las operaciones aéreas en el aeropuerto El Dorado de Bogotá. Para ello, se integran los datos del sistema ADS-B con la Base de Datos de Rendimiento (BADA). Además, se propone un modelo de machine learning para predecir los niveles de CO₂ en ubicaciones geográficas específicas, y se valida esta estimación mediante comparación con las mediciones del Índice Bogotano de Calidad de Aire (IBOCA).

METODOLOGÍA

El desarrollo de este proyecto se basó en la metodología CRISP-DM, un modelo de proceso para la minería de datos que consta de seis fases iterativas, mostradas en la Figura 2. Este enfoque es especialmente adecuado dada la relevancia actual de la ciencia de datos [14].

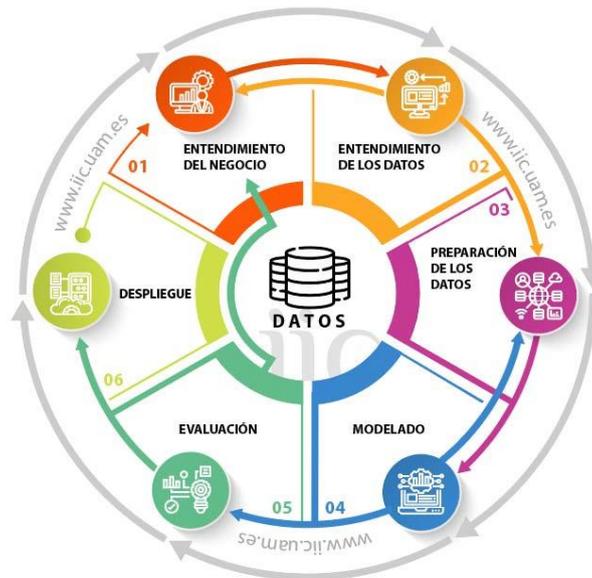


Figura 2. Fases de la metodología CRISP-DM [15].

Para el desarrollo de la presente investigación se implementaron las fases del modelo de la siguiente manera:

Fase 1: Durante esta etapa, se estableció el uso del receptor ADS-B IN operando a 1090 MHz y se implementó un decodificador en el software Matlab. La recolección de datos se realizó entre el 25 de marzo y el 1 de abril de 2023. La antena se situó en las instalaciones de la Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá. Para el análisis de datos, se optó por el lenguaje de programación Python.

Fase 2: En esta etapa, se procesaron y revisaron los datos ADS-B recopilados de las aeronaves. Se identificaron y descartaron datos que no eran relevantes para el estudio. Una tarea crucial fue determinar cómo vincular estos datos con la base BADA; esto se logró asociándolos con el nivel de vuelo de las aeronaves. Se hizo hincapié en asegurar que las aeronaves estuvieran representadas en BADA, para garantizar la integridad y exactitud de la investigación.

Fase 3: La calidad de los datos es fundamental para el éxito de cualquier proyecto de ciencia de datos. Se abordaron posibles errores y anomalías originados durante la recepción y decodificación de los mensajes ADS-B. Además, se estandarizaron los datos para asegurar coherencia en las fases posteriores.

Fase 4: Se implementó el algoritmo de aprendizaje supervisado random forest. Este modelo se entrenó y ajustó para optimizar sus predicciones. A lo largo de esta fase, se generaron diversas visualizaciones, como gráficos y mapas, para representar y comprender mejor los resultados obtenidos. [16].

Fase 5: Una vez desarrollados los modelos, se evaluaron en función de su precisión y relevancia. Se realizó el error cuadrático medio (MSE) como métrica principal para determinar la predicción del modelo, por otro lado, se cotejó con el Índice Bogotano de Calidad de Aire (IBOCA).

Fase 6: Con resultados validados y de alta calidad en mano, se avanzó al análisis final. Se proponen iniciativas basadas en estos análisis, buscando no solo mitigar el impacto de la contaminación, sino también implementar sistemas de monitoreo a largo plazo.

