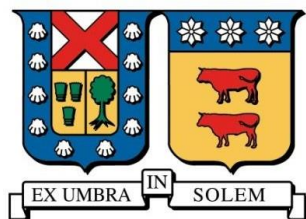


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE



**“Estimación y proyección de contaminantes
producidos por la industria aeronáutica comercial
nacional en vuelos nacionales e internacionales desde
los años 2020 al 2050”**

Tomás Damián Andrés Núñez Olave

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

Profesor Guía: Dr. Mauricio Osses
Profesor Co-referente: Dr. Rodrigo Cassinelli

Diciembre – 2024

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia, a mi madre Carolina, a mi padre Luis, a mi hermana Antonella, y a mi pareja y compañera de vida, Francisca. Su apoyo incondicional ha sido fundamental en este viaje.

También quiero agradecer al proyecto Fondecyt Regular 1241477, etapa 2024, por su valioso apoyo.

RESUMEN

El estudio proyecta las emisiones de la industria aeronáutica chilena hasta el año 2050, estimando las emisiones generados entre 2020 y 2024. Este análisis abarca CO₂, CO, HC, NO_x, SO_x, PM y H₂O, considerando los efectos de la pandemia en la actividad aérea y generando proyecciones para vuelos nacionales e internacionales. Se estiman aumentos en la cantidad de vuelos, con valores proyectados entre 515,355 y 508,010 vuelos nacionales y entre 262,413 y 124,658 internacionales para el 2050. Las emisiones de CO₂ en vuelos nacionales podrían alcanzar entre 6,648 y 6,536 kilotoneladas, mientras que en vuelos internacionales oscilarían entre 12,258 y 7,051 kilotoneladas.. En cuanto a las rutas aéreas, la ruta Antofagasta-Santiago es predominante en vuelos nacionales debido a la actividad minera, mientras que Santiago-Lima y Santiago-Sao Paulo dominan en vuelos internacionales, reflejando conexiones estratégicas con Perú y Brasil. A nivel de flota, las aeronaves A320 y A321 representan más del 80% de los vuelos nacionales, mientras que en vuelos internacionales el A320 sigue siendo preponderante, aunque con mayor diversidad de modelos, incluyendo B789 y B788.

El análisis de escenarios tecnológicos revela que el cambio a modelos Airbus NEO reduciría las emisiones de CO₂ en un 13,8% si el cambio es inmediato, o en un 2,22% si se realiza gradualmente entre 2026 y 2050 para el caso nacional. Sin embargo, en el ámbito internacional, la reducción es menos significativa debido a la variedad de aeronaves utilizadas. Además, una combinación de disminución en la frecuencia de vuelos junto con el cambio de tecnología podría reducir las emisiones hasta en un 21,75% en el caso nacional.

La validación del modelo mostró una coherencia con otros estudios, arrojando un margen de error del 5% en la estimación de emisiones de CO₂ para el 2020. Finalmente, el estudio plantea 10

escenarios de proyección, indicando que las mayores reducciones se logran al combinar mejoras tecnológicas y cambios en la demanda de vuelos.

ABSTRACT

This study aims to project the pollutant emissions from the Chilean aviation industry up to the year 2050, focusing on pollutants such as CO₂, CO, HC, NO_x, SO_x, PM, and H₂O. Initial estimates cover the period from 2020 to 2024, establishing trends in flight activity and pollutant levels. The projections consider the impact of the COVID-19 pandemic on aviation trends and present a range of forecasts for both domestic and international flights. By 2050, domestic flights are projected to reach between 515,355 and 508,010, while international flights may range between 262,413 and 124,658. Emissions of CO₂ for domestic flights could reach between 6,648 and 6,536 kilotons, while international emissions are projected between 12,258 and 7,051 kilotons,

The analysis also highlights key air routes, with SCFA-SCEL being the dominant domestic route, mainly due to mining activities, while SCEL-SPJC and SCEL-SBGR are the main international routes, reflecting strategic connections with Peru and Brazil. In terms of fleet composition, the A320 and A321 aircraft account for over 80% of domestic flights, while international routes exhibit greater diversity with significant shares of B789 and B788 models alongside the A320.

The study explores technological scenarios, showing that transitioning to Airbus NEO models could reduce CO₂ emissions by 13.8% with an immediate switch or 2.22% with a gradual change from 2026 to 2050. International emission reductions are less pronounced due to the diversity of aircraft types. Additionally, combining reduced flight demand with technological upgrades could achieve up to a 21.75% reduction in domestic emissions.

Model validation shows consistency with other studies, with a 5% error margin in CO₂ emission estimates for 2020. The study concludes with ten projection scenarios, suggesting that the most significant emission reductions result from a combination of technological advances and changes

in flight demand patterns.

Nomenclatura

- DGAC - Dirección General de Aeronáutica Civil
- ENAER - Empresa Nacional de Aeronáutica de Chile
- JAC - Junta de Aeronáutica Civil
- INAC - Instituto Nacional de Aeronáutica Civil
- OACI - Organización de Aviación Civil Internacional
- IATA - Asociación Internacional de Transporte Aéreo
- CORSIA - Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (Programa de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional de la OACI)
- SAF - Sustainable Aviation Fuel (Combustible de Aviación Sostenible)
- LTO - Landing and Take-Off (Aterrizaje y Despegue)
- CCD - Cruise-Climb-Descend (Crucero, Ascenso y Descenso)
- NO_x - Óxidos de Nitrógeno
- CO - Monóxido de Carbono
- CO₂ - Dióxido de Carbono
- HC - Hidrocarburos no quemados
- SO₂ - Dióxido de Azufre
- PM - Material Particulado
- ICAO - International Civil Aviation Organization (Organización de Aviación Civil Internacional)
- EEA - European Environment Agency (Agencia Europea de Medio Ambiente)
- GEI - Gases de Efecto Invernadero

- ADW - Aeródromo de Despegue y Aterrizaje
- NEO - New Engine Option (Opción de Nuevo Motor, una serie de modelos de Airbus)

Índice

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN.....	3
ABSTRACT	5
Nomenclatura	7
Índice de figuras	13
Índice de tablas.....	19
Introducción	23
Objetivos	26
1. Estado del Arte.....	27
1.1. Datos generales de la industria	27
1.1.1. Actividad aeronáutica en Chile	27
1.1.2. Organizaciones aeronáuticas en Chile.....	27
1.1.3. Organizaciones aeronáuticas internacionales	29
1.1.4. Principales aeronaves en Chile.....	30
1.1.5. Empresas nacionales de transporte publico.....	32
1.1.6. Empresas aéreas extranjeras de carga de transporte publico.....	33
1.1.7. Actividad aérea a nivel mundial	33
Paradigmas de antaño	35
Paradigmas actuales	36
Paradigmas futuros	36
1.1.8. Actividad aérea en Chile	37
Paradigmas de antaño en la industria aeronáutica chilena	38

Paradigmas actuales en la industria aeronáutica chilena	39
Paradigmas futuros en la industria aeronáutica chilena	40
1.2. Datos específicos relativos a la contaminación y actividades aeronáuticas	41
1.2.1. Tipos de motores	41
1.2.2. Tipos de combustibles	43
1.2.3. Etapas de consumo y generación de contaminantes	44
LTO (Landing and Take-Off)	45
CCD (Cruise-Climb-Descent)	46
1.2.4. Contaminantes	47
1.2.5. Contaminantes generados hasta la fecha	49
2. Metodología de estimación de contaminantes industria aeronáutica (Metodología EEA)	51
2.1. Estimación de contaminantes generados	51
2.1.1. Áreas de estimación	51
2.1.2. Estimación realizada en relación con la cantidad de combustible consumido	52
2.1.3. Estimación realizada separando entre LTO y CCD	53
2.1.4. Estimación realizada según trayectoria e información de origen y destino	54
2.1.5. Factor de emisión por aeronave	55
2.2. Obtención y manejo de datos industria chilena	56
2.2.1. Obtención de datos	56
Datos de vuelos realizados	56
Datos de aeronaves empleadas	56
Factores de emisión	57
2.2.2. Condiciones de trabajo de los datos	57
2.2.3. Manejo de datos	57
2.3. Preparación de datos para la estimación de emisiones	58

2.3.1.	Segregación de los datos	58
2.3.2.	Identificación ciudad y país.....	58
2.3.3.	Identificación latitud y longitud	59
2.3.4.	Identificación por aerolínea.....	60
2.3.5.	Identificación emisión característica por aeronave en LTO.....	61
2.3.6.	Identificación emisión característica por aeronave en CCD	63
2.4.	Comparación de datos obtenidos	65
2.5.	Estimación de contaminantes generados 2020-2024.....	68
2.5.1.	Calculo de emisiones contaminantes LTO	69
2.5.2.	Calculo de emisiones contaminantes CCD	70
2.6.	Proyección de emisiones y creación de escenarios.....	71
2.6.1.	Proyección de vuelos.....	71
2.6.2.	Variables de creación de escenarios	75
2.6.3.	Planilla de creación de escenarios	79
3.	Resultados y análisis.....	80
3.1.1.	Resultados estimaciones contaminantes LTO	80
3.1.2.	Resultados estimación contaminantes CCD.....	88
3.1.3.	Proyección de contaminantes LTO Nacional	95
3.2.	Análisis de rutas aéreas y aeronaves utilizadas	96
3.2.1.	Vuelos realizados 2020-2024	96
3.2.2.	Aviones utilizados 2020-2024.....	101
3.3.	Escenarios creados para maniobras LTO nacionales e internacionales.....	105
4.	Conclusiones y recomendaciones	121
	Conclusión general.....	121
	Conclusiones específicas.....	123

Referencias.....	126
Bibliografía	129
ANEXOS	134

Índice de figuras

Figura 1. Gráfico de número de vuelos a nivel mundial entre los años 2022 y 2024. Obtenido de flightradar24.....	24
Figura 2. Diagrama comparativo de gramos de CO2 por pasajero. Obtenido de la EEA	25
Figura 3. Cantidad de pasajeros transportados por año. Obtenido de Statista	34
Figura 4. Vuelos realizados en Chile. Elaboración propia a partir de datos obtenidos de la JAC..	38
Figura 5. Funcionamiento de motor turboprop.	42
Figura 6. Funcionamiento de motor turboshélice.....	43
Figura 7. Diagrama de ejemplificación de las fases de vuelo. Obtenido desde la SAE	47
Figura 8. Emisiones anuales de CO2 producto de la aviación. Obtenido de OurWorldInData.....	49
Figura 9. Emisión de CO2 eq producto de la aviación en Chile. Grafico generado por el INGEI 1990-2020	50
Figura 10. Plataforma de estimaciones de emisión de la EEA. Sección LTO. Obtenido desde la EEA.	61
Figura 11. Plataforma de estimaciones de emisión de la EEA. Sección CCD. Obtenido desde la EEA	

.....	63
Figura 12. Emisión de CO2 obtenidas 2010-2015, obtenido de “Estimación de los niveles de actividad y emisiones producidas por el transporte marítimo y aéreo en Chile al 2050” (Flores, 2023)	65
.....	65
Figura 13. Emisión de CO ₂ entre 2020 y 2024 (elaboración propia a partir de datos de la JAC (JAC, 2024))	66
.....	66
Figura 14. Emisión de CO2 eq producto de la aviación en Chile. Grafico generado por el INGEI 1990-2020	67
.....	67
Figura 15. Emisión de CO2 obtenidas 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos obtenidos por la JAC.	67
.....	67
Figura 16. Proyección de vuelos internacionales al 2050 con un 95% de confianza. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.	72
.....	72
Figura 17. Proyección de vuelos nacionales al 2050 con un 95% de confianza. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.	74
.....	74
Figura 18. Ciclo de vida de los SAF. Vuelo limpio.	78
.....	78
Figura 19. Dashboard para visualización de CO2 LTO generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC	81
.....	81
Figura 20. Dashboard para visualización de CO LTO generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC	82
.....	82
Figura 21. Dashboard para visualización de HC LTO generado entre los periodos 2020-2024.	

Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC	83
Figura 22. Dashboard para visualización de H2O LTO generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC	84
Figura 23. Dashboard para visualización de NOX LTO generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC	85
Figura 24- Dashboard para visualización de SOX LTO generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC	86
Figura 25. Dashboard para visualización de PM total LTO generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC	87
Figura 26. Dashboard para visualización de CO2 CCD nacional generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC	88
Figura 27. . Dashboard para visualización de CO CCD nacional generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC	89
Figura 28. . Dashboard para visualización de H2O CCD nacional generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC	90
Figura 29. . Dashboard para visualización de HC CCD nacional generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC	91
Figura 30. . Dashboard para visualización de PM total CCD nacional generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC	92
Figura 31. . Dashboard para visualización de NOX CCD nacional generado entre los periodos 2020-	

2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC	93
Figura 32. . Dashboard para visualización de SOX CCD nacional generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC	94
Figura 33. Proyección de emisiones de CO2 para vuelos nacionales en maniobra LTO. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.	95
Figura 34. Dashboard de análisis de vuelos nacionales. Elaboración propia a partir de datos de la JAC	97
Figura 35. Gráficos de torta de vuelos nacionales respecto a ciudades de origen y ciudades destino. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.	100
Figura 36. Gráficos de torta de vuelos internacionales respecto a ciudades de origen y ciudades destino. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.....	100
Figura 37. Dashboard de participación de aeronaves en vuelos nacionales. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.	101
Figura 38. Gráfico de torta de participación de aeronaves en vuelos nacionales. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.....	104
Figura 39. Gráfico de torta de participación de aeronaves en vuelos internacionales. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.	104
Figura 40. Grafico comparativo de escenario 1 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.	106
Figura 41. Grafico comparativo de escenario 2 vs proyección con datos iniciales. Elaboración	

propia.	108
Figura 42. Grafico comparativo de escenario 3 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.	109
Figura 43. Grafico comparativo de escenario 4 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.	111
Figura 44. Grafico comparativo de escenario 5 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.	112
Figura 45. Tabla comparativa escenario 5 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia	113
Figura 46. Grafico comparativo de escenario 6 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.	113
Figura 47. Grafico comparativo de escenario 7 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.	115
Figura 48. Grafico comparativo de escenario 8 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.	116
Figura 49. Grafico comparativo de escenario 9 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.	118
Figura 50. Grafico comparativo de escenario 10 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.	119
Figura 51. Proyección de emisiones de CO para vuelos nacionales en maniobra LTO. Elaboración	

propia a partir de datos proporcionados por la JAC. 157

Figura 52. Proyección de emisiones de H₂O para vuelos nacionales en maniobra LTO. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC. 157

Figura 53. Proyección de emisiones de HC para vuelos nacionales en maniobra LTO. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC. 158

Figura 54. Proyección de emisiones de PM total para vuelos nacionales en maniobra LTO. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC. 158

