

HEATMAP DE OPERACIONES AÉREAS EN EL AEROPUERTO INTERNACIONAL EL DORADO DE BOGOTÁ A TRAVÉS DEL USO DEL SISTEMA ADS-B – ESTIMACIÓN DE ZONAS DE ANALISIS DE RUIDO PRODUCIDO.

D. Traslaviña ^a, A. Rosales ^a, S. Madrid ^a, C. Lozano ^a, J. Daza ^a, I. Rodríguez ^a
y E. Bejarano ^b.

^a Fundación Universitaria Los Libertadores, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Bogotá, Colombia.

^b Universidad Politécnica de Cataluña, Facultad de Informática de Barcelona, Barcelona, España.
Email: dstraslavinan@libertadores.edu.co

RESUMEN

Tras el impacto del COVID 19 en la aviación, se prevé un aumento anual de 4.4% en el tráfico aéreo mundial, junto con esto, un aumento en el ruido cerca a los aeropuertos y rutas de navegación, generando una grave afectación en la salud humana incrementando el riesgo de padecer enfermedades como: pérdida de audición, trastornos del sueño, cambios de humor, problemas cognitivos en niños y problemas cardiovasculares. En Colombia, la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (UAEAC) establece límites de ruido en aeropuertos y rutas basándose en la normativa internacional de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), esta investigación se enfoca en el tráfico aéreo y una estimación del ruido acumulado por las aeronaves que operan sobre la ciudad de Bogotá mediante la toma de datos con una antena ADS-B y la metodología CRISP-DM para modelar y mapear las rutas y hacer una estimación de la acumulación de ruido de las aeronaves. Los resultados mostraron que los sectores de la ciudad expuestos a un alto nivel estimado de ruido son: Suba, Engativá, Usaquén, Fontibón, Teusaquillo, Puente Aranda, Kennedy, Bosa y Barrios Unidos, debido a su cercanía con el aeropuerto o rutas aéreas y teniendo similitud con un estudio de la UAEAC en 2018. Esta investigación permite identificar zonas vulnerables, diseñar estrategias de prevención y detección temprana de problemas relacionados. Esta es una metodología para estimar el ruido basados en el sistema ADS-B.

Palabras clave: ADS-B, AEROPUERTO, IMPACTO POTENCIAL, NAVEGACIÓN, SALUD.

INTRODUCCIÓN

Gracias al rápido crecimiento que ha experimentado la industria de la aviación en los años posteriores a la pandemia del COVID-19, la revista de predicciones Deloitte pronostica que para finales del año 2023 o comienzos del 2024 el tráfico mundial de aeronaves presente los mismos niveles que en la época de prepandemia, y que a partir de allí crezca un 4.4% anual [1], [2]. Como resultado a esto, las aerolíneas a nivel mundial presentarán un aumento en el número de vuelos, lo que a su vez genera que tenga que expandir su flota de aeronaves. Al presentarse un aumento tan significativo en el tráfico aéreo mundial, el padecimiento ciertas enfermedades, vinculadas al ruido de las aeronaves, empezaran aumentar, generando un deterioro en la calidad de vida de las personas que vivan en las cercanías de terminales aéreas o rutas aéreas, o en personas que se vean expuestas a este ruido de forma constante.

De las enfermedades más significativas que se pueden resaltar cuando se habla de este ruido característico, se pueden rescatar tres, las cuales se han relacionado de forma directa a estas fuentes de ruido, las cuales son la pérdida de la audición, mal humor y perturbación en el sueño [3]. Sin embargo, esta forma de ruido ha presentado una vinculación indirecta, pero con una fuerte relación a problemas de salud como problemas cardiovasculares, discapacidades cognitivas en niños, resultados adversos en nacimientos, desórdenes metabólicos y problemas de salud mental [3].

En zonas aledañas a aeropuertos, se estima que el ruido promedio dentro de las edificaciones puede llegar a superar los 87 dB al paso de las aeronaves, este valor se encuentra drásticamente por encima

del límite en el cual los efectos a la salud empiezan a ser significativos, el cual se ha establecido en 45dB, a partir de este límite la salud de las personas comienza a sufrir una disminución considerable, lo cual con un tráfico aéreo mayor hará más evidentes las enfermedades antes mencionadas [4]–[7]. Este tipo de estudios junto uno hecho por Caballol [8] han logrado establecer a las aeronaves como una fuente puntual de generación de ruido.

Actualmente hay dos formas que prevalecen a la hora de medir el ruido que es producido por una aeronave; la primera, es por un evento individual, el cual, como su nombre lo indica, describe el ruido de un solo avión mientras que la segunda mide los niveles de ruido en una localización determinada por un periodo de tiempo [3], [9].

De estas enfermedades ya mencionadas, aquellas que han sido ampliamente estudiadas son la pérdida auditiva y la perturbación del sueño, de las cuales, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la que presenta mayor afectación en la vida cotidiana de las personas ocasionado gran irritabilidad y bajo rendimiento laboral es la perturbación del sueño; la cual es un tipo de alteración del sueño que se encuentra altamente vinculada a la presencia de niveles altos de ruido de forma discontinua, en este caso, de aeronaves, produciendo que llegar a un estado de sueño profundo sea considerablemente más difícil, volviendo a las personas propensas a despertarse de forma continua a lo largo de la noche, de aquí se deriva el mal humor, el cual es un estado mental el cual surge cuando se presenta algún tipo de perturbación en la actividad que se esté desarrollando, en este caso, la perturbación se encuentra al momento de dormir [3], [10].

Por otro lado, una serie de estudios en aeropuertos de China [11] han concluido que aquellas personas las cuales se encuentran cerca a esta fuente de sonido, como en aquellas personas que trabajan en terminales aéreas, dichas investigaciones sugieren que entre más cercana se encuentre un persona al ruido de la aeronave, la pérdida de audición en esta será mucho mayor, sin embargo esto no quiere decir que el estar lejos de un aeropuerto o terminal aérea libre a las personas de sufrir pérdida auditiva, un estudio hecho en Taiwán [5] manifestó que estudiantes de una escuela ubicada bajo una ruta de navegación aérea, presentaron una pérdida enorme de la audición.