Después de determinar el tiempo de vuelo para cada aeronave, se consultó la tabla de rendimiento BADA correspondiente a dicho modelo, como ilustra la Figura 5. A partir de esta información, se identificó el consumo de combustible durante el ascenso, por minuto y nivel de vuelo. Posteriormente, se multiplicó dicho consumo por el tiempo de ascenso detectado por la antena ADS-B. La conversión a emisiones de CO2 se basó en un factor estipulado por la OACI, que establece que por cada kilogramo de combustible Jet A1 consumido, se liberan 3,16 kilogramos de CO2. Con estos datos de emisiones y las rutas previamente definidas, se generó un mapa de calor, visualizable en la Figura 6. En este mapa, las áreas con alta densidad de CO2 se destacan en tonalidades rojas, mientras que las de menor densidad se muestran en tonos azules.

```

BADA PERFORMANCE FILE                               May 06 2019
AC/Type: A320_[]
Source OPF File: Apr 08 2019
Source APF file: Mar 31 2011

Speeds: CAS(LO/HI) Mach Mass Levels [kg] Temperature: ISA
climb - 250/310 0.78 low - 46800
cruise - 250/310 0.78 nominal - 64000 Max Alt. [ft]: 41000
descent - 250/300 0.79 high - 77000
    
```

FL	CRUISE				CLIMB				DESCENT			
	TAS [kts]	fuel [kg/min]			TAS [kts]	ROCD [fpm]			TAS [kts]	ROCD [fpm]	fuel [kg/min]	
	lo	nom	hi	lo	nom	hi	nom	nom	nom	nom		
0				151	2687	2164	1860	113.5	137	707	44.7	
5				152	2672	2147	1842	112.5	138	723	44.3	
10				153	2656	2130	1825	111.4	144	788	44.0	
15				159	2765	2210	1891	110.5	155	770	17.4	
20				160	2748	2193	1873	109.5	187	824	17.4	
30	230	26.9	32.7	38.3	184	3166	2501	2130	108.1	230	935	8.7
40	233	26.9	32.7	38.3	218	3671	2857	2418	107.1	233	956	8.6
60	272	31.5	36.1	40.6	272	4186	3078	2512	104.5	272	1266	8.4
80	280	31.5	36.2	40.6	280	4027	2946	2392	100.4	280	1316	8.2
100	289	31.5	36.2	40.7	357	3667	2710	2223	98.4	345	2072	8.0
120	297	31.5	36.2	40.7	367	3441	2527	2060	94.3	356	2131	7.8
140	378	44.2	47.4	50.5	378	3209	2340	1892	90.2	366	2190	7.6
160	389	44.1	47.3	50.4	389	2972	2148	1719	86.2	377	2248	7.4
180	401	44.0	47.3	50.4	401	2728	1951	1543	82.2	388	2306	7.2
200	413	43.9	47.2	50.3	413	2480	1750	1362	78.3	400	2363	7.0
220	425	43.7	47.0	50.2	425	2227	1545	1178	74.4	412	2418	6.8
240	438	43.6	46.9	50.2	438	1969	1337	991	70.5	425	2472	6.7

Figura 5. Ejemplo de tabla de rendimiento BADA para A320.

La Figura 6 ilustra que en localidades como Fontibón y Kennedy, los niveles de CO2 alcanzan aproximadamente 15 toneladas por semana. En contraste, zonas como Barrios Unidos y Usaquén registran cerca de 12 toneladas en el mismo período. Es relevante señalar que estas áreas de Bogotá coinciden con altas densidades poblacionales, en gran parte atribuibles a la presencia de numerosas industrias y centros educativos como universidades. Esta concentración de actividad y población puede intensificar los impactos ambientales y de salud relacionados con las emisiones de CO2.

propósito primordial de este modelo es pronosticar los niveles de emisiones de CO₂ en ubicaciones geográficas específicas, proporcionando así un medio para identificar con mayor precisión las áreas propensas a experimentar altas concentraciones de CO₂. Una vez entrenado el algoritmo, se procedió a calcular el Error Cuadrático Medio (MSE, por sus siglas en inglés, 'Mean Squared Error'). El MSE es una métrica de evaluación que mide la cantidad promedio de error entre los valores reales y las predicciones hechas por el modelo. Esencialmente, cuantifica cuán cerca están las predicciones del modelo a los valores reales. Un MSE de 0 indicaría predicciones perfectas, mientras que un valor más alto indica un mayor error en las predicciones [16]. El resultado obtenido fue un MSE de 7212,52 Kg. Esto significa que, en promedio, las predicciones del modelo se desviaron en 7212,52 Kg respecto a los valores reales de CO₂. Teniendo en cuenta el orden del CO₂ el MSE indica un error aproximado del 1%, indicando que el modelo tiene una buena predicción de los niveles de CO₂ en un punto geográfico sobre la ciudad de Bogotá.