Figura 55. Proyección de emisiones de SOX para vuelos nacionales en maniobra LTO. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC. 159

Figura 56. Proyección de emisiones de NOX para vuelos nacionales en maniobra LTO. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC. 159

Índice de tablas

Tabla 1. Fases, duración promedio y consumo de combustible relativo de los vuelos. Elaboración propia.	45
Tabla 2. Relación de sigla ICAO con ciudades y países. Elaboración propia, extracto.	58
Tabla 3. Latitud y longitud de la ciudades. Elaboración propia, extracto.	59
Tabla 4. Relación de siglas JAC con Aerolíneas. Elaboración propia, extracto.	60
Tabla 5. Tabla de estimaciones de aeronaves LTO. Elaboración propia a partir de plataforma de la EEA.	62
Tabla 6. Extracto de emisiones por aeronave en CCD. Elaboración propia a través de plataforma EEA.	63
Tabla 7. Tabla de estimaciones de aeronaves CCD. Elaboración propia a partir de plataforma de la EEA.	64
Tabla 8. Tabla comparativa datos obtenidos e INGEI CO2 generado 2020. Obtenidos a partir del INGEI y elaboración propia.	68
Tabla 9. Tabla de trabajo de vuelos realizados año 2023. Elaboración propia a partir de datos entregados por la JAC.	68
Tabla 10. . Extracto de tabla de contaminantes estimados LTO para el año 2023 por vuelo realizado. Elaboración propia a traves de datos proporcionados por la ICAO y la JAC.	69

Tabla 11. Extracto de tabla de contaminantes estimados CCD para el año 2023 por vuelo realizado. Elaboración propia a través de datos proporcionados por la ICAO y la JAC.....	71
Tabla 12. Tabla de Previsión con límite superior e inferior de vuelos internacionales. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC	73
Tabla 13. Tabla de Previsión con límite superior e inferior de vuelos nacionales. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.....	74
Tabla 14. Tabla de participación de aeronaves entre los años 2020-2023 para vuelos nacionales. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.	76
Tabla 15. Tabla de participación de aeronaves entre los años 2020-2023 para vuelos internacionales. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC	77
Tabla 16. Extracto de tabla de proyección de vuelos nacionales generados por aeronave al 2050. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.	79
Tabla 17. Extracto de proyección de vuelos internacionales generados por aeronave al 2050. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC	80
Tabla 18. Tabla resumen de las emisiones generadas LTO. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC.....	88
Tabla 19. Tabla resumen de las emisiones generadas CCD nacional. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC	95
Tabla 20. Tabla de vuelos nacionales realizados. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.	98

Tabla 21. Tabla de vuelos internacionales realizados. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC	99
Tabla 22. Tabla de participación de aeronaves en vuelos nacionales. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.....	101
Tabla 23. Tabla de participación de aeronaves en vuelos internacionales. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC	103
Tabla 24. Tabla comparativa escenario 1 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.	107
Tabla 25. Aumento porcentual de aeronaves nacionales a partir de 2025 hasta 2050. Elaboración propia.	107
Tabla 26. Tabla comparativa escenario 2 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia	108
Tabla 27. Tabla comparativa escenario 3 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia	110
Tabla 28. Aumento porcentual de aeronaves internacionales a partir de 2025 hasta 2050. Elaboración propia.	110
Tabla 29. Tabla comparativa escenario 4 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia	111
Tabla 30. Tabla comparativa escenario 6 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia	114
Tabla 31. Tabla comparativa escenario 7 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia	21

.....	115
Tabla 32. Tabla comparativa escenario 8 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia	117
Tabla 33. Tabla comparativa escenario 9 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia	118
Tabla 34. Tabla comparativa escenario 10 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia	120
Tabla 35. Tabla resumen emisiones generadas 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos JAC y OACI.....	124

Introducción

Actualmente, se observan importantes cambios climáticos globales que afectan el desarrollo de la sociedad y la calidad de vida de las personas. Esto se evidencia claramente con fenómenos como las graves sequías en el norte de Chile, las intensas nevadas en Estados Unidos y las devastadoras inundaciones en el sudeste asiático. Además de estos cambios climáticos, se ha registrado un preocupante aumento en la incidencia de enfermedades cardio-respiratorias y en la tasa de mortalidad asociada a ellas.

No es sorprendente que estos cambios estén relacionados, en parte, con actividades de origen humano, como la contaminación industrial, el transporte y la producción. La memoria pretende abordar específicamente la contaminación del transporte aéreo en Chile.

Por lo tanto, el propósito de este trabajo es estimar la cantidad de contaminantes producidos por el sector aeronáutico comercial en Chile durante los años 2020 y 2024, considerando diversos factores y objetivos. Asimismo, se proyectará esta estimación desde el año 2024 hasta el 2050, teniendo en cuenta posibles variables que puedan influir en la generación de contaminantes, como el aumento en el número de vuelos realizados y avances tecnológicos.

Este enfoque en la industria aeronáutica se ve reforzado por el aumento de viajes realizados cada año, se trata de comparar vuelos los últimos dos años.

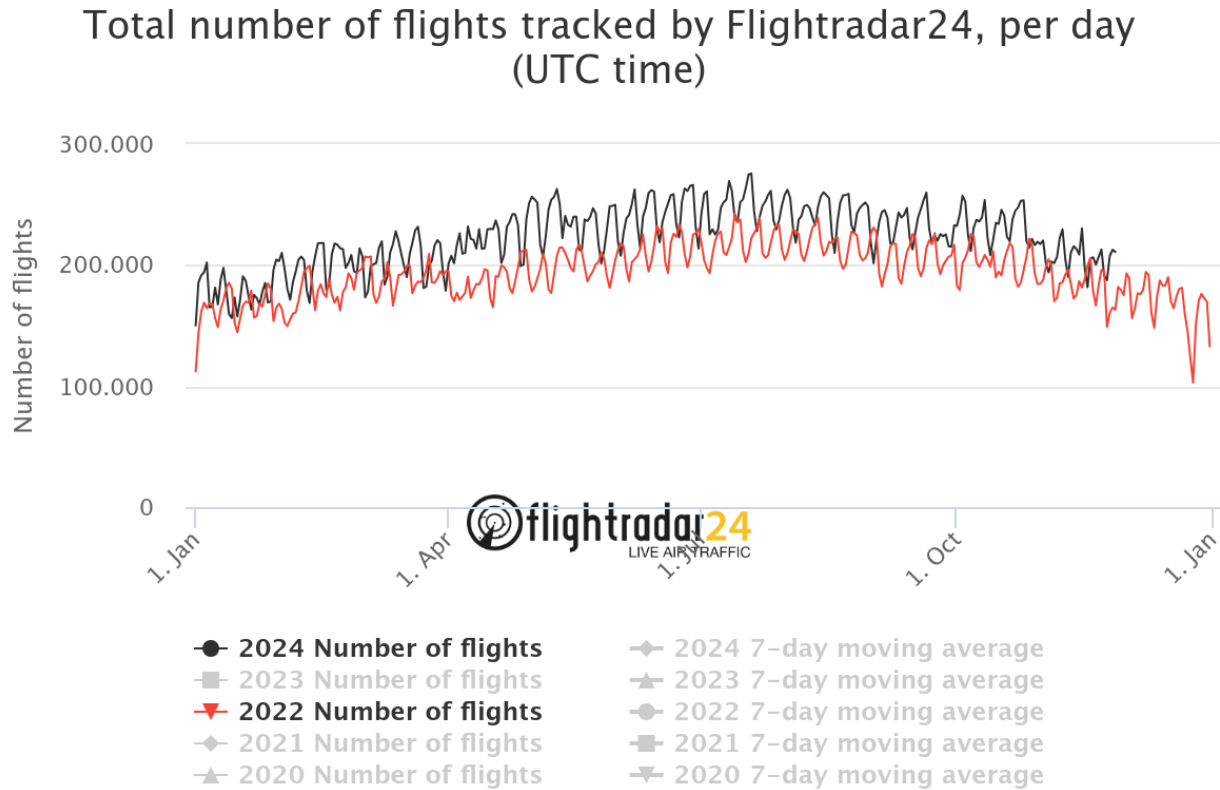


Figura 1. Gráfico de número de vuelos a nivel mundial entre los años 2022 y 2024. Obtenido de flightradar24

En la figura 1, podemos apreciar una clara estacionalidad en los vuelos, sin embargo, también se evidencia un aumento sostenido de los vuelos realizados el año 2024 con respecto al 2022, es decir, a simple vista se logran apreciar aumentos sostenidos en la actividad aeronáutica comercial.

Además, es interesante dar cuenta que si bien los aviones no contaminan en porcentaje tanto como lo hace la industria automotriz, si lo hace cuando los comparamos de acuerdo a gramos de CO_2 por kilómetro, lo cual se puede ver en la siguiente figura.

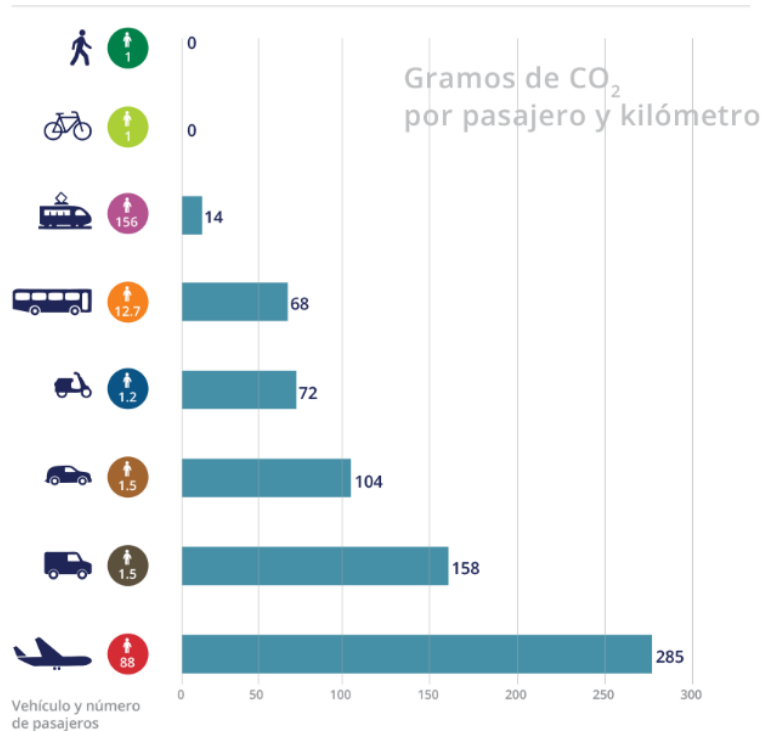


Figura 2. Diagrama comparativo de gramos de CO₂ por pasajero. Obtenido de la EEA

Esta contaminación por pasajero se puede evidenciar en la figura 2, en que se generó un diagrama por la EEA, donde se presenta que por pasajero en un vuelo se generan en promedio 285 gramos de CO₂ por pasajero y kilómetro en comparación con los 68 de un autobús o los 14 de un tren (EEA, 2013).

Por otro lado, se pretende generar escenarios futuros respecto a la aeronáutica en Chile, para esto se tomará factores demográficos, tecnológicos y legislativos, entre otros, con el fin de abarcar las situaciones más representativas y que permiten prever las emisiones futuras.

Objetivos

Objetivo General:

El objetivo general de este trabajo es estimar la emisión de contaminantes de la industria aeronáutica comercial nacional para el periodo 2020-2050

Este trabajo de memoria forma parte del proyecto FONDECYT regular 2024 N°1241477

Titulado: “high spatial and temporary resolution model for estimation of local and global emissions generated by the transportation sector in chile, 2015-2050”

Objetivos específicos:

Para cumplir el objetivo general presentado, se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. Analizar rutas aéreas y aeronaves comerciales en operación en Chile entre los años 2020-2024
2. Estimar emisiones generadas por la actividad aeronáutica comercial chilena para el periodo 2020-2024
3. Proyectar actividad y emisiones producidas por la actividad aeronáutica comercial chilena entre los años 2024-2050
4. Generar escenarios futuros de mitigación de gases de efecto invernadero en la industria aeronáutica chilena al año 2050

1. Estado del Arte

1.1. Datos generales de la industria

Para poder entender el contexto de trabajo, es necesario definir ciertos conceptos presentes en la industria aeronáutica, así como los principales actores, los recursos que utilizan, los vehículos principales y como han fluctuado las actividades en este ámbito. A continuación, se definirá brevemente los puntos más importantes.

1.1.1. Actividad aeronáutica en Chile

El transporte aéreo en Chile se divide en dos categorías principales. Por un lado, está el transporte aéreo de pasajeros, que comprende tanto el tráfico de pasajeros a nivel nacional como internacional. Por otro lado, se encuentra el transporte de carga, que incluye el movimiento de carga aérea tanto dentro del país como en el ámbito internacional. Cabe señalar que hay un subgrupo que abarca actividades recreativas o deportivas; pero, por la dificultad para recopilar información y datos sobre emisiones en este ámbito, estas actividades quedan fuera de su alcance.

En síntesis, este informe se centrará en analizar y estudiar en detalle los grupos que generan la mayor cantidad de tráfico aéreo y, por ende, la mayor contaminación. Esto implica el tráfico de pasajeros a nivel nacional e internacional en el caso del transporte de pasajeros, y el transporte de carga aérea a nivel nacional e internacional.

1.1.2. Organizaciones aeronáuticas en Chile

En Chile, varias entidades aeronáuticas se encargan de garantizar el adecuado desarrollo de las operaciones y la recopilación de información relacionada. Entre las más destacadas se encuentran ENAER (Empresa Nacional de Aeronáutica de Chile), DGAC (Dirección

General de Aeronáutica Civil) y JAC (Junta de Aeronáutica Civil), entre otras.

- Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC): Organismo estatal responsable de la regulación y supervisión de la aviación civil en Chile. Su misión es velar por la seguridad y eficiencia del transporte aéreo, así como fomentar el desarrollo sostenible de la aviación en el país. Entre sus funciones se incluyen la emisión de licencias para pilotos, la certificación de aeródromos, la supervisión de operaciones aéreas y el establecimiento de normativas para la industria. (DGAC, s.f.).
- Empresa Nacional de Aeronáutica de Chile (ENAER): Es una empresa estatal chilena dedicada al diseño, fabricación, mantenimiento y modernización de aeronaves. Su misión principal es contribuir al desarrollo y sostenibilidad de la industria aeronáutica nacional, proporcionando servicios y productos de alta calidad para la aviación militar y civil. Entre sus actividades destacan la construcción de aviones, el mantenimiento de flotas aéreas, la modernización tecnológica de sistemas aeronáuticos y la transferencia de tecnología al sector aeronáutico chileno. (ENAER., s.f.).
- Junta de aeronáutica civil (JAC): es el organismo gubernamental encargado de la regulación, planificación y desarrollo del transporte aéreo comercial en Chile. Su misión principal es promover la conectividad aérea, garantizando la seguridad, eficiencia y sostenibilidad del sector. (JAC, s.f.).