La percepción del ruido generado por las aeronaves y el incremento de personas con enfermedades ligadas a esta fuente de ruido, cobraron gran importancia desde el año 2020, año desde el cual gran parte de la población de vio obligada a pasar gran parte del tiempo en sus casas, esto por las restricciones debidas al COVID-19, cuando el estilo de vida cambio, las personas empezaron a sentir más este tipo de ruidos, al cual se le suma un estudio realizado por Airbus el cual menciona que el mundo cuenta actualmente con 47 megaciudades, donde el 90% de estas tienen vuelos intercontinentales [3], [12].

Esto ha generado una gran preocupación en los organismos encargados de controlar la aviación civil a nivel mundial, a raíz de esto, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) por medio de su Anexo 16 [13] define los niveles de ruido permitidos en las aeronaves, por medio de este mismo anexo la OACI a establecido, en su documento 9911, la forma en que debe ser caracterizado el ruido generado por las aeronaves en los alrededores de las terminales aéreas, esto con el fin de conocer la magnitud y extensión en las zonas aledañas [14]. De igual forma, la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (UAEAC) establece los niveles permitidos de ruido permitidos en Colombia en el RAC (Reglamento Aeronáutico Colombiano) [15].

Los diferentes organismos internacionales, en su carrera por disminuir el ruido producido por las aeronaves, han desarrollado diferentes metodologías y normas para lograr la reducción del ruido generado por las aeronaves en los aeropuertos; puesto que gran parte de la magnitud del ruido proveniente de aviones va a depender del tipo de aeronave, fase de vuelo y manipulación del piloto, esto produce que los efectos negativos en la salud de las personas se puedan ver incrementados.

Estas normativas no solo van para aviones subsónicos comerciales, se espera que este tipo de normas y metodologías sean aplicables a la futura flota de aviones supersónicos comerciales. [16]. El protocolo de Radiodifusión envía los datos de identificación, origen, destino, posición, velocidad y rumbo de la aeronave a la estación o antena ubicada en tierra, esto lo hace con una mayor precisión con la que los hacen los sistemas de vigilancia de radar primarios y secundarios. Su implementación se basa en aumentar la seguridad, eficiencia y la capacidad de la gestión del tráfico aéreo de un territorio [17].

Este trabajo se enfatizó en la recolección, procesamiento y análisis de datos obtenidos a partir de una antena ADS- B para determinar visualmente mediante heatmaps y mapas de tránsito aéreo, los sectores que presentan una mayor acumulación de tráfico aéreo y una acumulación estimada de ruido debido a las rutas de navegación del Aeropuerto Internacional El Dorado de la ciudad de Bogotá; esto con la finalidad de determinar cuáles son las localidades que presentan un alto potencial de impacto acústico para la salud humana de sus habitantes, debido a la alta densidad de aeronaves y a la aglomeración estimada de ruido sobre estas. Esta es una metodología para estimar el ruido basados en el sistema ADS-B.

METODOLOGÍA

Esta investigación se fundamenta en la aplicación de la metodología iterativa CRISP-DM, que se destaca por su amplia aplicación en proyectos e investigaciones que están orientados a extraer información importante a partir de un dataset o base de datos siguiendo una estructura que asegura el cumplimiento de los objetivos del proyecto. Esta particularidad le da a esta metodología flexibilidad y adaptabilidad para la gran mayoría de proyectos relacionados con el análisis de datos [18]–[20].

Para sacarle el máximo provecho a esta metodología, se deben seguir una serie de etapas o fases. Para iniciar, se procedió a la identificación y entendimiento del problema con el fin de comprender la extensión de este y establecer de manera clara y precisa los objetivos, junto con esto, se analizó el estado actual de la problemática y sus requerimientos, para así hacer una planeación de los procedimientos de recepción y recopilación de datos. En la fase posterior, se procedió a hacer una revisión, análisis y estudio de los datos recolectados por la antena ADS-B de lunes a viernes de 2 a 6 de la tarde (UTC -5). Dichos datos fueron recolectados mediante el programa “Airplane Tracking Using ADS-B Signals” de MATLAB, que tabula los datos y genera un archivo de tipo texto. En la tercera etapa, se realizó una clasificación y ajuste de los datos, esto implicó la eliminación de los datos poco significativos mediante un filtrado en Python, donde quedaron aproximadamente 73.000 datos útiles para lograr obtener las coordenadas de las rutas a la entrada y salida del Aeropuerto Internacional El Dorado. Luego, se generó un modelo de los datos, también en Python, aprovechando las librerías de Geopandas, Matplotlib y Folium, las cuales generaron un plano de la ciudad de Bogotá con las rutas que pasan por su área metropolitana y municipios cercanos, al igual que un mapa de calor, brindando una representación gráfica de la densidad y el nivel de utilización de estas rutas.

De esta misma forma, se obtuvo un heatmap con una estimación de la acumulación del ruido sobre la ciudad de Bogotá, lo cual se logró con la ayuda de dos bases de datos, la ANP legacy data de la EASA [21] y Aircraft Database de opensky network [22] que nos permitieron relacionar el número ICAO con el tipo y modelo junto con la matrícula de las aeronaves, para así identificar el tipo de motor y el ruido promedio que estas generan en tres fases: lateral, en sobrevuelo y en aproximación, arrojando un heatmap con una estimación de la acumulación de ruido sobre la ciudad de Bogotá.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de la producción de ruido generado por las aeronaves en el área metropolitana de Bogotá y sus municipios cercanos nos proporciona una amplia visión de cómo la alta densidad de aeronaves puede generar altos niveles de ruido en los intervalos de mayor operación del Aeropuerto Internacional El Dorado. La combinación de tecnologías como el sistema ADS-B y el procesamiento y análisis de datos han permitido estimar la afluencia de aeronaves y por tanto, los niveles de ruido a los que son sometidas ciertas áreas de Bogotá.

Al observar la Figura 1, se pueden observar las rutas utilizadas por los aviones para el despegue y aterrizaje del Aeropuerto Internacional El Dorado y su respectivo recorrido sobre la ciudad, además de las rutas aéreas que hacen únicamente sobrevuelo sobre la ciudad, estableciendo una base significativa para la determinación de las zonas con una posible producción de ruido. Se estima que las localidades de Bosa, Kennedy, Fontibón, Engativá, Usaquén y Suba podrían estar expuestas a un alto riesgo de contaminación acústica, ya que su cercanía con el aeropuerto o con la trayectoria de vuelo de las aeronaves las convierte en puntos críticos.