Finalmente, se realizó una proyección de las emisiones de CO₂ en la ciudad a una altitud de 50 ft, cuyos resultados se presentan en la Figura 7. Es notorio apreciar una consistente correlación entre los datos estimados previamente y las cifras pronosticadas por el modelo. Dado que la altitud es menor, las emisiones de CO₂ tienden a ser reducidas, especialmente atribuible a las maniobras de despegue de las aeronaves. Específicamente, en zonas críticas como Fontibón y Kennedy, se registran concentraciones de CO₂ alrededor de 12 toneladas. Por otro lado, en localidades como Barrios Unidos y Usaquén, las concentraciones se reducen a aproximadamente 5 toneladas. Esta información subraya la influencia significativa de las operaciones aéreas en la calidad del aire local, especialmente en áreas cercanas al aeropuerto, y destaca la relevancia de monitorear y gestionar adecuadamente estas emisiones para proteger la salud pública y el medio ambiente.

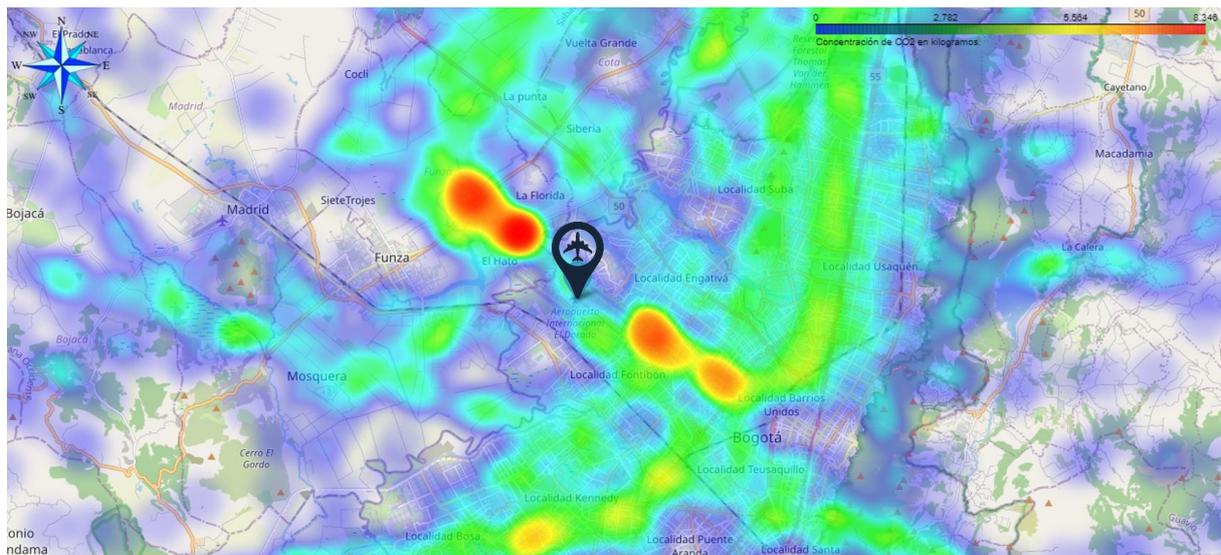


Figura 8. Mapa de calor obtenido por medio de las predicciones del modelo de regresión lineal.

CONCLUSIONES

El aumento en el número de operaciones aéreas en el Aeropuerto El Dorado tiene un efecto directo en las emisiones de CO₂ sobre la ciudad de Bogotá. Esta investigación demuestra que las localidades cercanas al aeropuerto, como Fontibón y Kennedy, son las más afectadas, registrando las mayores concentraciones de CO₂.

La combinación del sistema ADS-B con la base de datos de rendimiento BADA demostró ser efectiva para calcular las emisiones de CO₂ provenientes de aeronaves. La correlación entre estos datos y el Índice Bogotano de Calidad de Aire (IBOCA) valida la precisión y utilidad de estas herramientas para investigaciones similares.

La implementación del modelo de Random Forest permitió predecir con precisión las emisiones de CO₂ en diferentes zonas de Bogotá en función de la altitud, latitud, longitud y consumo de combustible de

las aeronaves. Estas predicciones son esenciales para anticipar áreas de potencial deterioro en la calidad del aire y tomar medidas proactivas.

Las plataformas como IBOCA son vitales para el monitoreo en tiempo real de la calidad del aire. Las comparaciones con datos estimados proporcionan una visión más completa de la situación ambiental, y enfatizan la necesidad de tener sistemas robustos de monitoreo para proteger la salud de los ciudadanos y el medio ambiente.