Actualmente, no todas las entidades están pendientes de las mediciones y/o estimaciones de las emisiones en el área. Esto resulta lógico al tratarse de instituciones que velan por diferentes intereses, no simplemente los contaminantes. De estas, la institución que está realizando trabajos con el fin de cuantificar estos contaminantes, es la DGAC, la cual está

cuantificando la huella de carbono por aeropuerto, así como también estableciendo medidas de mitigación, como lo es la instalación de paneles fotovoltaicos en el aeródromo de atacama.

1.1.3. Organizaciones aeronáuticas internacionales

Mientras que las principales organizaciones aeronáuticas internacionales son:

- Organización de Aviación Civil Internacional (OACI): La OACI es una agencia especializada de las Naciones Unidas que establece normas y regulaciones internacionales para la aviación civil. Su objetivo principal es promover la seguridad, la eficiencia y la regularidad del transporte aéreo internacional. (OACI, s.f.)
- Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA): Organización global que representa a las aerolíneas comerciales. La IATA se dedica a desarrollar estándares y ofrecer servicios de consultoría, capacitación y representación para la industria aérea. (IATA, s.f.)

De igual manera, las organizaciones internacionales también presentan planes de trabajo

en relación con la estimación y/o cálculo de contaminantes generados, además de agregar medidas de estimación recomendadas a sus miembros, las organizaciones contribuyen de la siguiente manera:

- OACI: Establece estándares ambientales en el acuerdo de carbono de la OACI (CORSIA); genera protocolos de medición y reportes de emisiones para que cada aerolínea y aeropuerto mida, reporte y verifique sus emisiones; Promueve la adopción de tecnologías limpias con el fin de lograr una reducción de emisiones. (OACI, n.d.)
- IATA: En tanto la IATA, también genera programas de reducción de emisiones como lo es el IATA CARBON OFFSET PROGRAMME y el IATA ENVIROMENTAL

ASSESSMENT(IEnva); Desarrollo de estándares y mejores prácticas en la aviación; Fomento del uso de combustible sostenible. (IATA, n.d.)

1.1.4. Principales aeronaves en Chile

En Chile se encuentran muchas aeronaves en el tráfico aéreo, tanto de personas como de carga, pero en este punto se tomarán a las aeronaves más características y se dará una breve descripción de ellas.

- Airbus A319: Avión de pasajeros de corto a medio alcance fabricado por Airbus. Pertenecce a la familia A320 y tiene capacidad para entre 124 y 156 pasajeros en configuraciones típicas de dos clases. Destaca por su eficiencia de combustible y diseño aerodinámico avanzado.
- Airbus A320: Similar al A319, el Airbus A320 es un avión de pasajeros de corto a medio alcance y es el modelo base de la familia A320. Puede transportar entre 140 y 240 pasajeros, dependiendo de la configuración de cabina y la variante.
- Airbus A321: Avión de pasajeros de pasillo único y de mayor alcance dentro de la familia A320, fabricado por Airbus. Es el modelo más grande de su familia y tiene capacidad para entre 185 y 240 pasajeros, ideal para vuelos de mayor distancia dentro de su alcance.
- Boeing 737: Serie de aviones de pasajeros de corto y medio alcance fabricados por Boeing. Es uno de los modelos comerciales más vendidos en la historia de la aviación, utilizado ampliamente en todo el mundo con diversas variantes que ofrecen capacidades y alcances ligeramente distintos.
- Boeing 777-200: Avión de pasajeros de largo alcance y bimotor, fabricado por Boeing. Forma parte de la familia Boeing 777, reconocida por su gran alcance y eficiencia operativa. Este modelo puede transportar entre 305 y 440 pasajeros, según la configuración de cabina y variante.

- **Boeing 747:** Avión de pasajeros de gran tamaño fabricado por Boeing, conocido mundialmente como el "Jumbo Jet" debido a su diseño de doble cubierta. Puede acomodar entre 366 y 524 pasajeros, dependiendo de la configuración de cabina y variante, y ha sido utilizado tanto en vuelos comerciales como en aplicaciones de carga a lo largo de los años.

Luego de haber revisado cada una de las principales aeronaves que surcan los cielos del territorio nacional, se procederá a realizar una revisión de que aeronaves tiene cada una de las flotas de aerolíneas nacionales:

- **Latam airlines group:** Esta aerolínea al ser una gran empresa y tener gran representación en diversas locaciones de Latinoamérica, presenta una de las mayores flotas, entre lo que se puede encontrar:
 - **Airbus A319-100:** 40 aviones para rutas cortas.
 - **Airbus A320-200 y A320neo:** 135 aviones en total, utilizados en rutas regionales y nacionales.
 - **Airbus A321 y A321neo:** 49 aviones, para rutas de mayor capacidad.
 - **Boeing 787-8 y 787-9 Dreamliner:** Utilizados en vuelos internacionales de largo alcance.
 - **Boeing 767-300 y 777-300ER:** Principalmente en vuelos internacionales de largo recorrido

Como se aprecia, tiene una gran diversidad de aeronaves que cumplen diferentes propósitos, pero es importante la adquisición de la línea NEO de Airbus, que representa un avance en cuanto a sostenibilidad y cuidado del medio ambiente. Cabe destacar que las siglas NEO es por sus siglas en ingles New Engine Option, lo que se traduce en una nueva forma de llevar a cabo el proceso de combustión para así

lograr todos los pros que dan por resultado una mayor sostenibilidad y ahorros (Latam Airlines Group, n.d.).

- **JetSmart:** Es la segunda compañía aérea en cuanto a flota, presentando las siguientes aeronaves:
 - **Airbus A320neo:** 25 aviones.
 - **Airbus A321neo:** 8 aviones.

JetSmart es una empresa bastante joven, por lo cual todas sus aeronaves presentan un bajo desgaste, así como también es importante dar cuenta que los dos tipos de aeronave son del tipo Neo, el cual representa un avance en la reducción de emisiones y costos (JetSmart Airlines, n.d.).

- **Sky airlines:** Sky airlines es la tercera aerolínea en Chile, la cual tiene una flota más reducida y con solo un tipo de aeronave
 - **Airbus A320Neo:** 19 aviones

Como se puede apreciar, la aerolínea solo presenta un tipo de aeronave, sin embargo, esta es del tipo Neo, lo cual representa una preocupación en la sostenibilidad como en el cambio de paradigma en preferir solo un tipo de aeronave. Es importante dar cuenta que esta aerolínea solo presenta actividad en América, siendo Miami el punto más lejano al que llega. (Sky Airline, n.d.).

1.1.5. Empresas nacionales de transporte publico

A continuación, se presentan las empresas nacionales de transporte publico aeronáutico que presentan actividad en Chile:

- JETSMART AIRLINES SpA
- LATAM AIRLINES GROUP S.A.

- SKY AIRLINE S.A.
- AeroDesierto

1.1.6. Empresas aéreas extranjeras de carga de transporte publico

Se presentan algunas de las aerolíneas internacionales que presentan actividad dentro del territorio nacional:

- ABSA - AEROLINHAS BRASILEIRAS S.A. (BRASIL)
- AEROTRANSPORTES MAS DE CARGA S.A. DE C.V. "MAS AIR" (MEXICO)
- AIR EXPRESS S.A. (URUGUAY)
- ATLAS AIR INC (USA)
- CARGOLUX AIRLINEA INTERNATIONAL S.A. (LUXEMBURGO)
- DHL AERO EXPRESO S.A. (PANAMA)
- ETHIOPIAN AIRLINES GROUP (ETHIOPIA)
- KALITTA AIR (USA)
- KOREAN AIR LINES CO (KOREA)
- LÍNEA AÉREA CARGUERA DE COLOMBIA S.A. "LANCO" (COLOMBIA)
- LUFTHANSA CARGO AG (ALEMANIA)
- MARTINAIR HOLLAND N.V. (HOLANDA)
- QATAR AIRWAYS CARGO (QATAR)
- SKY LEASE CARGO INC (USA)
- TAMPA CARGO S.A. (USA)

1.1.7. Actividad aérea a nivel mundial

La actividad aérea a nivel mundial, la cual se puede mostrar en la figura 3, ha mostrado un

aumento constante desde 2005, pasando de casi 1.994 millones de pasajero anuales a poco más de 4.543 millones para el año 2019. Aunque han ocurrido pequeñas caídas, como la ocasionada por el atentado del 9/11, estas no han afectado significativamente el crecimiento de la cantidad de vuelos ni pasajeros. Sin embargo, en 2019 se produjo una caída drástica, descendiendo de los 4.543 millones a poco más de 1.757 millones en 2020, debido al impacto del COVID-19. A pesar de esto, el crecimiento se comenzó a reanudar lentamente, alcanzando los 2.291 millones en 2021, para luego normalizar su tendencia en 2024 con 4.964 millones de pasajeros. Esto sugiere que las tenencias irán en aumento, en el caso de que no ocurran hechos fortuitos. (Statista, 2024)

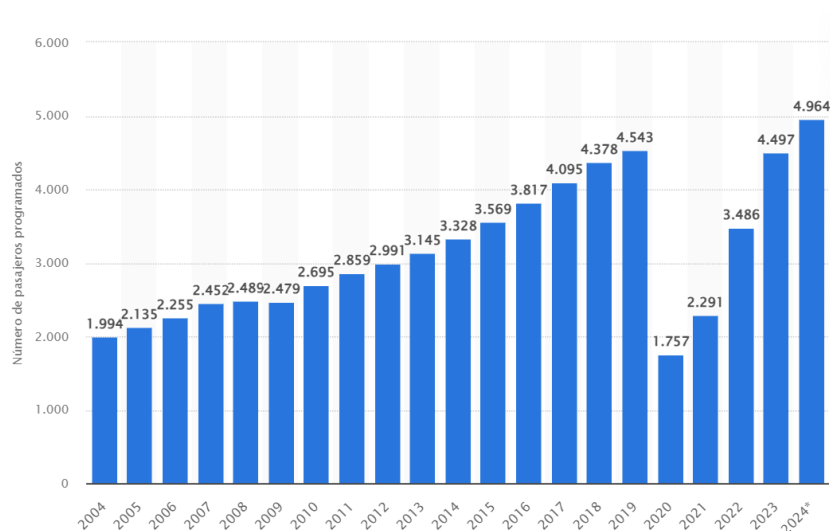


Figura 3. Cantidad de pasajeros transportados por año. Obtenido de Statista

Además de entender las estadísticas generadas y los números que se entregan año tras año, es imperativo entender que la aviación ha tenido un constante cambio en sus paradigmas, los cuales se analizan a continuación.

Paradigmas de antaño

A lo largo de las décadas, la aviación mundial ha evolucionado significativamente, impulsada por avances tecnológicos, económicos y sociales. Durante las décadas de 1950 y 1960, con la introducción de aviones a reacción como el Boeing 707 y el Douglas DC-8, comenzó la "Jet Age". Este período permitió la expansión global del transporte aéreo, reduciendo tiempos de vuelo y aumentando la capacidad de pasajeros. (Miller, 1991)

En la década de 1970, el Boeing 747, conocido como "Jumbo Jet", revolucionó la industria al aumentar la capacidad y reducir los costos, democratizando el acceso a los viajes aéreos. También surgió la aviación supersónica con el Concorde, aunque factores como el ruido y los altos costos operativos limitaron su adopción, concluyendo con el fin de los vuelos comerciales supersónicos en 2003 (Birtles, 1999)

En las décadas de 1990 y 2000, las aerolíneas de bajo costo, como Southwest y Ryanair, cambiaron el modelo de negocio al centrarse en la eficiencia y servicios básicos, permitiendo tarifas más accesibles y expandiendo el mercado de viajeros aéreos.

Posteriormente, los atentados del 11 de septiembre de 2001 llevaron a estrictas medidas de seguridad en aeropuertos y aviones. La década de 2010 trajo un enfoque en la eficiencia y sostenibilidad, con materiales ligeros como la fibra de carbono y mejoras en motores, especialmente en modelos como el Boeing 787 y Airbus A350, para reducir costos y emisiones de carbono (Birtles, 1999; IATA, n.d.).

Paradigmas actuales

Hoy en día, la aviación enfrenta desafíos en sostenibilidad y adopción de nuevas tecnologías.

Entre los principales paradigmas destacan:

Eficiencia y sostenibilidad: Las aerolíneas buscan reducir su huella de carbono mediante la inversión en aviones más eficientes y el desarrollo de combustibles sostenibles como el SAF (IATA, n.d.).

Avances en tecnología de aeronaves: La incorporación de materiales ligeros y diseños aerodinámicos mejorados ayuda a reducir el consumo de combustible y a optimizar el rendimiento (Airbus, n.d.).

Digitalización y automatización: La tecnología de vuelo automatizado es cada vez más común, transformando la experiencia de los pasajeros y mejorando la eficiencia operativa de las aerolíneas (ICAO, n.d.).

Consolidación de aerolíneas: Las aerolíneas buscan fusiones y adquisiciones para ganar competitividad y reducir costos en un mercado desafiante (Doganis, 2006).

Paradigmas futuros

El futuro de la aviación promete transformaciones disruptivas en términos de sostenibilidad, tecnología y experiencia del pasajero.

Electrificación de aviones: La electrificación es clave para reducir emisiones, con aeronaves eléctricas en desarrollo para vuelos regionales y opciones híbridas como paso de transición.

Movilidad aérea urbana (UAM): Taxis aéreos eléctricos y aeronaves eVTOL están emergiendo como soluciones para el transporte en áreas urbanas, liderados por empresas como Joby Aviation y Volocopter.

Hidrógeno como combustible: A largo plazo, el hidrógeno es una opción prometedora para

vuelos de larga distancia; Airbus trabaja en proyectos de aviones impulsados por hidrógeno para el futuro.

Vuelos supersónicos e hipersónicos: Nuevas empresas como Boom Supersonic buscan revivir los vuelos supersónicos con tecnología más sostenible, mientras que la aviación hipersónica se perfila como la próxima gran innovación.

Impacto de la inteligencia artificial (IA): La IA optimizará operaciones como la planificación de rutas y el mantenimiento predictivo, con sistemas autónomos que eventualmente podrían asumir tareas de los pilotos.

1.1.8. Actividad aérea en Chile

El análisis de la actividad aérea en Chile muestra un patrón interesante en la última década. A inicios de los años 2010, la actividad se mantenía estable, probablemente influenciada por diversos factores económicos y sociales. Sin embargo, a partir de 2016, comenzó un crecimiento constante y notable que se extendió hasta 2019.