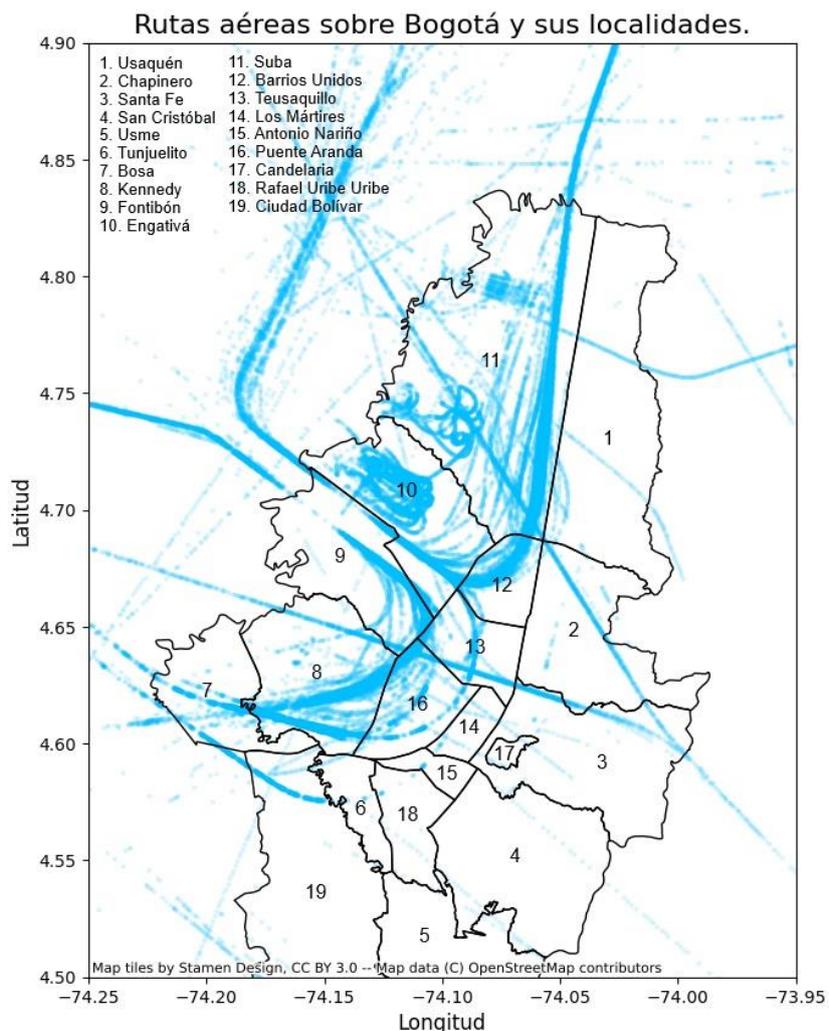


Figura 1. Rutas aéreas sobre Bogotá y sus localidades [23].

De igual manera, pero con una posible menor afectación por ruido de las aeronaves, se encuentran las localidades de Puente Aranda, Teusaquillo y Barrios Unidos, ya que la frecuencia de sobrevuelo de las aeronaves por estas zonas, es menor. Sin embargo, es importante mencionar que la contaminación auditiva no solo afecta a la ciudad de Bogotá. En la Figura 2 se observa como los municipios cercanos de Zipaquirá, Cajicá, Chía, Cota, Soacha, Madrid, Funza, Tenjo y Tabio, también tienen una significativa presencia del tráfico aéreo, enfrentando una creciente vulnerabilidad que podría afectar la calidad de vida de sus residentes.

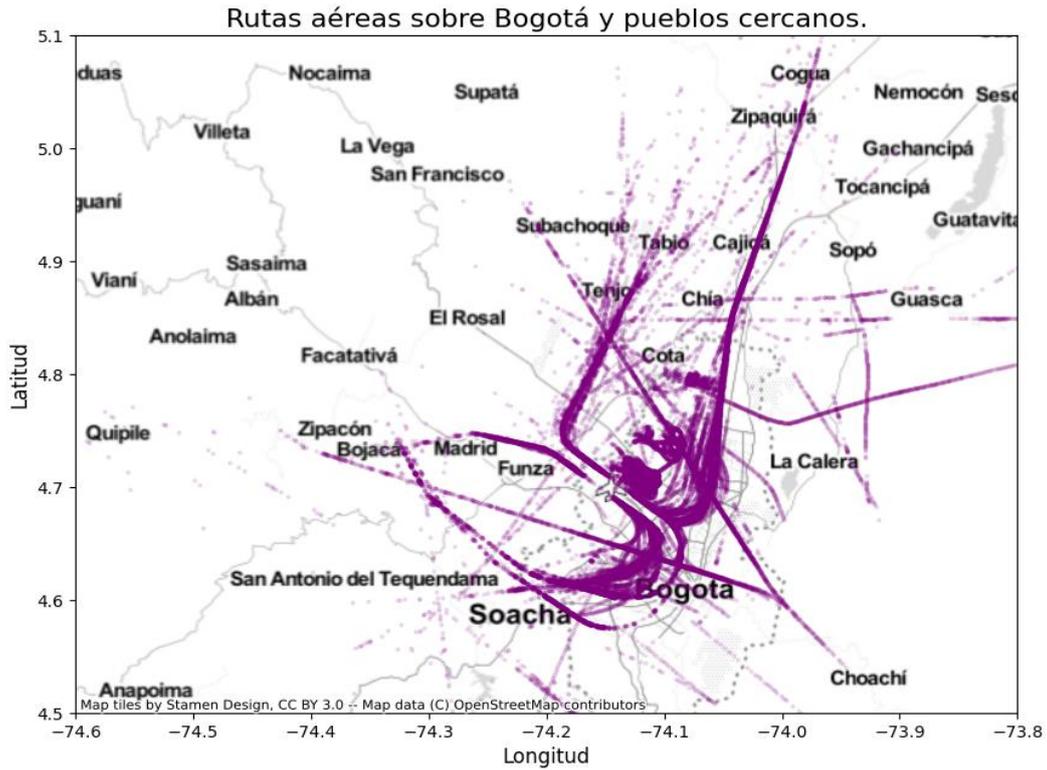


Figura 2. Rutas aéreas sobre Bogotá y pueblos cercanos [24].