Sería útil ampliar este estudio a otros aeropuertos en Colombia y analizar el impacto de diferentes tipos de aeronaves en las emisiones de CO₂. Además, se podría investigar más a fondo la relación entre las emisiones de CO₂ y otros contaminantes del aire, como los óxidos de nitrógeno y las partículas PM_{2.5} y PM₁₀, para obtener una imagen más completa del impacto ambiental de las operaciones aéreas.

Las conclusiones obtenidas reafirman la necesidad de adoptar medidas para mitigar el impacto de las emisiones de las aeronaves, especialmente en áreas densamente pobladas cerca de aeropuertos. Estas medidas podrían incluir tecnologías más limpias, mejores prácticas operativas, y la promoción del transporte sostenible.

REFERENCIAS

- [1] Unidad Administrativa Especial Aeronáutica Civil, “2022: el año más representativo para la historia de la aviación en Colombia”, el 30 de enero de 2023. <https://www.aerocivil.gov.co/prensa/noticias/Pages/2022,-el-ano-mas-representativo-para-la-historia-de-la-aviacion-en-Colombia.aspx> (consultado el 22 de abril de 2023).
- [2] K. Kumaş, H. H. Aksu, O. Anan, A. Akyüz, y A. Güngör, “Estimation of carbon dioxide emissions from airplanes: A case study of a turkish airport”, *AIP Conf Proc*, vol. 2178, núm. 1, nov. 2019, doi: 10.1063/1.5135441/773161.
- [3] Y. F. Xing, Y. H. Xu, M. H. Shi, y X. Lian, “The impact of PM_{2.5} on the human respiratory system”, *J Thorac Dis*, vol. 8, núm. 1, p. E69, 2016, doi: 10.3978/J.ISSN.2072-1439.2016.01.19.
- [4] Organización de Aviación Civil Internacional, “MATERIAL DIDÁCTICO SOBRE UNA REGLAMENTACIÓN MODELO PARA ASISTIR A LOS ESTADOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL CORSIA”, ago. 2018.
- [5] Organización de Aviación Civil Internacional, “Panorama de la Vigilancia dependiente automática - emisión (ADS-B OUT)”, 2021.
- [6] J. Sun, *The 1090 Megahertz Riddle A Guide to Decoding Mode S and ADS-B Signals*, 2a ed. 2021.
- [7] Z. Zhang, “Optimization performance analysis of 1090ES ADS-B signal separation algorithm based on PCA and ICA”, *International Journal of Performability Engineering*, vol. 14, núm. 4, 2018, doi: 10.23940/ijpe.18.04.p17.741750.
- [8] A. Lange, J. Sieling, y G. Gonzalez Parra, “Convergence in airline operations: The case of ground times”, *J Air Transp Manag*, vol. 77, pp. 39–45, jun. 2019, doi: 10.1016/j.jairtraman.2019.03.001.
- [9] Indra, “SISTEMA ADS-B ATM”, 2015.
- [10] S. Sciancalepore, S. Alhazbi, y R. Di Pietro, “Reliability of ADS-B communications: Novel insights based on an experimental assessment”, *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing*, vol. Part F147772, pp. 2414–2421, 2019, doi: 10.1145/3297280.3297518.
- [11] Spire, “How does ADS-B work?”
- [12] D. Carrasco, “Desarrollo de una interfaz para recepción, procesamiento y visualización de tramas ADS-B de aeronaves usando un módulo RTL-SDR”, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2022.
- [13] Unidad Administrativa Especial Aeronáutica Civil, “Generalidades para la aprobación de Aeronavegabilidad del Sistema ADS-B OUT”, 2018.
- [14] C. Schröer, F. Kruse, y J. M. Gómez, “A systematic literature review on applying CRISP-DM process model”, en *Procedia Computer Science*, 2021. doi: 10.1016/j.procs.2021.01.199.
- [15] Pablo Haya, “La metodología CRISP-DM en ciencia de datos”, *Instituto de ingeniería del conocimiento*.

- [16] G. Bonaccorso, *Machine Learning Algorithms*. Birmingham - Mumbai: Packt Publishing Ltd, 2017.
- [17] Secretaría Distrital de Ambiente, “Mapa de calidad del aire de Bogotá”.
<http://iboca.ambientebogota.gov.co/mapa/> (consultado el 10 de agosto de 2023).