El 2020 marcó un punto de quiebre debido a la pandemia mundial, que impactó profundamente a la industria de la aviación global, incluyendo a Chile. Las restricciones de viaje y las preocupaciones sanitarias causaron una drástica disminución en el número de vuelos. A pesar de este retroceso, desde 2021 se ha evidenciado una recuperación progresiva de la actividad aérea en Chile, lo cual sugiere una recuperación gradual del sector conforme se controlaba la situación sanitaria y se implementaban medidas para reactivar la economía y el turismo.

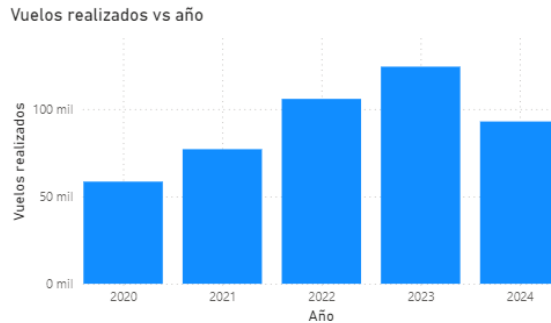


Figura 4. Vuelos realizados en Chile. Elaboración propia a partir de datos obtenidos de la JAC

De acuerdo con la figura 4, en Chile se logra apreciar también una rápida recuperación en los vuelos nacionales, ya que se pasó de 58.457 vuelos en 2020 producto de la pandemia 124.254 vuelos realizados en 2023. Lo cual demuestra la rápida recuperación de este rubro, así como también una reafirmación de las tendencias mundiales. (JAC, 2024)

Cabe destacar que los datos del año 2024 solo son los obtenidos hasta la fecha de realización de esta memoria, por lo cual no se tomarán en cuenta para el cálculo de estimaciones, si no que para el de proyecciones.

Al igual que en el inciso anterior, es de suma importancia realizar un análisis rápido de acuerdo con los paradigmas que ha vivido Chile, así como los que está viviendo actualmente y los que vendrán en un futuro.

Paradigmas de antaño en la industria aeronáutica chilena

La industria aeronáutica en Chile ha tenido una evolución interesante, marcada por influencias internacionales, pero también con un sello propio. Durante gran parte del siglo XX, la aviación en Chile estuvo enfocada en conectar el país internamente, lo cual era crucial dada su geografía extensa y accidentada. Las primeras aerolíneas nacionales, como LAN Chile (hoy conocida como LATAM Airlines), comenzaron sus operaciones en las décadas de 1930 y 1940, priorizando el transporte de carga y pasajeros en rutas dentro del país.

En las décadas de 1970 y 1980, con la llegada de los aviones a reacción, la industria aérea chilena empezó a expandirse hacia rutas internacionales, conectándose con destinos en América del Norte y Europa. Esto impulsó tanto el turismo como el comercio exterior, y consolidó a LAN Chile como una de las aerolíneas más destacadas de la región.

La introducción de los "jumbo jets" también tuvo un impacto importante en Chile, ya que permitió a la aerolínea nacional aumentar su capacidad y reducir los costos por pasajero, facilitando la conexión de Chile con el resto del mundo. Durante este período, el aeropuerto Arturo Merino Benítez en Santiago se consolidó como el principal centro de la aviación en el país.

Paradigmas actuales en la industria aeronáutica chilena

Hoy en día, la aviación en Chile sigue muchas de las tendencias internacionales, pero adaptadas a las particularidades del país:

- **Expansión de las aerolíneas de bajo costo:** En los últimos años, la llegada de aerolíneas de bajo costo como Sky Airline y JetSMART ha cambiado el mercado tanto a nivel doméstico como internacional. Estas aerolíneas ofrecen vuelos a precios más accesibles, haciendo que el transporte aéreo sea una opción más viable para muchas personas en Chile y hacia otros destinos de la región.
- **Consolidación de LATAM Airlines:** LATAM, la aerolínea más grande de Chile, se ha convertido en uno de los grandes jugadores en América Latina. Desde la fusión de LAN Chile con TAM de Brasil en 2012, LATAM ha implementado estrategias para competir en el mercado global, aunque también ha tenido que enfrentar algunos desafíos financieros en los últimos años.
- **Eficiencia y sostenibilidad:** La industria aérea en Chile también sigue la tendencia global

de buscar mayor eficiencia en el uso de combustible y reducir las emisiones. LATAM, por ejemplo, ha invertido en aviones más modernos y eficientes en consumo de energía, alineándose con los objetivos de sostenibilidad ambiental.

- **Modernización de la infraestructura:** Con el aumento del tráfico aéreo, el aeropuerto Arturo Merino Benítez ha sido objeto de una importante ampliación. Estas mejoras incluyen la construcción de nuevas terminales y la modernización de sus instalaciones, permitiendo así atender a un mayor número de pasajeros y de vuelos internacionales.

Paradigmas futuros en la industria aeronáutica chilena

Mirando hacia el futuro, la industria aeronáutica en Chile enfrenta una serie de desafíos y oportunidades interesantes:

- **Movilidad aérea en el sur del país:** La geografía única de Chile sigue siendo un reto para la conectividad. Es probable que, en el futuro, se desarrollen más rutas regionales y soluciones aéreas para conectar zonas remotas, especialmente en el sur, donde el transporte terrestre resulta más complicado debido al terreno.
- **Sostenibilidad:** Con la creciente presión global para reducir la huella de carbono de la aviación, las aerolíneas chilenas tendrán que continuar invirtiendo en prácticas y tecnologías más sostenibles. LATAM, por ejemplo, ya ha anunciado compromisos para reducir emisiones y avanzar en el uso de combustibles sostenibles.
- **Crecimiento de las aerolíneas de bajo costo:** La expansión de aerolíneas como Sky Airline y JetSMART, que ya operan en mercados internacionales, probablemente continuará, fomentando la competencia en rutas que antes eran dominadas principalmente por LATAM.

Estos desafíos y oportunidades reflejan cómo la industria aeronáutica chilena, aunque

influenciada por tendencias globales, sigue adaptándose a las particularidades y necesidades del mercado local.

1.2. Datos específicos relativos a la contaminación y actividades aeronáuticas

1.2.1. Tipos de motores

En la aviación comercial se pueden identificar dos grandes grupos de motores, los motores de turbohélice y los turbofán, cada uno de estos presentan sus pros y contras respecto a las modalidades de uso y en las aeronaves en que se implementa, a continuación, se explicara en mayor profundidad cada uno de estos.

Turbofán

Primero, el aire atmosférico entra al motor a través de una toma frontal. Luego, este aire pasa por el compresor, donde una serie de rotores y estatores lo comprimen, aumentando su presión y temperatura.

Después, el aire comprimido se mezcla con combustible en la cámara de combustión, donde se enciende. Esta mezcla genera gases que se expanden rápidamente, produciendo una gran presión que impulsa las turbinas.

Las turbinas están conectadas por un eje y accionan tanto el compresor como otros sistemas del motor, aprovechando la energía rotacional para mantener el ciclo de admisión y compresión y también para suministrar potencia a la aeronave.

Finalmente, los gases de escape, aún a alta temperatura y presión, son expulsados hacia atrás a través de la tobera de escape. Parte del aire sale directamente hacia atrás, proporcionando empuje al avión, mientras que otra parte rodea el núcleo del motor, ayudando a reducir el

ruido. (Rolls-Royce, 2005)

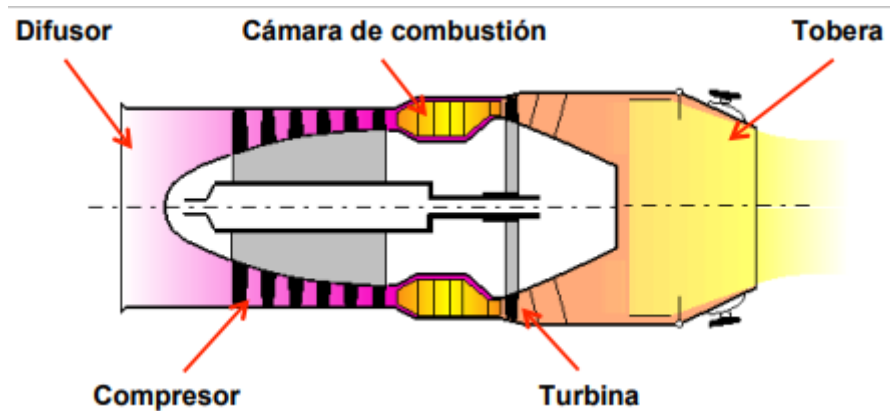


Figura 5. Funcionamiento de motor turbofán.

Turbohélice

El motor turbohélice es una variante de los motores de turbina de gas, diseñado específicamente para propulsar aeronaves que requieren un mayor énfasis en el empuje a velocidades más bajas y altitudes más bajas, como aviones regionales y de corta distancia. El motor turbohélice funciona de manera similar al motor turbofán, pero con algunas diferencias importantes.

Primero, el aire entra al motor a través de una toma frontal, donde es comprimido en el compresor, aumentando su presión y temperatura, tal como ocurre en el turbofán.

Luego, este aire comprimido se mezcla con combustible en una cámara de combustión, donde se enciende. Los gases generados se expanden y mueven una serie de turbinas conectadas por un eje.

A diferencia del turbofán, en el turbohélice, la energía rotacional de las turbinas se usa para accionar una hélice mediante un sistema de transmisión, en lugar de generar empuje a través de una tobera de escape. Al girar, la hélice desplaza el aire hacia atrás, creando el empuje necesario para mover la aeronave hacia adelante. Además, parte del aire puede expulsarse a

través de una tobera para dar un pequeño empuje adicional.

Este ciclo continuo de admisión, compresión, combustión, expansión y escape, junto con la energía de la hélice, permite al motor turbohélice propulsar la aeronave de manera eficiente, especialmente a velocidades y altitudes más bajas. (Mattingly, Heiser, & Pratt, 2002).

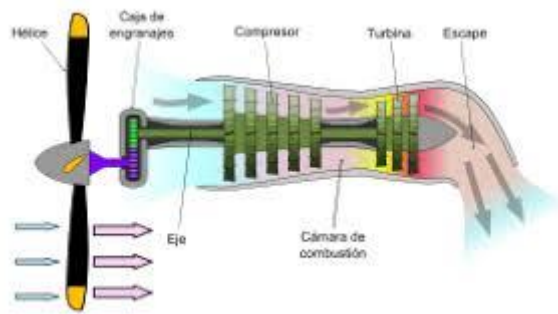


Figura 6. Funcionamiento de motor turbohélice

1.2.2. Tipos de combustibles

En la industria aeronáutica, existen dos tipos principales de motores: los de turbina y los de pistones. Los motores de turbina son los más comunes, como hemos mencionado anteriormente. Por ello, a continuación, nos enfocaremos en estos motores, en los tipos de combustible que utilizan con mayor frecuencia y en los contaminantes que generan.

- Jet A1: Este es un combustible refinado e incoloro, basado en queroseno, usado principalmente en aviones comerciales con motores de turbina. Es altamente eficiente, produciendo gran potencia con un consumo relativamente bajo y un punto de congelación de $-47\text{ }^{\circ}\text{C}$, ideal para vuelos comerciales. Sin embargo, su combustión libera varios contaminantes, como dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados y partículas (PM). Estos contaminantes contribuyen al cambio climático, la formación de smog y a problemas de salud pública (IATA, n.d.).

- Jet A: Similar al Jet A1 y también basado en queroseno, es el combustible más común en Estados Unidos. Tiene un punto de congelación de -40°C , lo que lo hace menos adecuado para rutas polares en comparación con el Jet A1. Los contaminantes que produce son similares, incluyendo CO_2 , NO_x , CO , hidrocarburos no quemados y partículas. Las diferencias en aditivos y refinamiento generan leves variaciones en la cantidad y tipo de contaminantes emitidos (IATA, n.d.).
- Jet B: Conocido también como JP-54, es el combustible más adecuado para rutas en climas extremadamente fríos, ya que tiene un punto de congelación muy bajo (-60°C). Este combustible está compuesto de una mezcla de nafta y queroseno, lo que lo hace más volátil y, por ende, más riesgoso en términos de emisiones evaporativas durante su manejo y almacenamiento. Aunque sus contaminantes son similares a los del Jet A y Jet A1, su mayor volatilidad puede impactar la calidad del aire en aeropuertos y áreas cercanas debido a las emisiones evaporativas adicionales (IATA, n.d.).

1.2.3. Etapas de consumo y generación de contaminantes

Durante un vuelo, el avión pasa por distintas fases, las cuales consumen mayor cantidad de combustible, dependiendo de las exigencias en vuelos. Estas fases las podemos dividir en las siguientes tomando los siguientes valores referenciales para tener una noción de cada fase:

Tabla 1. Fases, duración promedio y consumo de combustible relativo de los vuelos. Elaboración propia.

Fase	Duración Aproximada	Consumo de Combustible Relativo
Taxi/Idle	10-30 minutos	Bajo
Take-off	1-2 minutos	Alto
Climb	10-30 minutos	Medio
Cruise	Varía (horas)	Alto
Descent	20-30 minutos	Medio
Landing	1-2 minutos	Alto

Vale también hacer un análisis relativo al tiempo de consumo, esto debido a que tenemos fases como en el caso del take-off, en la cual se consume mucho combustible en un periodo de tiempo acotado, mientras que en el cruise también se consume bastante combustible, pero esto debido a que corresponde a un tiempo mucho más prolongado

Cada una de estas fases representa una acción específica que realiza la aeronave durante su recorrido. Estas fases se distribuyen en dos grandes áreas, las cuales son LTO (Landing and Take-Off) y CCD (Cruise-Climb-Descent), y que se desagregan en los siguientes párrafos.

LTO (Landing and Take-Off)

El ciclo LTO (Landing and Take-Off) incluye las siguientes etapas clave:

- Rodaje (Taxiing): Es el movimiento de la aeronave en tierra desde la zona de estacionamiento hasta la pista antes del despegue, y luego, desde la pista de aterrizaje hasta el área de estacionamiento una vez finalizado el vuelo.
- Despegue (Take-Off): En esta fase, la aeronave acelera a lo largo de la pista hasta alcanzar la velocidad necesaria para elevarse del suelo y comenzar el vuelo.

- **Ascenso Inicial (Initial Climb):** Justo después del despegue, el avión asciende rápidamente hasta una altitud de transición, normalmente de 3,000 pies (aproximadamente 1,000 metros).
- **Aproximación (Approach):** Esta es la fase en la que el avión desciende hacia el aeropuerto de destino, alineándose con la pista para realizar el aterrizaje de manera segura.