Los mapas de calor o heatmaps, desempeñan un importante papel en este análisis, ya que muestra la ruta seguida por las aeronaves y resalta mediante colores los sitios más concurridos, teniendo un papel fundamental para la visualización y entendimiento del tráfico aéreo, con dichos mapas, se podría hacer un estudio para gestionar y si es el caso, reconfigurar el flujo de aeronaves por la ciudad, teniendo como principal objetivo, reducir el tráfico sobre las localidades de mayor vulnerabilidad.

En la Figura 3 y Figura 4 se resaltan las zonas con un mayor tráfico aéreo mediante un heatmap, donde los tonos rojo oscuro representan las zonas más críticas en cuanto al tráfico aéreo y la mayoría de ellas se puede encontrar en las zonas cercanas al Aeropuerto Internacional El Dorado, coincidiendo con los resultados mostrados por la Figura 1 y la Figura 2.

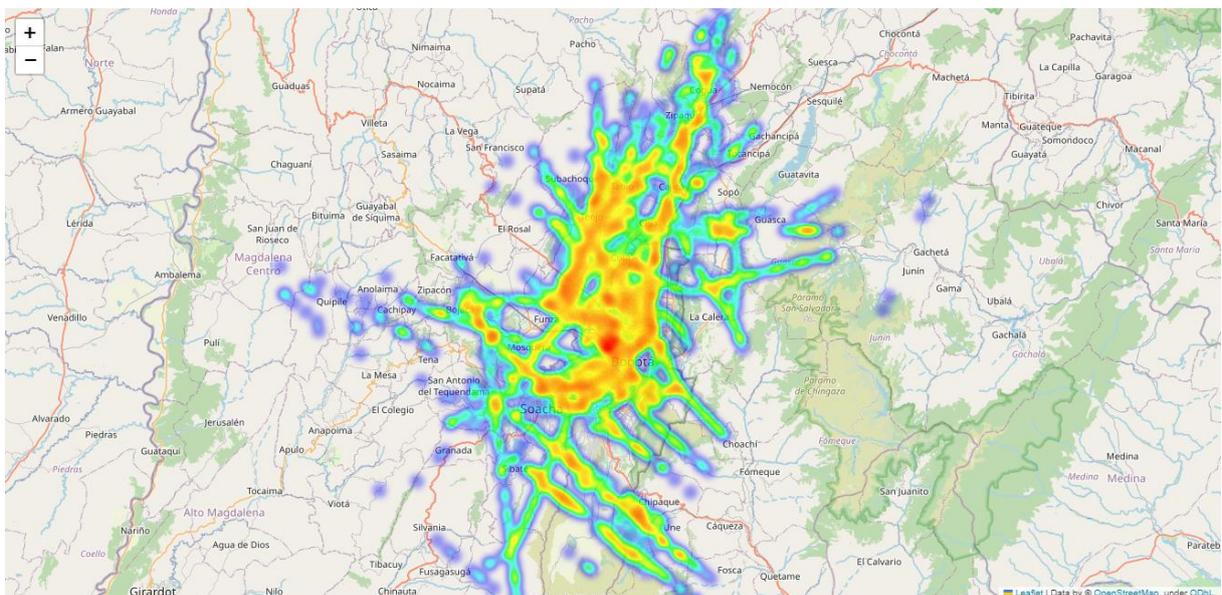


Figura 3. Heatmap de los vuelos en la ciudad de Bogotá y sus pueblos cercanos [25].

En cuanto a las zonas con tonalidades más claras, representan zonas con un tráfico aéreo moderado o bajo, sin embargo, con el esperado aumento de flota de las aerolíneas que operan el Aeropuerto Internacional El Dorado y las que se espera que empiecen su operación allí, se observará una progresiva intensificación del color en esas áreas, pasando a ser zonas con una mayor vulnerabilidad.

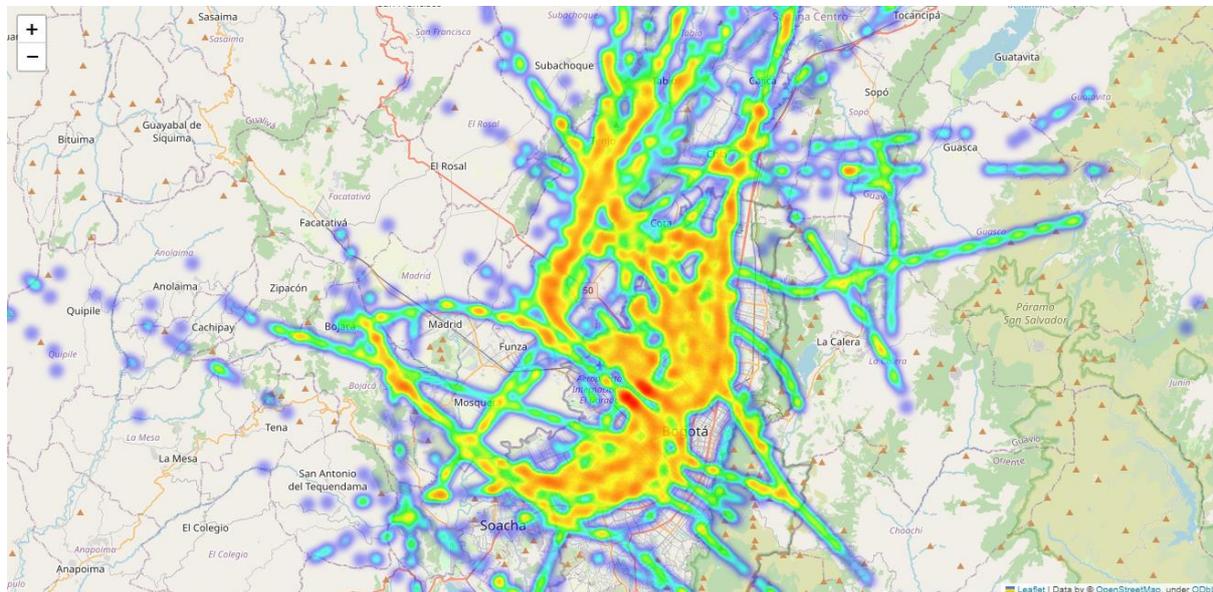


Figura 4. Heatmap de los vuelos en la ciudad de Bogotá [26].

A través del análisis de datos, se identificaron 35 modelos de aeronaves diferentes que sobrevuelan la ciudad de Bogotá, entre las cuales se encontraron aviones de uso comercial, privado, militar y de estado. De estos modelos, se destacaron 16 que representaron el 91% del total de aeronaves que transitaron sobre la ciudad, sumando un total de 260 aeronaves pertenecientes a estos modelos específicos, esto se puede observar en la Figura 5. En total, se pudo identificar un total de 283 aeronaves sobrevolando la ciudad de Bogotá, de las cuales, las aeronaves Airbus A320 representan el 36,04 % del tráfico aéreo, con un total de 102 aviones, seguidas de los Boeing 737 y 787 con un 22.7%.

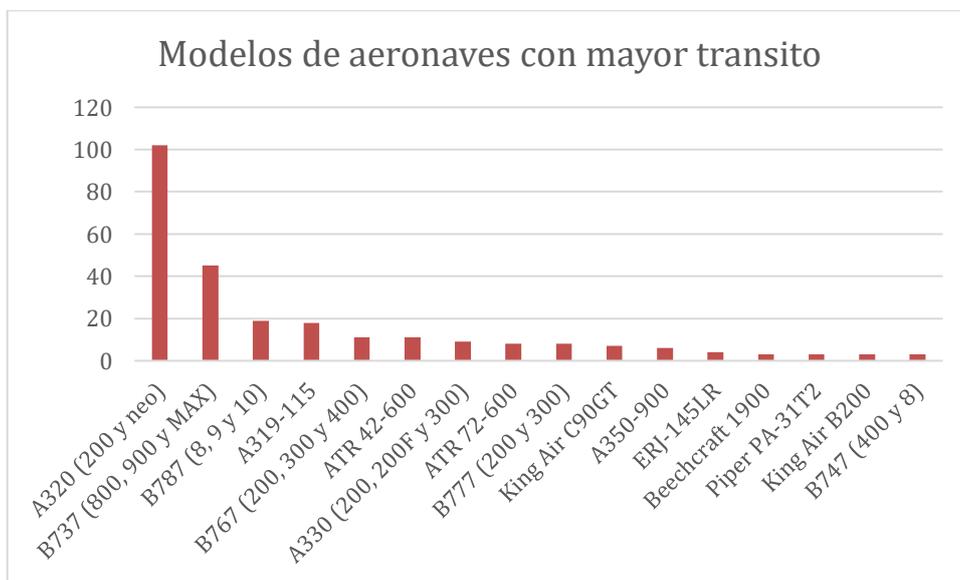


Figura 5. Modelos de aeronaves con mayor tránsito [27].

Durante el procesamiento de datos se observó que algunos aviones de uso privado y militar (como el Lockheed C-5 Galaxy y el Lockheed C-130 Hércules), no cuentan con información sobre sus características de emisiones auditivas, por lo tanto, estas aeronaves fueron omitidas para este estudio. En la Figura 6, se observa claramente que los aviones clasificados como aviones comerciales de gran envergadura, por ejemplo, el B747 y el A330, exhiben los niveles más elevados de ruido en las fases analizadas, superando claramente los 90 decibeles. Logrando identificar rangos de ruido que varían desde 68.3 hasta 100 decibeles durante las maniobras de vuelo lateral, de 68.3 a 98 decibeles en las fases de sobrevuelo y alcanzando un pico de 101.83 decibeles durante la aproximación. Se identificó que los aviones que generan menos ruido son los King Air E90, C90GT y el Piper PA-28, sin embargo, estos solo representan el 3% de la totalidad del tráfico aéreo que sobrevoló la ciudad de Bogotá.

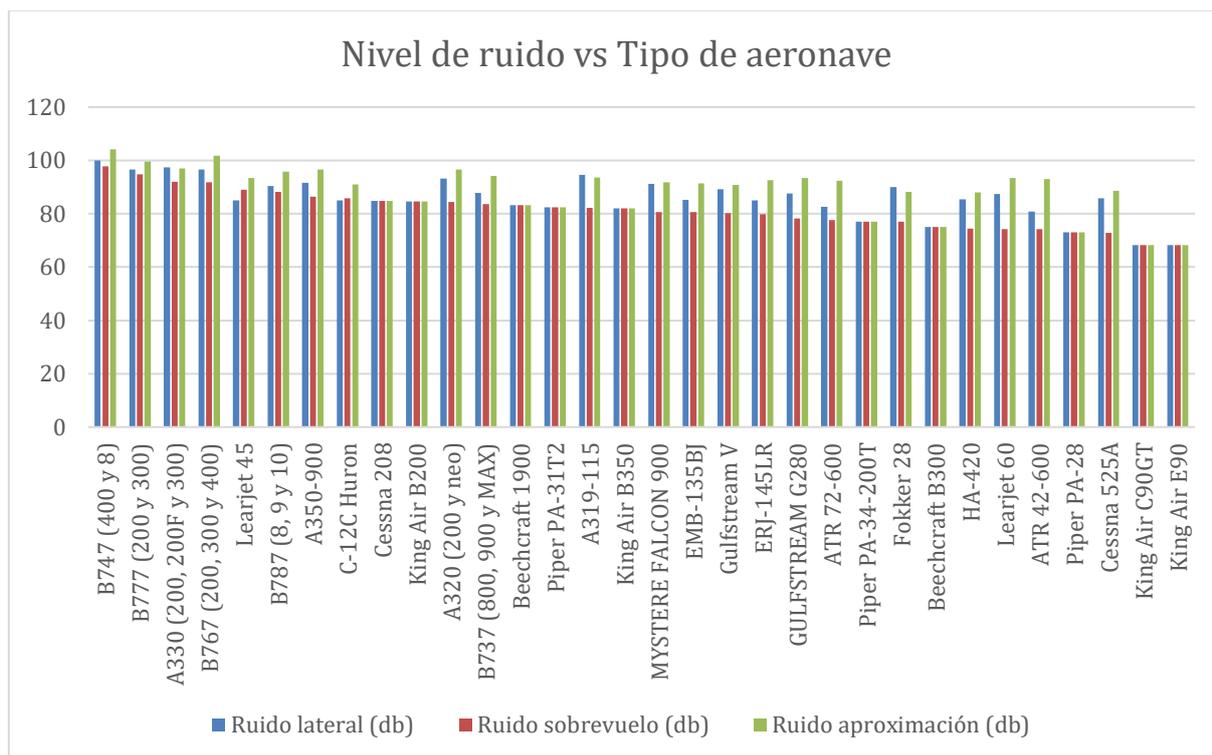


Figura 6. Nivel de ruido vs. Tipo de aeronave [28].