CCD (Cruise-Climb-Descent)

El modo CCD (Climb, Cruise, Descent) comprende las siguientes fases principales:

- **Crucero (Cruise):** Es la fase en la que la aeronave mantiene una altitud y velocidad constantes. Esta etapa suele ocupar la mayor parte del vuelo, cubriendo el trayecto entre el origen y el destino a la altitud de crucero.
- **Ascenso (Climb):** Después del ascenso inicial, el avión continúa elevándose hasta alcanzar la altitud de crucero. En esta fase, el objetivo es lograr la altura óptima para un vuelo eficiente y seguro.
- **Descenso (Descent):** Es la fase en la que la aeronave comienza a reducir altitud en preparación para la aproximación y el aterrizaje en el aeropuerto de destino, iniciando la transición hacia las maniobras finales del vuelo.

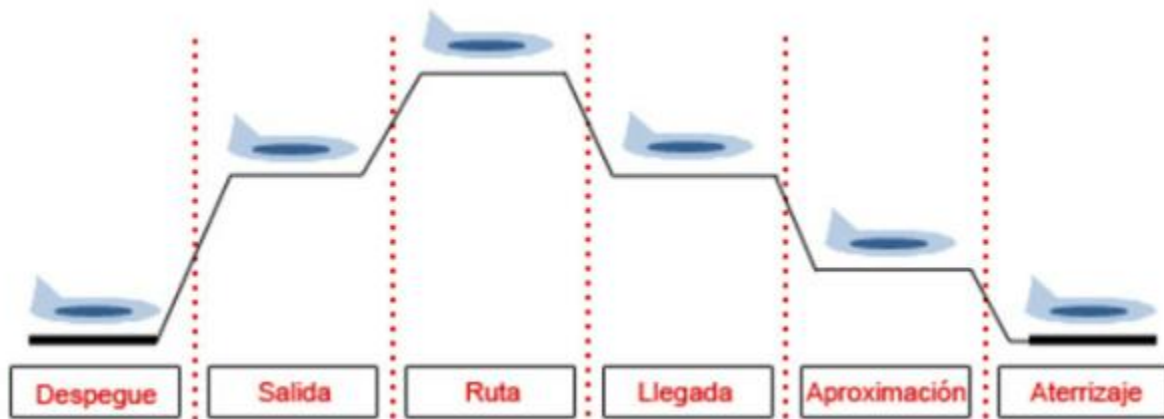


Figura 7. Diagrama de ejemplificación de las fases de vuelo. Obtenido desde la SAE

El tiempo en que se pasa por cada fase varía de acuerdo al tipo de aeronave, así como condiciones históricas y tramo en el que se está llevando a cabo. Por otro lado, el consumo de combustible durante cierta fase depende del tipo de motor que tenga la aeronave, así como también del peso que tenga la misma.

1.2.4. Contaminantes

En la industria aeronáutica se genera una gran cantidad de contaminantes, ya sea por la acústica o generación de contaminantes químicos, en este caso nos centraremos en los productos derivados del proceso de combustión dentro de las turbinas de los aviones.

En el caso de la industria aeronáutica, podemos identificar los siguientes:

Dióxido de carbono (CO₂): Este gas se produce cuando el combustible de aviación (queroseno) se quema completamente en los motores de los aviones. Es el principal gas de efecto invernadero emitido por la industria aérea, y su acumulación en la atmósfera contribuye significativamente al calentamiento global.

Óxidos de nitrógeno (NO_x): Estos compuestos se forman cuando el nitrógeno y el oxígeno en el aire se combinan debido a las altas temperaturas y presiones en los motores de los aviones. Los NO_x son preocupantes porque contribuyen a la creación de ozono en la troposfera, el calentamiento global y tienen efectos perjudiciales sobre la calidad del aire.

Monóxido de carbono (CO): Este gas tóxico se produce cuando el combustible no se quema completamente en los motores. El CO no solo es perjudicial para la salud humana, sino que también contribuye a la contaminación del aire.

Hidrocarburos no quemados (HC): Son compuestos orgánicos que se liberan cuando el combustible de aviación no se quema del todo en los motores. Los HC son un problema ambiental porque ayudan a formar ozono a nivel del suelo y contribuyen al smog, afectando la calidad del aire.

Dióxido de azufre (SO_2): Aunque se produce en menores cantidades, el SO_2 puede generarse si el combustible contiene azufre. Este gas irritante puede formar partículas finas que afectan la calidad del aire y tienen un impacto negativo en la salud respiratoria.

Material particulado (PM): Estas son pequeñas partículas sólidas y líquidas que resultan del proceso de combustión en los motores. Las partículas más finas ($\text{PM}_{2.5}$) son especialmente preocupantes porque pueden penetrar profundamente en los pulmones y representar un riesgo para la salud. Además, el PM tiene un impacto en el calentamiento global al influir en la formación de nubes y el balance radiactivo de la atmósfera.

1.2.5. Contaminantes generados hasta la fecha

A lo largo de la historia moderna, los contaminantes generados por la aviación han variado de manera significativa, influenciados por diversos factores. Entre estos, destacan el crecimiento demográfico, los avances tecnológicos, y eventos disruptivos como catástrofes globales que han afectado la operación normal de la industria aeronáutica. Estos cambios han tenido un impacto directo en las emisiones anuales, como se puede observar en el siguiente gráfico:

Global CO₂ emissions from aviation, 1940 to 2019

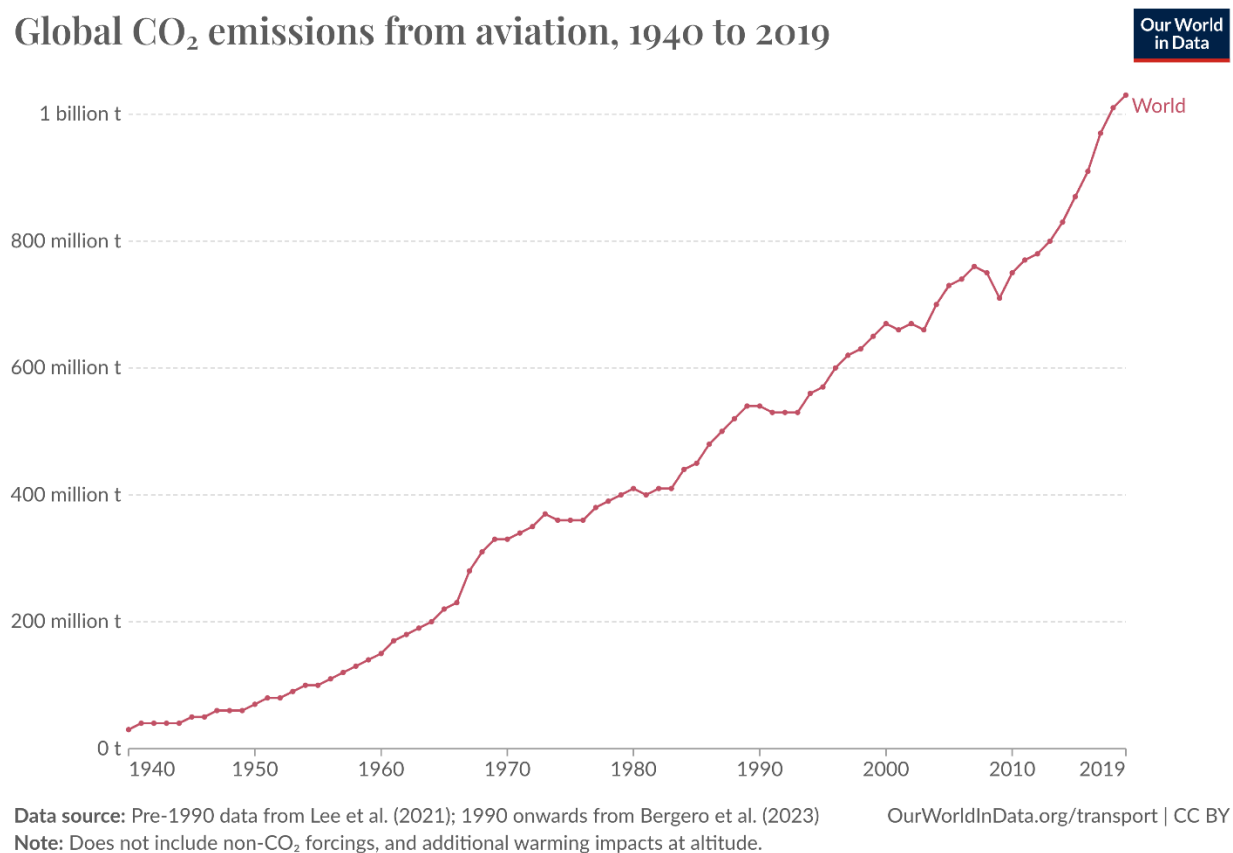


Figura 8. Emisiones anuales de CO₂ producto de la aviación. Obtenido de OurWorldInData.

En la figura 8 se puede ver como la industria aeronáutica ha aumentado rápidamente las emisiones de CO₂, quintuplicando casi las emisiones de CO₂ en tan solo 50 años entre los periodos 1970 a 2020 (OurWorldInData, 2024).

Por otro lado, también se puede observar la evolución de los contaminantes generados en la industria aeronáutica chilena, más específicamente respecto a la generación de CO₂.

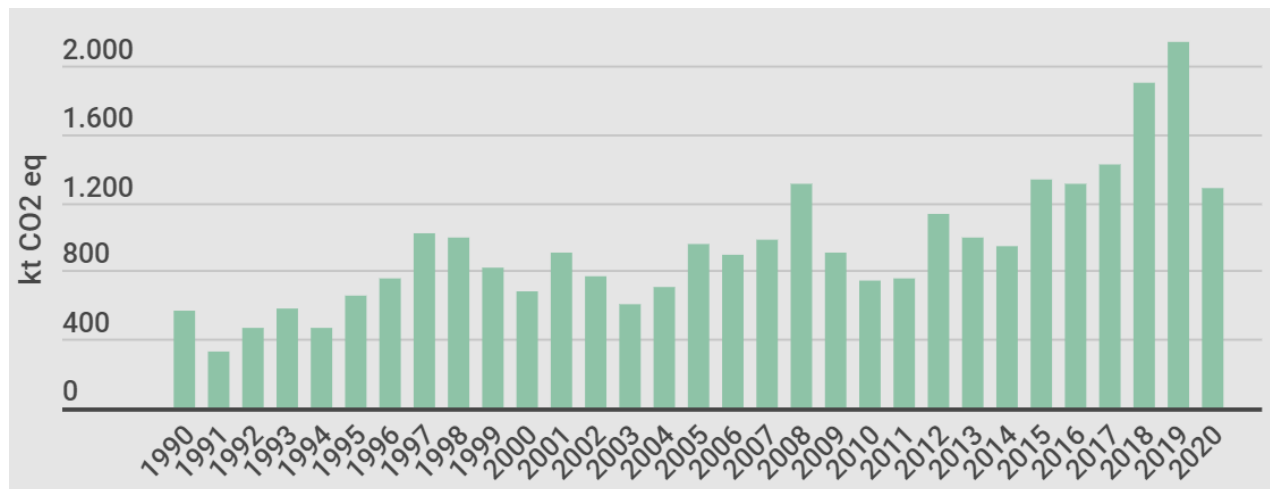


Figura 9. Emisión de CO₂ eq producto de la aviación en Chile. Grafico generado por el INGEI 1990-2020

Como se logra apreciar en la figura 9, hay periodos en que se produce un aumento sostenido en la generación de CO₂, sin embargo, hay ciertos puntos en los cuales se producen declives, los cuales pueden ser multifactoriales como los periodos de recesión y cambios en las flotas de las empresas o monofactoriales como el inicio de la pandemia de Covid. El último dato entregado en relación a la emisión de CO₂ producto de la aviación civil es de 1.283,40 kilotoneladas de CO₂ eq (INGEI, 2020)

2. Metodología de estimación de contaminantes industria aeronáutica (Metodología EEA)

La metodología EEA proviene de un informe técnico elaborado por la Agencia Europea, que tiene como objetivo desarrollar inventarios de emisiones a nivel nacional. Este informe funciona como una guía que reúne información de inventarios de emisiones de distintos autores, enfocándose en las principales fuentes de contaminación. En él, se detalla la metodología para estimar las emisiones que generan las aeronaves tanto durante los ciclos de aterrizaje y despegue (LTO) como en el trayecto de crucero (CCD) entre el origen y el destino.

2.1. Estimación de contaminantes generados

2.1.1. Áreas de estimación

Este trabajo de título tiene como objetivo estimar las emisiones en el sector aeronáutico. Sin embargo, es fundamental profundizar en estas estimaciones para obtener un entendimiento más completo de las emisiones generadas. Por ello, se han definido cuatro puntos de cálculo, que son los siguientes:

- Emisiones por aeropuerto nacional (LTO): Este cálculo se enfoca en la estimación de contaminantes generados en las fases de aterrizaje y despegue (LTO) para vuelos domésticos.
- Emisiones por aeropuerto internacional (LTO): Se centra en la estimación de contaminantes en las fases LTO, pero considerando exclusivamente los vuelos

internacionales.

- Emisiones por vuelo crucero doméstico (CCD): Este punto de cálculo abarca la estimación de contaminantes generados durante la fase de crucero (CCD) para vuelos nacionales.
- Emisiones por vuelo crucero internacional (CCD): Considera la estimación de contaminantes emitidos en vuelos internacionales durante la fase de crucero.

2.1.2. Estimación realizada en relación con la cantidad de combustible consumido

Método Simplificado

El método simplificado es el más básico y utiliza datos agregados y factores de emisión promedio para estimar las emisiones.

- Datos Necesarios: Requiere un mínimo de datos, como el número total de vuelos y un factor de emisión promedio por vuelo.
- Aplicaciones: Útil para evaluaciones iniciales y estudios de impacto a gran escala donde se necesita una estimación rápida y aproximada.
- Ventajas: Fácil de implementar y requiere pocos datos.
- Limitaciones: Menor precisión debido a la utilización de valores promedio que no consideran variaciones específicas en tipos de aeronaves o rutas.

Formula:

$$Emisiones_x = \text{Número de vuelos} * \text{Factor de emisión promedio}$$

2.1.3. Estimación realizada separando entre LTO y CCD

Se aplica principalmente al uso de combustible en motores de aviones a reacción y algunos con motor tipo pistón. Para utilizar este método, es necesario conocer el número de operaciones LTO (despegue, aterrizaje y rodaje) tanto para vuelos nacionales como internacionales, según el tipo de aeronave. Este método distingue entre las emisiones durante las fases de LTO y crucero del vuelo. Las emisiones durante el crucero se calculan restando las emisiones de las fases LTO del total de emisiones generadas por todo el combustible vendido en el período evaluado.

En cuanto a las emisiones específicas, el CO₂ proviene del combustible quemado durante las fases de LTO y crucero, mientras que otros contaminantes se obtienen mediante factores de emisión (FE) específicos para cada uno, el tiempo de vuelo en un modo de operación y el número de motores de la aeronave.