En las Figura 7, Figura 8 y Figura 9, se encuentra de manera grafica una estimación de la acumulación de ruido sobre la ciudad de Bogotá; sin embargo, para poder observar las localidades de afectación alta, media y baja; es necesario referirnos a la Figura 1, ya que los colores en este hitmap no permiten identificar de una manera clara las zonas; si utilizamos estas dos gráficas, es posible observar de mejor manera, aquellas zonas con una gran acumulación.

Como se puede observar en la Figura 7, gran parte de la zona norte de la ciudad presenta zonas en donde la estimación del ruido percibido supera los 81 dB, lo cual era esperado ya que gran parte de las salidas del Aeropuerto Internacional el Dorado se realizan por este sector de la ciudad, además, de que en esta zona también se encuentra ubicado el Aeropuerto de Guaymaral, afectando las localidades de Usaquén, Engativá y Suba.

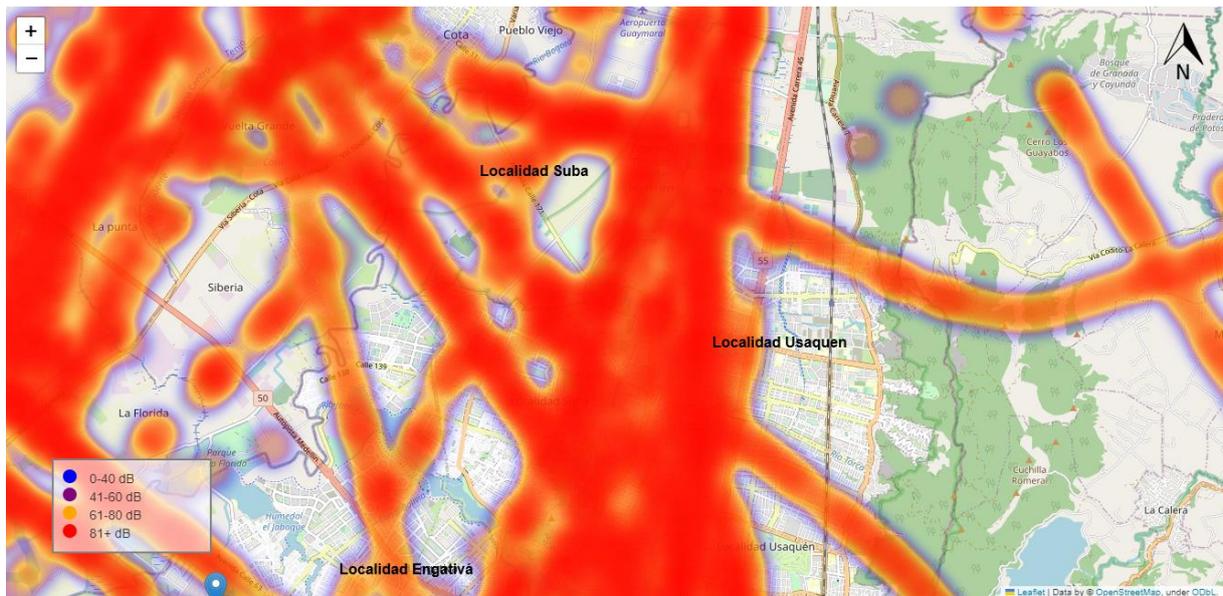


Figura 7. Heatmap de estimación del ruido al norte de Bogotá [29].

En la Figura 8, se observa en el marcador el Aeropuerto Internacional el Dorado y la acumulación de ruido en las zonas cercanas a este, las cuales comprenden las localidades de Engativá, Fontibón, Barrios Unidos y Teusaquillo.

La mayoría de estas con una tonalidad rojo intenso nos indica el alto potencial de ruido producido por aeronaves, coincidiendo con un estudio realizado por la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica civil realizado en el 2018 [30].

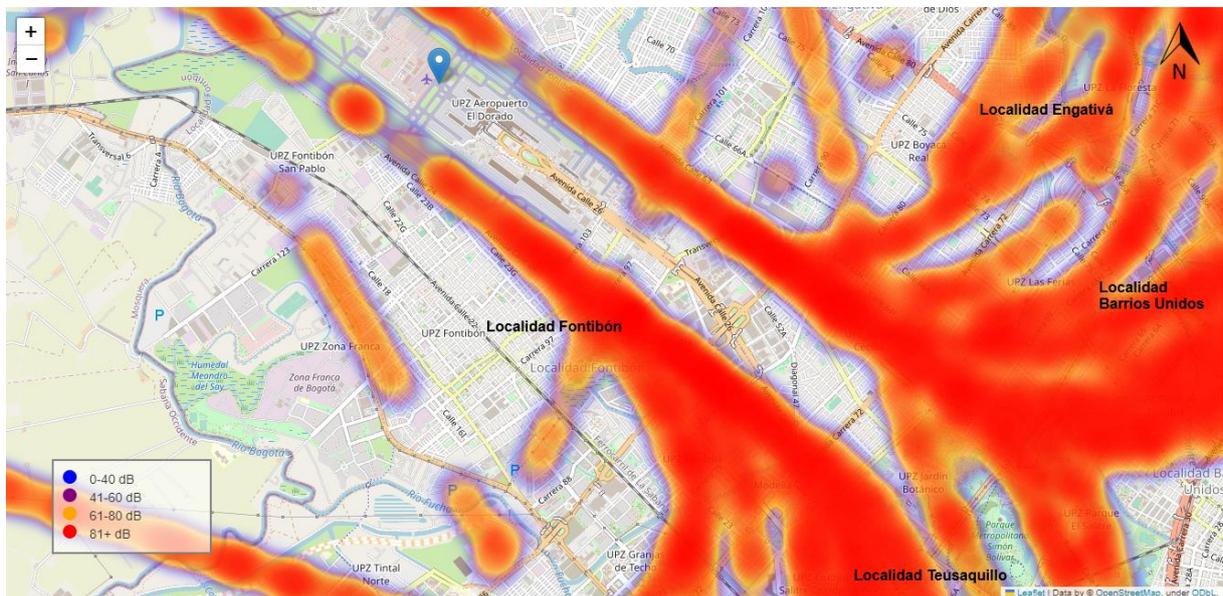


Figura 8. Heatmap de estimación del ruido en cercanías al aeropuerto [31].

En la Figura 9, se observa la zona de la ciudad al sur del aeropuerto, otro sector por el cual se realizan las salidas del aeropuerto y en ocasiones debido a condiciones climáticas, también las entradas. Lo que genera una gran afluencia de aeronaves trayendo consigo un gran potencial de acumulación de ruido, por lo que se puede observar que la mayoría de estas zonas se representan de color rojo. Estas localidades son: Fontibón, Puente Aranda, Kennedy y Bosa.

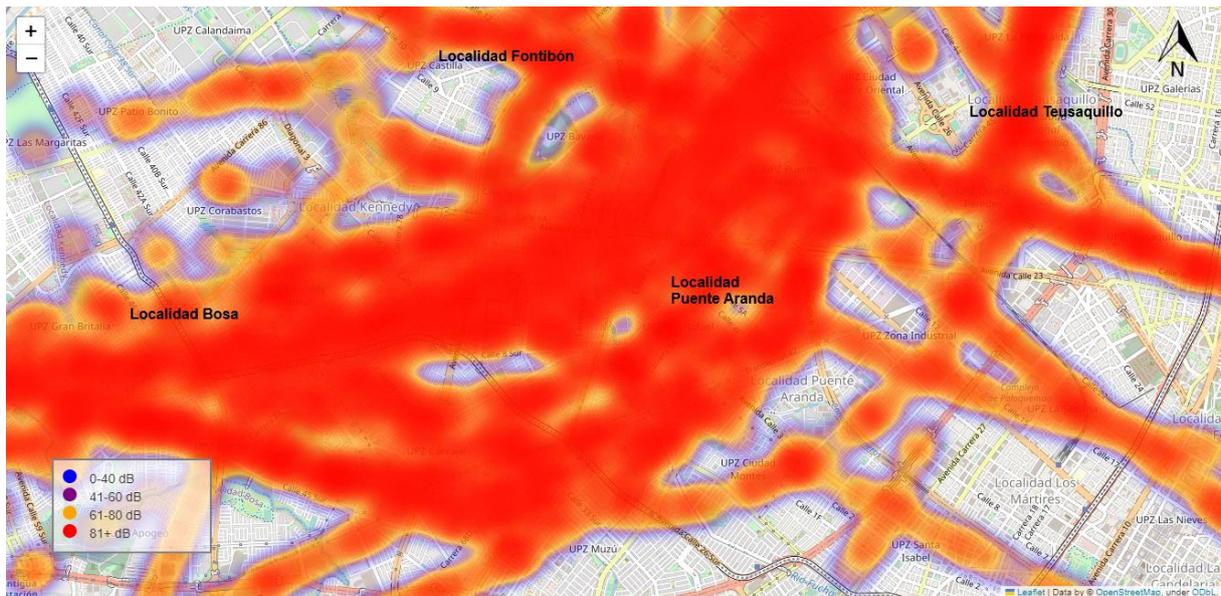


Figura 9. Heatmap de estimación del ruido al sur de Bogotá [32].

Este estudio no solo destaca la importancia de una buena gestión y planificación del tráfico aéreo sobre, desde y hacia el aeropuerto, sino que también se manifiesta la necesidad de una reglamentación efectiva para los desafíos que plantea la posible acumulación de ruido. Con un enfoque renovado y toma de decisiones responsables, es posible encontrar soluciones que minimicen las consecuencias negativas y mejoren la calidad de vida de la población. También, gracias los mapas generados, se observa la importancia de una correcta elección para la construcción de una terminal aérea y sus rutas, con una capacidad para anticipar y predecir los impactos que se puedan generar a futuro en la salud y en el entorno, aplicando estrategias innovadoras que promuevan un equilibrio sostenible entre el desarrollo de la aviación y el bienestar de la población.

CONCLUSIONES

El uso de heatmaps en esta investigación presentan de manera visual aquellos sectores, sobre el área metropolitana de Bogotá y sus alrededores, que presentan una gran acumulación de tráfico aéreo y una estimación de la acumulación de ruido, donde el color rojo muestra las zonas que cuentan con una mayor acumulación de tráfico y de posible ruido, sectores se verán ampliamente afectados con una posible ampliación del aeropuerto El Dorado y de su actividad aérea. Lo que puede ayudar a que se planteen el cambio de rutas aéreas para disminuir la congestión aérea dentro de la ciudad y el posible ruido que se genere.

Para este caso se estimaron cuáles serían las localidades que se ven mayormente afectadas por una potencial influencia sonora de aeronaves por medio de la proyección de rutas aéreas de diferentes aviones que operan en el aeropuerto El Dorado o que tiene una ruta sobre la ciudad, de las cuales las que se encuentran en alto riesgo son las localidades de Bosa, Kennedy, Fontibón, Engativá, Usaquén y Suba, y en municipios cercanos como Cota, Chía, Cajicá, Zipaquirá, Tenjo y Soacha. Mientras que en los sectores de Puente Aranda, Teusaquillo y Barrios Unidos se tiene un menor impacto. Esto se ve respaldado por los heatmap de estimación de acumulación de ruido que afirma que las zonas de mayor afectación son las cercanas al aeropuerto y/o a rutas aéreas, nombradas anteriormente.