- **Datos Necesarios:** Requiere un mínimo de datos, como el número total de vuelos y un factor de emisión promedio por vuelo.
- **Aplicaciones:** Útil para evaluaciones iniciales y estudios de impacto a gran escala donde se necesita una estimación rápida y aproximada.
- **Ventajas:** Fácil de implementar y requiere pocos datos.

- Limitaciones: Menor precisión debido a la utilización de valores promedio que no consideran variaciones específicas en tipos de aeronaves o rutas.

Formula:

$$Emisiones_x = \sum_{i=1}^N (\text{Número de vuelos}_i * \sum_{j=1}^M (\text{Tiempo en Fase}_j * \text{Factor de emisión}_{i,j}))$$

2.1.4. Estimación realizada según trayectoria e información de origen y destino

Se considera cualquier método más detallado que los anteriores, y se divide en dos opciones, la primera se basa en la toma de datos reales del movimiento del vuelo, tales como origen y destino, mientras que el segundo utiliza la información más precisa de la trayectoria que sigue el vuelo,

El uso de cualquiera de estas metodologías mejora la precisión de las estimaciones durante la fase de crucero. Además, dado que estas metodologías utilizan datos de movimiento de vuelo en lugar del consumo de combustible, permiten una separación más precisa entre vuelos nacionales e internacionales.

- Datos Necesarios: Requiere datos detallados de cada vuelo, como el tipo de motor, régimen

Formula:

$$Emisión_x = \sum_{k=1}^P (\sum_{j=1}^M (\text{Tiempo en fase}_{k,j} * \text{Factor de emisión}_{k,j} * \text{Consumo de combustible}_{k,j}))$$

Todas las formulas mencionadas anteriormente se toman del documento 9889 de la ICAO (ICAO, 2021), dicho documento tiene la función de servir como guía para la creación de un inventario de emisiones.

2.1.5. Factor de emisión por aeronave

Es la cantidad de un contaminante específico que se emite a la atmósfera por unidad de actividad (como el consumo de combustible o el tiempo de operación). Se expresa generalmente en términos de masa del contaminante por masa de combustible quemado (por ejemplo, gramos de NO_x por kilogramo de combustible) o en términos de masa del contaminante por unidad de tiempo (por ejemplo, gramos de CO₂ por hora).

Los factores de emisión varían según la aeronave, o el tipo de motor de la aeronave en cuestión. Según la literatura, una aeronave puede presentar variaciones en los motores que use, por lo que es imperativo centrarse en el motor de esta.

Los factores de emisión que se tendrán en cuenta son:

- Óxidos de Nitrógeno (NO_x): Expresado en kilogramos de NO_x por kilogramo de combustible quemado (kg/kg).
- Monóxido de Carbono (CO): Expresado en kilogramos de CO por kilogramo de combustible quemado (kg/kg).
- Óxidos de Azufre (SO_x): Expresado en kilogramos de SO_x por kilogramo de combustible quemado (kg/kg).
- Dióxido de Carbono (CO₂): Expresado en kilogramos de CO₂ por kilogramo de combustible quemado (kg/kg).
- Material Particulado (PM): Expresado en kilogramos de PM por kilogramo de combustible quemado (kg/kg).
- Vapor de agua (H₂O): Expresado en kilogramos de H₂O por kilogramo de combustible quemado (kg/kg).

Dichos factores de emisión se utilizan para dar cuenta de la cantidad de la cantidad de partículas que emite cada tipo de motor, según la cantidad de combustible consumido. Las cantidades emitidas varían de motor a motor. En un método sofisticado de estimación de contaminantes es muy importante dar cuenta de las variaciones de factores de emisión según los flujos de combustible y variaciones de potencia requeridas por fase, información difícil de obtener dado lo específico que es. Cabe destacar que todos estos factores de emisión serán tomados del “Master emissions calculator” (EEA, 2024), un documento generado con el fin de ser una herramienta que proporcione toda la información en relación a la emisión de contaminantes de la mayoría de las aeronaves.

2.2. Obtención y manejo de datos industria chilena

2.2.1. Obtención de datos

Datos de vuelos realizados

Para obtener los datos, se utilizará la información recopilada anualmente por la JAC en el documento T672, que incluye detalles como el origen y destino de los vuelos, los kilómetros recorridos, la aerolínea y la fecha del vuelo. Esta información es clave para hacer estimaciones más precisas sobre los contaminantes generados. Además, la JAC actualiza estos datos mensualmente, agregando la información de los vuelos realizados el mes anterior, lo que permite trabajar con datos frescos y actualizados.

Datos de aeronaves empleadas

La información sobre las aeronaves que utiliza cada aerolínea se obtiene de la base de datos de la JAC, que detalla el tipo de aeronave en cada vuelo. Es importante mencionar que cada vuelo puede tener un modelo de aeronave específico, por lo que se debe registrar esta

información para cada caso.

Factores de emisión

Cada aeronave tiene un factor de emisión que puede cambiar según las condiciones de vuelo y su estado de mantenimiento. Para desarrollar esta memoria, se usará la base de datos de la OACI, que incluye todos los motores en uso actualmente, junto con sus factores de emisión para distintas fases de vuelo.

2.2.2. Condiciones de trabajo de los datos

Distancias empleadas en los cálculos

Como se explicó al comienzo de esta memoria, este trabajo se enfoca en estimar las emisiones contaminantes dentro de Chile, por lo que es fundamental diferenciar entre los kilómetros recorridos dentro del territorio y los que no. Para vuelos nacionales, se considera que el 100% de los kilómetros informados por la JAC corresponden a trayectos efectivos en el país. En el caso de vuelos internacionales, se tomará el recorrido completo, desde el punto de partida en Chile hasta la ciudad de destino en el extranjero

Maniobras especificadas ADW por la JAC

Los documentos de la JAC también incluyen una referencia a maniobras "ADW," que abarcan las fases de despegue, aterrizaje y sobrevuelo (JAC, 2024). Es importante considerar estas maniobras correctamente en los cálculos. Por ejemplo, una maniobra de despegue (A) y una de aterrizaje (D) con la misma ciudad de origen y destino, el mismo tipo de aeronave y la misma fecha de salida se interpreta como una maniobra LTO completa.

2.2.3. Manejo de datos

Para procesar los datos, se utilizarán Excel y Power BI, que ofrecen buenas capacidades para manejar volúmenes medios de datos y visualizarlos en Power BI. Además, será esencial organizar los datos cuidadosamente para facilitar la identificación de valores y evitar problemas en los cálculos al aplicar las fórmulas

2.3. Preparación de datos para la estimación de emisiones

2.3.1. Segregación de los datos

Primero, se trabajó con la base de datos proporcionada por la JAC, que contenía más de 900.000 registros. Para facilitar los cálculos de las emisiones, los datos se organizaron por año, y se crearon dos archivos anuales para separar los cálculos de las maniobras LTO y CCD, generando un total de 10 archivos en Excel

2.3.2. Identificación ciudad y país

En las tablas entregadas por la JAC se identifica como ciudad de origen con las siglas “OACI” y la ciudad de destino con las palabras “PROC_DEST”, estas siglas son fáciles de recordar, pero no muy cómodas a la hora de llevar acabo los cálculos y conexiones, por lo que se toma la decisión de crear una tabla donde se agrupen la sigla en cuestión, la ciudad perteneciente a dicha sigla y el país al cual pertenece dicha ciudad, dando como resultado la siguiente tabla en Excel. Cabe destacar que a las localizaciones que no se les encontró relación con alguna ciudad, se les identificó como “No disponible”, debido al carácter desconocido y/o particular y la poca relevancia que tiene debido a la poca concurrencia de la misma en vuelo-

Tabla 2. Relación de sigla ICAO con ciudades y países. Elaboración propia, extracto.

ICAO	Ciudad	País
------	--------	------

SCAR	Arica	Chile
SCAS	Ovalle	Chile
SCAT	Coyhaique	Chile
SCBA	Balmaceda	Chile
SCCC	Chile Chico	Chile
SCCF	Caldera	Chile
SCCI	Punta Arenas	Chile
SCCY	Antártica	Chile

En la tabla 2, se presenta un pequeño extracto de todos los datos recopilados, en donde en la primera columna tenemos la sigla, en la segunda tenemos las ciudades y en la última columna el país al que pertenece.

2.3.3. Identificación latitud y longitud

Con esta información, ya tenemos identificadas todas las ciudades necesarias para saber a qué lugar corresponde cada sigla en el archivo de la JAC. Sin embargo, como esta información es solo descriptiva, necesitamos agregar las coordenadas de latitud y longitud de cada ubicación. Esto nos permitirá calcular los contaminantes emitidos en las maniobras CCD de cada vuelo. Los resultados de este proceso se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3. Latitud y longitud de la ciudades. Elaboración propia, extracto.

Ciudad	País	Latitud	Longitud	Latitud2	Longitud2
Arica	Chile	18.5° S	70.3° W	-18.5	-70.3
Ovalle	Chile	30.6° S	71.2° W	-30.6	-71.2

Coyhaique	Chile	45.6° S	72.1° W	-45.6	-72.1
Balmaceda	Chile	45.9° S	71.7° W	-45.97	-71.7
Chile Chico	Chile	46.5° S	71.7° W	-46.5	-71.7
Caldera	Chile	27.1° S	70.8° W	-27.2	-70.8
Punta Arenas	Chile	53.1° S	70.9° W	-53.1	-70.9

En esta tabla 3 se presenta un extracto de todas las longitudes de ciudades que se tienen en la base de datos, además se incluyeron las latitudes y longitudes de las ciudades en dos tipos de notaciones, las primeras son tomando en cuenta el ángulo y su dirección cardinal y en las segundas se toman los ángulos sin tomar su cardinalidad y discriminando por signo positivo o negativo.

2.3.4. Identificación por aerolínea

Además de la información anterior, también tenemos datos de las aerolíneas, pero nuevamente están en formato de siglas. Por eso, decidimos convertir estos códigos a los nombres completos de cada aerolínea, lo que facilita la identificación de vuelos específicos y ayuda a detectar aquellos códigos que no corresponden a una aerolínea en particular.

Tabla 4. Relación de siglas JAC con Aerolíneas. Elaboración propia, extracto.

Sigla	Aerolínea
AAL	American Airlines
ACA	Air Canada
AFR	Air France
AMX	Aeroméxico

ARG	Aerolíneas Argentinas
-----	--------------------------

En la tabla 4, se muestra una parte de la tabla completa donde se aunaron todas las siglas de aeronaves que presentan actividad en el territorio nacional, así como el nombre de las aerolíneas en cuestión.

2.3.5. Identificación emisión característica por aeronave en LTO

La EEA ofrece una plataforma que proporciona información detallada sobre las emisiones contaminantes de cada aeronave en el ciclo LTO. En esta plataforma, se pueden consultar datos como el tiempo que cada aeronave pasa en cada fase del ciclo, su consumo de combustible y, lo más importante, la cantidad total de contaminantes que emite, considerando el tipo y la cantidad de motores que usa. Aquí se muestra un ejemplo de esta plataforma:

Aircraft code	Manufacturer	BEECH	Engine type	TURBOPROP	Default LTO (1) cycle in hh:mm:ss								
BE10	One of the models associated with this aircraft type	100 KING AIR	The most common engine ID in 2022 used for modelling this aircraft type	Turboprop	Phases	ICAO	A busy European airport, year 2022						
	Category	LANDPLANE	Number of engines	2	Taxi	0:26:00	0:20:50						
INPUT NUMBER OF MOVEMENTS					Take off	0:00:42	0:00:42						
CO ₂ emission factor for Jet and Turboprop aircraft					Climb out	0:02:12	0:02:12						
3.15					Approach	0:04:00	0:04:00						
Kg/KgFuel (Jet-A)					TOTAL	0:32:54	0:27:44						
CO ₂ emission factor for Piston aircraft													
Kg/KgFuel (AvGas)													
ESTIMATIONS YEAR 2022													
Aircraft type	BE10	The most frequently observed Cruise flight level	Duration in hh:mm:ss	Fuel burn in kg	CO ₂ in kg	NO _x in kg	SO _x in kg	H ₂ O in kg	CO in kg	HC in kg	PM non volatile in kg	PM volatile (organics+sulphurous) in kg	PM TOTAL in kg (1)
	BEECH				3.15Kg/KgFuel								
Default LTO (2) cycle (see table below)	A busy European airport, year 2022		0:27:44	64.10	201.91	0.34	0.05	79.29	0.69	0.05			
	ICAO		0:32:54	73.03	230.03	0.38	0.06	90.33	0.84	0.06			
Please, enter a CCD (3) stage length in NM here	200	180	0:59:53	205.54	647.44	1.33	0.17	254.25	0.34	0.00			
TOTAL ICAO LTO + CCD 200 nm.			1:32:47	278.56	877.47	1.71	0.23	344.58	1.19	0.06			

Figura 10. Plataforma de estimaciones de emisión de la EEA. Sección LTO. Obtenido desde la EEA.

Así, se recopilaban los datos de cada aeronave que opera dentro del país y se organizó una tabla que muestra todas las emisiones contaminantes correspondientes a un ciclo LTO para cada especie

mencionada.