Este tipo de análisis permite una detección temprana de zonas de alto potencial acumulativo de ruido, lo que ayuda a que las diferentes entidades gubernamentales por medio de herramientas económicas y de gran exactitud, puedan predecir y generar planes de contingencia, así como una buena planificación y gestión del tráfico aéreo, para los diferentes desafíos que presenta actualmente la industria de la aviación civil comercial en términos de contaminación auditiva. La facilidad con la que se pueden realizar este tipo de análisis e investigaciones, ayudan a la planificación de nuevas ciudades, ampliación de aeropuertos o creación de estos; así como en la detección temprana de personas que se vean afectadas

por una posible afectación del ruido de las aeronaves, ayudando a la detección temprana de enfermedades.

REFERENCIAS

- [1] J. Coykendall, P. Wellener, y K. Hardin, “2023 aerospace and defense industry outlook About the Deloitte survey”, 2022.
- [2] R. Flores, C. Asensio, P. Gagliardi, y G. Licitra, “Study of the correction factors for aircraft noise façade measurements”, *Applied Acoustics*, vol. 145, pp. 399–407, feb. 2019, doi: 10.1016/j.apacoust.2018.10.007.
- [3] L. Y. L. Ang y F. Cui, “Remote work: Aircraft noise implications, prediction, and management in the built environment”, *Applied Acoustics*, vol. 198, p. 108978, sep. 2022, doi: 10.1016/j.apacoust.2022.108978.
- [4] S. Urbano, E. Chaumette, P. Goupil, y J.-Y. Tournet, “Aircraft Vibration Detection and Diagnosis for Predictive Maintenance using a GLR Test”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, núm. 24, pp. 1030–1036, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.09.716.
- [5] T.-J. Chen, S.-S. Chen, P.-Y. Hsieh, y H.-C. Chiang, “Auditory Effects of Aircraft Noise on People Living Near an Airport”, *Archives of Environmental Health: An International Journal*, vol. 52, núm. 1, pp. 45–50, ene. 1997, doi: 10.1080/00039899709603799.
- [6] K. Norén-Cosgriff, I. Belyaev, y F. Løvholt, “Building vibration induced by sonic boom - field test in Russia”, *Applied Acoustics*, vol. 185, p. 108422, ene. 2022, doi: 10.1016/j.apacoust.2021.108422.
- [7] A.-M. Nassur *et al.*, “The impact of aircraft noise exposure on objective parameters of sleep quality: results of the DEBATS study in France”, *Sleep Med*, vol. 54, pp. 70–77, feb. 2019, doi: 10.1016/j.sleep.2018.10.013.
- [8] D. Caballol, Á. P. Raposo, F. Gil Carrillo, y M. Morales-Segura, “Measurement of ambient vibration in empty buildings and relation to external noise”, *Applied Acoustics*, vol. 186, ene. 2022, doi: 10.1016/j.apacoust.2021.108431.
- [9] ECAC y CEAC, *Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports*, 4a ed., vol. 1. France: EUROPEAN CIVIL AVIATION CONFERENCE, 2016.
- [10] D. D. Nguyen *et al.*, “Long-term aircraft noise exposure and risk of hypertension in postmenopausal women”, *Environ Res*, vol. 218, p. 115037, feb. 2023, doi: 10.1016/j.envres.2022.115037.
- [11] H. Xie, H. Li, y J. Kang, “The characteristics and control strategies of aircraft noise in China”, *Applied Acoustics*, vol. 84, pp. 47–57, oct. 2014, doi: 10.1016/j.apacoust.2014.01.011.
- [12] S. Airbus, “Global Market Forecast 2017-2036”, 2017.
- [13] Organización de Aviación Civil Internacional, “Protección del medio ambiente”.
- [14] OACI, “Doc 9911 Recommended Method for Computing Noise Contours Around Airports”, 2018.
- [15] Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, “Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil RAC 36 ESTÁNDARES DE RUIDO”, 2016.
- [16] P. Gagliardi, L. Teti, y G. Licitra, “A statistical evaluation on flight operational characteristics affecting aircraft noise during take-off”, *Applied Acoustics*, vol. 134, pp. 8–15, may 2018, doi: 10.1016/j.apacoust.2017.12.024.

- [17] M. Riahi Manesh y N. Kaabouch, “Analysis of vulnerabilities, attacks, countermeasures and overall risk of the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) system”, *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 19, pp. 16–31, dic. 2017, doi: 10.1016/j.ijcip.2017.10.002.
- [18] J. Vallalta, “CRISP-DM: una metodología para minería de datos en salud - healthdataminer.com”. Consultado: el 18 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://healthdataminer.com/data-mining/crisp-dm-una-metodologia-para-mineria-de-datos-en-salud/>
- [19] IBM, “Conceptos básicos de ayuda de CRISP-DM - Documentación de IBM”. Consultado: el 18 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.ibm.com/docs/es/spss-modeler/saas?topic=dm-crisp-help-overview>
- [20] Sngular, “CRISP-DM: La metodología para poner orden en los proyectos”, Sngular.
- [21] EASA, “ANP legacy data”, EASA.
- [22] opensky network, “aircraft-database-complete-2023”, opensky network.
- [23] A. Rosales, D. Traslaviña, y S. Madrid, “Rutas aéreas sobre Bogotá y sus localidades”, 2023.
- [24] A. Rosales, D. Traslaviña, y S. Madrid, “Rutas aéreas sobre Bogotá y pueblos cercanos.”, 2023.
- [25] A. Rosales, D. Traslaviña, y S. Madrid, “Heatmap de los vuelos en la ciudad de Bogotá y sus pueblos cercanos”, 2023.
- [26] A. Rosales, D. Traslaviña, y S. Madrid, “Heatmap de los vuelos en la ciudad de Bogotá”, 2023.
- [27] A. Rosales, D. Traslaviña, y Madrid. S, “Modelos de aeronaves con mayor tránsito”, 2023.
- [28] A. Rosales, D. Traslaviña, y S. Madrid, “Nivel de ruido vs. Tipo de aeronave”, 2023.
- [29] A. Rosales, D. Traslaviña, y F. Madrid, “Heatmap de estimación del ruido al norte de Bogotá.”, 2023.
- [30] Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, “MODELO DE PROPAGACIÓN DE RUIDO”, 2018.
- [31] A. Rosales, D. Traslaviña, y F. Madrid, “Heatmap de estimación del ruido en cercanías al aeropuerto.”, 2023.
- [32] A. Rosales, D. Traslaviña, y F. Madrid, “Heatmap de estimación del ruido al sur de Bogotá.”, 2023.