Tabla 5. Tabla de estimaciones de aeronaves LTO. Elaboración propia a partir de plataforma de la EEA

Aircraft type	Fuel burn in kg	CO ₂ in kg	NO _x in kg	SO _x in kg	H ₂ O in kg	CO in kg	HC in kg	PM non volatile in kg	PM volatile (organic+sulphurous) in kg	PM TOTAL in kg (1)
A320	816.2	2570.9	11.3	0.7	1009.6	8.2	1.6	0.0	0.1	0.1
A321	1074.9	3385.9	16.8	0.9	1329.7	5.1	0.1	0.2	0.1	0.2
A21N	749.2	2359.8	9.5	0.6	926.7	7.9	0.1	0.0	0.0	0.1
A321	1074.9	3385.9	16.8	0.9	1329.7	5.1	0.1	0.2	0.1	0.2
A20N	660.8	2081.5	7.1	0.6	817.4	6.5	0.1	0.0	0.0	0.0
B789	1638.5	5161.1	18.1	1.4	2026.8	14.0	0.5	0.0	0.1	0.1
B788	1638.5	5161.1	18.1	1.4	2026.8	14.0	0.5	0.0	0.1	0.1
B738	824.7	2597.7	10.3	0.7	1020.1	8.0	0.9	0.0	0.0	0.1
A319	688.8	2169.8	7.5	0.6	852.1	9.5	2.0	0.0	0.1	0.1
A359	2138.0	6734.6	39.8	1.8	2644.7	20.3	0.9	0.1	0.1	0.2
RJ85	603.1	1899.7	4.3	0.5	746.0	11.2	1.3	0.1	0.0	0.1
RJ1H	603.1	1899.7	4.3	0.5	746.0	11.2	1.3	0.1	0.0	0.1
B462	570.0	1795.6	4.1	0.5	705.1	11.2	1.4	0.0	0.0	0.1
B763	1729.9	5449.3	26.7	1.5	2139.9	29.6	7.6	0.0	0.1	0.2
B772	2168.4	6830.6	46.7	1.8	2682.4	27.6	2.4	0.0	0.1	0.1
B737	824.7	2597.7	10.3	0.7	1020.1	8.0	0.9	0.0	0.0	0.1
A332	2168.1	6829.4	35.3	1.8	2681.9	21.2	2.1	0.1	0.1	0.2
B39M	730.7	2301.6	12.7	0.6	903.9	4.5	0.2	0.0	0.0	0.0
E190	596.4	1878.6	6.2	0.5	737.7	5.0	0.0	0.1	0.0	0.1
B739	881.1	2775.5	12.3	0.7	1089.9	7.1	0.7	0.0	0.1	0.1
B37M	824.7	2597.7	10.3	0.7	1020.1	8.0	0.9	0.0	0.0	0.1
PA31	25.5	79.2	0.0	0.0	31.6	34.5	0.9	0.0	0.0	0.0
A333	2168.1	6829.4	35.3	1.8	2681.9	21.2	2.1	0.1	0.1	0.2
B77W	2906.8	9156.4	68.2	2.4	3595.7	38.1	3.9	0.0	0.2	0.2
B773	2562.8	8072.9	52.8	2.2	3170.2	12.8	0.7	0.1	0.1	0.2
B38M	730.7	2301.6	12.7	0.6	903.9	4.5	0.2	0.0	0.0	0.0
B764	1734.1	5462.3	24.8	1.5	2145.0	12.3	1.0	0.0	0.1	0.1
B200	73.8	232.4	0.3	0.1	91.3	3.0	0.6	0.0	0.0	0.0
B733	783.4	2467.8	7.2	0.7	969.1	13.0	0.8	0.0	0.0	0.1
L410	31.6	99.7	0.2	0.0	39.1	1.8	3.1	0.0	0.0	0.0
A330	2168.1	6829.4	35.3	1.8	2681.9	21.2	2.1	0.1	0.1	0.2
B744	3908.4	12311.5	98.0	3.3	4834.7	20.6	2.0	0.3	0.3	0.5
C208	31.1	97.9	0.1	0.0	38.5	1.1	0.1	0.0	0.0	0.0
CRJ2	328.6	1035.0	2.2	0.3	406.4	7.4	0.7	0.0	0.0	0.0
B734	897.0	2825.4	9.6	0.8	1109.5	11.2	0.6	0.0	0.0	0.1
C550	179.5	565.5	0.7	0.2	222.1	11.4	6.7	0.0	0.1	0.1
A550	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B300	85.9	270.5	0.3	0.1	106.2	7.1	1.1	0.0	0.0	0.0
AS35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
EC	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
D228	61.4	193.4	0.4	0.1	76.0	5.3	8.4	0.0	0.0	0.0
C206	30.5	94.6	0.1	0.0	37.8	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0
BN2B	13.3	41.1	0.0	0.0	16.4	16.9	0.4	0.0	0.0	0.0
B407	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PAY2	73.0	230.0	0.4	0.1	90.3	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0
A119	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
EC45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C210	31.1	97.9	0.1	0.0	38.5	1.1	0.1	0.0	0.0	0.0
R66	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C750	276.0	869.5	2.5	0.2	341.5	4.8	0.8	0.0	0.0	0.0
PA38	4.1	12.8	0.0	0.0	5.1	2.9	0.1	0.0	0.0	0.0
EC20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BE20	73.8	232.4	0.3	0.1	91.3	3.0	0.6	0.0	0.0	0.0
GLF5	597.1	1880.9	5.6	0.5	738.6	8.4	0.3	0.1	0.0	0.1
A346	3373.0	10624.8	64.7	2.8	4172.4	15.0	0.2	0.1	0.2	0.2
G280	316.8	997.9	3.0	0.3	391.9	5.0	0.2	0.0	0.0	0.1
G150	183.7	578.6	1.7	0.2	227.2	4.5	0.8	0.0	0.0	0.0
DA90	275.5	867.9	2.5	0.2	340.8	6.8	1.2	0.0	0.0	0.0
C525	141.4	445.4	0.5	0.1	174.9	10.6	3.7	0.0	0.0	0.0
R44	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
GLF4	642.3	2023.2	5.0	0.5	794.5	8.2	0.6	0.0	0.0	0.1
EC30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B505	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DHC6	73.0	230.0	0.4	0.1	90.3	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0
CL30	304.9	960.3	2.8	0.3	377.1	5.4	0.2	0.1	0.0	0.1
C172	9.3	28.9	0.1	0.0	11.5	6.9	0.1	0.0	0.0	0.0
U60	288.4	908.5	2.3	0.2	356.8	4.8	0.4	0.0	0.0	0.0
GL7T	597.5	1882.0	5.6	0.5	739.1	8.5	0.3	0.1	0.0	0.2
P210	30.5	94.6	0.1	0.0	37.8	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0
BE10	73.0	230.0	0.4	0.1	90.3	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0

2.3.6. Identificación emisión característica por aeronave en CCD

De forma similar al ciclo LTO, la plataforma también ofrece una sección donde se detallan las emisiones de cada contaminante según la distancia recorrida

Aircraft type	BE10	The most frequently observed cruise flight level	Duration in hh:mm:ss	Fuel burn in kg	CO ₂ in kg 3.15kg/kgFuel	NO _x in kg	SO _x in kg	H ₂ O in kg	CO in kg	HC in kg	PM non volatile in kg	PM volatile (organic+sulphurous) in kg	PM TOTAL in kg (1)
	BEECH												
Default LTO (1) cycle (see table below)	A busy European airport, year 2022		0:27:44	64.10	201.91	0.34	0.05	79.29	0.69	0.05			
	ICAO		00:32:54	73.03	230.03	0.38	0.06	90.33	0.84	0.06			
CCD stage length in NM	125	140	0:36:46	136.93	431.33	0.90	0.12	169.38	0.22	0.00			
	200	180	0:59:53	205.54	647.44	1.33	0.17	254.25	0.34	0.00			
	250	180	1:12:17	253.74	799.29	1.63	0.21	313.88	0.42	0.00			
	500	180	2:19:26	473.63	1 491.93	3.01	0.40	585.88	0.79	0.00			
	750	240	3:33:01	654.41	2 061.39	3.94	0.55	809.50	1.36	0.01			
	1 000	240	4:41:58	854.58	2 691.94	5.11	0.72	1 057.12	1.81	0.01			

Figura 11. Plataforma de estimaciones de emisión de la EEA. Sección CCD. Obtenido desde la EEA

Después de reunir las emisiones de todas las aeronaves en cada tramo de vuelo, se organizó esta información en la siguiente tabla.

Tabla 6. Extracto de emisiones por aeronave en CCD. Elaboración propia a través de plataforma EEA.

Aircraft type	Distancia	The most frequently observed cruise flight level	Tiempo	Fuel burn in kg	CO ₂ in kg	NO _x in kg	SO _x in kg	H ₂ O in kg	CO in kg	HC in kg	PM non volatile in kg	PM volatile (organic+sulphurous) in kg	PM TOTAL in kg (1)
A320	125.0	180.0	0.0	936.2	2949.0	17.3	0.8	1158.1	3.1	0.6	0.0	0.1	0.1
A320	200.0	240.0	0.0	1336.7	4210.7	24.4	1.1	1653.6	4.1	0.8	0.0	0.1	0.2
A320	250.0	320.0	0.0	1574.2	4958.6	28.8	1.3	1947.2	5.3	1.1	0.0	0.2	0.2
A320	500.0	360.0	0.1	2810.1	8851.9	44.6	2.4	3476.1	7.7	1.6	0.0	0.3	0.4
A320	750.0	360.0	0.1	4114.5	12960.8	61.7	3.5	5089.7	9.8	2.1	0.0	0.5	0.5
A320	1000.0	360.0	0.1	5375.8	16933.7	77.5	4.5	6649.8	11.8	2.5	0.1	0.6	0.7
A320	1500.0	360.0	0.1	7948.4	25037.6	110.6	6.7	9832.2	16.0	3.4	0.1	1.0	1.0
A320	2000.0	360.0	0.2	10571.6	33300.5	145.1	8.9	13077.1	20.1	4.4	0.1	1.3	1.4
A320	2500.0	360.0	0.2	13093.4	41244.2	176.7	11.0	16196.5	24.2	5.3	0.1	1.6	1.7

Al analizar los datos de la tabla 6, se notó que todos crecían de forma lineal. Por eso, se decidió calcular la pendiente y, usando está pendiente junto con las millas náuticas de cada vuelo, estimar el consumo característico de cada aeronave según la distancia recorrida. Así, se obtuvo la siguiente tabla.

Tabla 7.Tabla de estimaciones de aeronaves CCD. Elaboración propia a partir de plataforma de la EEA.

Aircraft type	Fuel burn in kg	CO ₂ in kg	NO _x in kg	SO _x in kg	H ₂ O in kg	CO in kg	HC in kg	PM non volatile in kg	PM volatile (organic+sulfur) in kg	PM TOTAL in kg (1)
A320	5.1	16.2	0.1	0.0	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A321	6.6	20.7	0.1	0.0	8.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A21N	5.3	16.7	0.1	0.0	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A20N	4.5	14.1	0.0	0.0	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B789	10.6	33.3	0.1	0.0	13.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B788	9.9	31.1	0.1	0.0	12.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B738	5.3	16.6	0.1	0.0	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A319	4.8	15.0	0.1	0.0	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A359	12.5	39.2	0.2	0.0	15.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
RJ85	5.2	16.4	0.0	0.0	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
RJ1H	5.4	17.2	0.1	0.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B462	5.1	16.1	0.0	0.0	6.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B763	10.1	31.8	0.1	0.0	12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B772	13.1	41.1	0.3	0.0	16.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B737	4.8	15.2	0.1	0.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A332	11.4	36.0	0.2	0.0	14.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B39M	4.8	15.0	0.1	0.0	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
E190	4.1	13.0	0.0	0.0	5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B739	5.7	18.0	0.1	0.0	7.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B37M	4.8	15.2	0.1	0.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PA31	0.9	2.7	0.0	0.0	1.1	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0
A333	10.9	34.3	0.1	0.0	13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B77W	17.1	53.8	0.4	0.0	21.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B773	15.0	47.4	0.3	0.0	18.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B38M	4.5	14.1	0.1	0.0	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B764	10.8	33.9	0.1	0.0	13.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B200	0.9	2.9	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B733	5.4	17.1	0.1	0.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
L410	1.5	4.8	0.0	0.0	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A330	11.4	36.0	0.2	0.0	14.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B744	19.8	62.4	0.4	0.0	24.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C208	0.7	2.3	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CRJ2	2.3	7.3	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B734	5.9	18.7	0.1	0.0	7.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C550	1.1	3.6	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
AS50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B300	0.9	3.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
AS35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
EC	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
D228	0.9	3.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C206	0.2	0.8	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BN2B	0.4	1.4	0.0	0.0	0.6	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0
B407	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PAY2	0.9	2.9	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A119	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
EC45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C210	0.7	2.3	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
R66	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C750	1.7	5.4	0.0	0.0	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PA38	0.1	0.4	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
EC20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BE20	0.9	2.9	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
GLF5	2.7	8.6	0.0	0.0	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A346	17.6	55.4	0.3	0.0	21.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
G280	1.6	5.1	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
G150	1.3	4.2	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DA90	1.9	5.9	0.0	0.0	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C525	0.9	2.8	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
R44	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
GLF4	3.4	10.8	0.0	0.0	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
EC30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B505	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DHC6	1.3	4.1	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CL30	1.7	5.2	0.0	0.0	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C172	0.3	1.0	0.0	0.0	0.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
U60	1.4	4.3	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
GL7T	3.1	9.7	0.0	0.0	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
P210	0.2	0.8	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BE10	0.8	2.6	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

2.4. Comparación de datos obtenidos

Es imperativo que los datos obtenidos en esta memoria sean comparados con otros valores obtenidos en la industria, así como también obtenidos por pares en otros años. En este caso se utilizarán dos puntos comparativos, como lo son los datos obtenidos por Claudio Flores en su memoria “Estimación de los niveles de actividad y emisiones producidas por el transporte marítimo y aéreo en Chile al 2050” y los contaminantes emitidos por la industria aeronáutica hasta el año 2020 generados por el INGEI.

Comparativa valores obtenidos por la memoria de Claudio Flores.

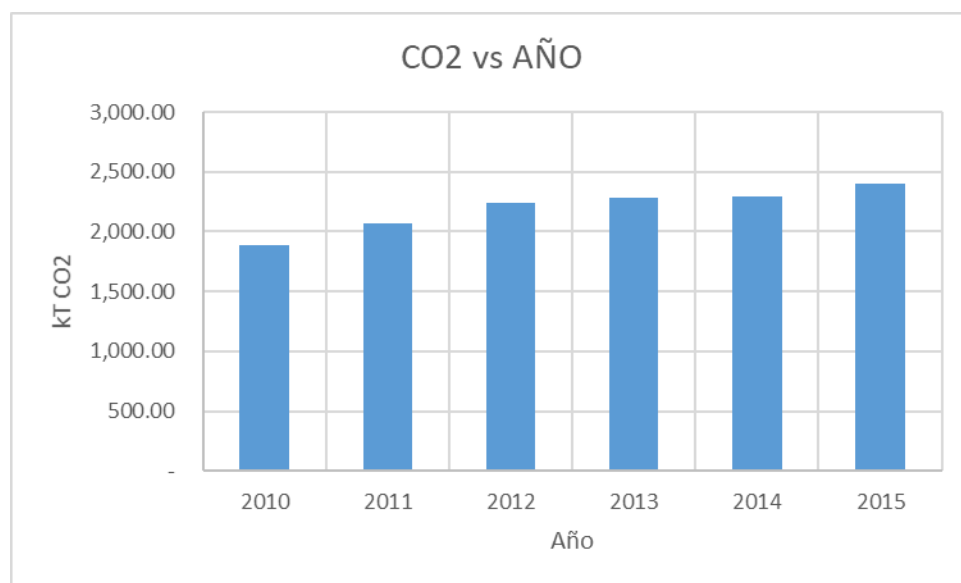


Figura 12. Emisión de CO2 obtenidas 2010-2015, obtenido de “Estimación de los niveles de actividad y emisiones producidas por el transporte marítimo y aéreo en Chile al 2050” (Flores, 2023)

De acuerdo a los datos mostrados en la figura 18, podemos ver que los datos se mueven en torno a los miles de kilotoneladas, por lo cual las estimaciones para tener coherencia en primera instancia deben estar en estas magnitudes.

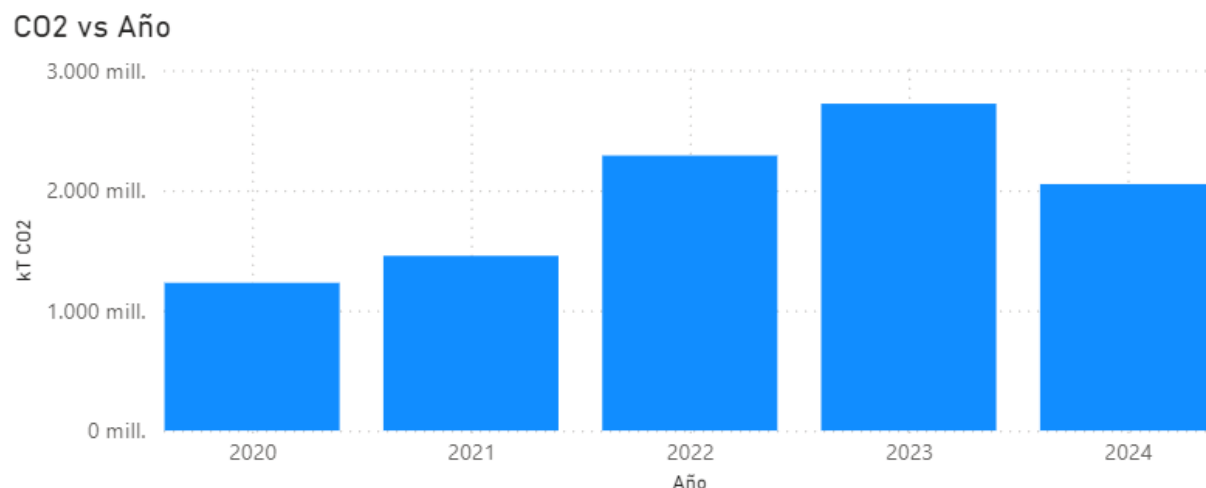


Figura 13. Emisión de CO₂ entre 2020 y 2024 (elaboración propia a partir de datos de la JAC (JAC, 2024))

En esta comparación se puede apreciar una semejanza en relación a los órdenes de magnitud respecto a las emisiones de CO₂ emitidos. En un principio puede no aparentar una relación de los valores entre 2020 y 2015, sin embargo, es importante dar cuenta la pandemia sufrida a nivel mundial, la cual mermo y contribuyó a desestabilizar el correcto desarrollo de la línea de tendencia hasta el 2023 donde ya se vuelve a la tendencia presentada hace años antes de la pandemia.

Comparativa valores obtenidos por el INGEI.

El INGEI recopila datos en relación a las emisiones de CO₂ emitida por categoría y subcategoría, en específico se toma el gráfico generado por el sector energía, apartado de transportes y subcategoría de aviación civil.

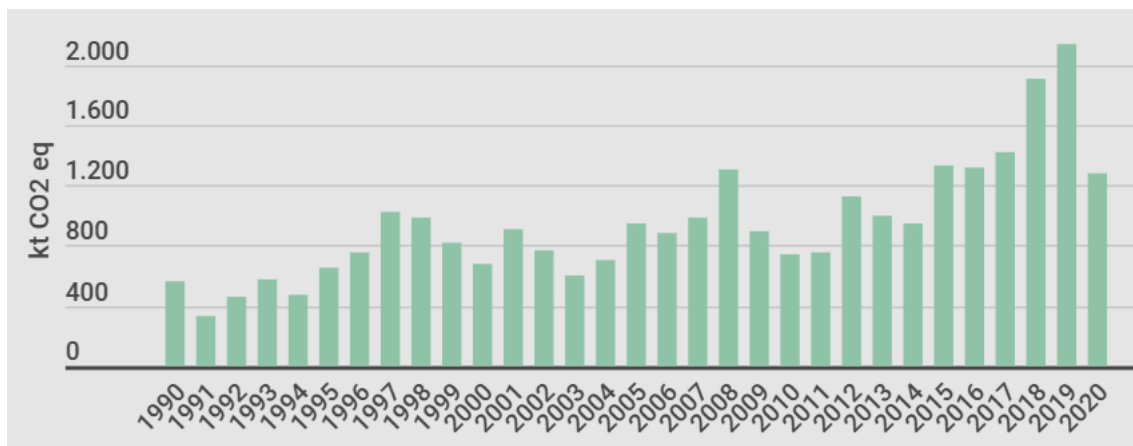


Figura 14. Emisión de CO2 eq producto de la aviación en Chile. Grafico generado por el INGEI 1990-2020

De acuerdo a los datos presentes en la figura 20, podemos dar cuenta que el último dato del que se tiene registro es para el año 2020, el cual es justamente el que utilizaremos para comparar con las estimaciones realizadas en esta memoria

CO2 vs Año

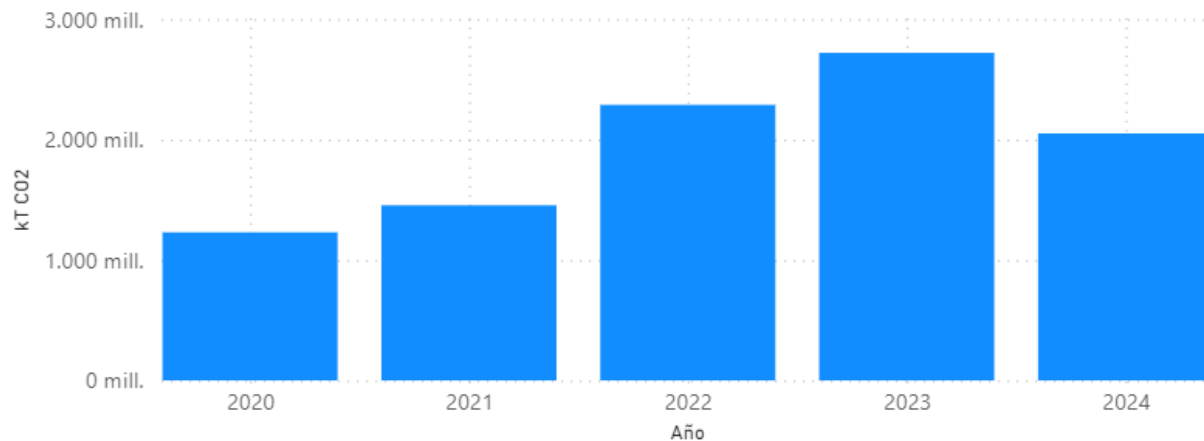


Figura 15. Emisión de CO2 obtenidas 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos obtenidos por la JAC.

En este caso no se comparan líneas de tendencia, si no que se comparan específicamente los valores obtenidos específicamente en el año. Los cuales se presentan a continuación.

Tabla 8. Tabla comparativa datos obtenidos e INGEI CO2 generado 2020. Obtenidos a partir del INGEI y elaboración propia.

CO2 generado [Kg]		
Datos obtenidos	Datos INGEI	ERROR
1,229,720,551	1,283,400,000	4.18%

Como se puede apreciar, el error es inferior al 5%, por consiguiente, se considera un valor aceptable y los datos sirven para seguir desarrollando esta memoria.

2.5. Estimación de contaminantes generados 2020-2024

Con los datos organizados y listos, cada archivo de Excel incluye ahora las tablas de “Aeronaves”, “Latitudes y Longitudes”, “Ciudades y Países” y los valores de contaminantes (con distinciones entre CCD y LTO). Esto permite comenzar los cálculos de los contaminantes generados. Las planillas finales están estructuradas de la siguiente manera:

Planilla LTO-CCD 2023

Tabla 9. Tabla de trabajo de vuelos realizados año 2023. Elaboración propia a partir de datos entregados por la JAC.

ORIGEN	DESTINO	AEROLÍNEA	AVIÓN	FECHA	MODELO	AÑO
Santiago (SCEL)	Guayaquil	LAN Ecuador	A319	24-12-2023	A319-132	2023
Santiago (SCEL)	Caldera	LATAM Cargo	A321	27-08-2023	A321-211	2023
Iquique (SCDA)	Santiago (SCEL)	JAT Airways	A320	15-09-2023	A320-271N	2023
Santiago (SCEL)	Iquique	Sky Airline	A321	19-10-2023	A321N	2023
Santiago (SCEL)	Buenos Aires	LATAM Airline:	A320	06-02-2023	A320-233	2023
Santiago (SCEL)	Ezeiza	LATAM Airline:	A320	30-03-2023	A320-233	2023
Valdivia (SCVD)	Santiago (SCEL)	LATAM Cargo	A320	24-03-2023	A320-233	2023
Caldera (SCFR)	Santiago (SCEL)	LATAM Airline:	A320	04-06-2023	A320-233	2023
Santiago (SCEL)	La Serena	LATAM Airline:	A320	08-10-2023	A320-233	2023
Santiago (SCEL)	Santiago (SCEL)	Sky Airline	A321	15-10-2023	A321-251N	2023
Santiago (SCEL)	Iquique (SCDA)	LATAM Airline:	A320	05-12-2022	A320-233	2022
Antofagasta (SCI)	Santiago (SCEL)	Sky Airline	A320	09-09-2022	A320-251N	2022
La Serena (SCSE)	Santiago (SCEL)	LATAM Airline:	A320	02-05-2022	A320-233	2022

En la tabla 13, se muestra tanto la información original de la JAC como los nuevos datos añadidos de ciudad, país y aerolínea.

2.5.1. Cálculo de emisiones contaminantes LTO

Para el cálculo de las emisiones contaminantes, se utilizará la información recopilada en la tabla numero** y las formulas numero**. Estas fórmulas en Excel se muestran de la siguiente manera

=BUSCARV([@TIPO];Tabla2[#Todo];8;FALSO)*SI([@ADW]="A";0.3;0.7)

Donde:

BUSCARV([@TIPO];Tabla2[#Todo];8;FALSO) Esta fórmula se utiliza para encontrar la cantidad de contaminante generada según la especie seleccionada. En este caso, la especie representada por el número "8" corresponde a los hidrocarburos (HC)

SI([@ADW]) Esta fórmula sirve para multiplicar el valor por 0.7 o 0.3, dependiendo de si se trata de maniobras de ascenso o descenso en el ciclo LTO

Después de aplicar esta fórmula a cada una de las especies en las cinco hojas de cálculo LTO, obtenemos planillas como las siguientes.

Tabla 10. . Extracto de tabla de contaminantes estimados LTO para el año 2023 por vuelo realizado. Elaboración propia a través de datos proporcionados por la ICAO y la JAC.

ORIGEN	DESTINO	AEROLÍNEA	AVIÓN	FECHA	MODELO	AÑO	HC CCD [Kg]	CO CCD [Kg]	NOX CCD [Kg]	CO2 CCD [Kg]	SOX CCD [Kg]	H2O CCD [Kg]	PM non volatile CCD [Kg]	PM volatile (organic+ sulphur) CCD [Kg]	PM TOTAL CCD [Kg]	Distancia [NM]	Latitud origen [°]	Longitud origen [°]	Latitud destino [°]	Longitud destino [°]	Combustible [Kg]
Santiago (SCEL)	Guayaquil	LAN Ecuador	A319	24-12-2023	A319-132	2023	1.3	6.1	46.7	11291.2	3.0	4434.0	0.0	0.5	0.5	698.0	-33.4	-70.7	-23.6	-46.6	2491.8
Santiago (SCEL)	Caldera	LATAM Car	A321	27-08-2023	A321-211	2023	0.1	2.5	36.3	7768.5	2.1	3050.7	0.4	0.2	0.6	375.0	-33.4	-70.7	-45.9	-71.7	1507.6
Iquique (SCDA)	Santiago (SCEL)	JAT Airways	A320	15-09-2023	A320-271f	2023	2.2	9.7	75.0	18121.3	4.8	7116.2	0.0	0.7	0.8	1120.2	-33.4	-70.7	3.5	-76.5	3999.0
Santiago (SCEL)	Iquique	Sky Airline	A321	19-10-2023	A321N	2023	0.2	1.0	7.8	1889.3	0.5	741.9	0.0	0.1	0.1	116.8	-36.8	-73.0	-33.4	-70.7	416.9
Santiago (SCEL)	Buenos Aires	LATAM Airli	A320	06-02-2023	A320-233	2023	0.5	14.4	116.7	35802.6	9.5	14059.6	0.1	1.2	1.3	1149.6	-33.4	-70.7	4.7	-74.1	7127.8
Santiago (SCEL)	Ezeiza	LATAM Airli	A320	30-03-2023	A320-233	2023	0.3	1.2	9.1	2201.9	0.6	864.7	0.0	0.1	0.1	136.1	-41.5	-72.9	-45.9	-71.7	485.9
Valdivia (SCVD)	Santiago (SCEL)	LATAM Car	A320	24-03-2023	A320-233	2023	0.8	3.5	26.9	6490.6	1.7	2548.9	0.0	0.3	0.3	401.2	-23.7	-70.4	-36.8	-73.0	1432.4
Caldera (SCFR)	Santiago (SCEL)	LATAM Airli	A320	04-06-2023	A320-233	2023	1.3	6.1	46.7	11291.2	3.0	4434.0	0.0	0.5	0.5	698.0	-33.4	-70.7	-23.6	-46.6	2491.8
Santiago (SCEL)	La Serena	LATAM Airli	A320	08-10-2023	A320-233	2023	0.1	1.1	13.2	3203.4	0.9	1258.0	0.0	0.1	0.1	191.6	-33.4	-70.7	-27.1	-70.8	632.4
Santiago (SCEL)	Iquique (SCDA)	Sky Airline	A321	15-10-2023	A321-251f	2023	0.2	1.0	7.8	1889.3	0.5	741.9	0.0	0.1	0.1	116.8	-36.8	-73.0	-33.4	-70.7	416.9
Santiago (SCEL)	Iquique (SCDA)	LATAM Airli	A320	05-12-2022	A320-233	2022	0.8	3.5	26.6	6431.2	1.7	2525.5	0.0	0.3	0.3	397.6	-33.4	-70.7	-20.2	-70.2	1419.3
Antofagasta (SCF)	Santiago (SCEL)	Sky Airline	A320	09-09-2022	A320-251f	2022	0.6	2.6	19.7	4760.1	1.3	1869.3	0.0	0.2	0.2	294.3	-23.7	-70.4	-33.4	-70.7	1050.5
La Serena (SCSE)	Santiago (SCEL)	LATAM Airli	A320	02-05-2022	A320-233	2022	0.2	0.9	7.2	1738.9	0.5	682.9	0.0	0.1	0.1	107.5	-29.9	-71.3	-33.4	-70.7	383.7

De este modo, en la tabla 14 para cada vuelo, se obtiene la cantidad de cada especie de contaminante generada, expresada en kilogramos para ese vuelo en particular. Es importante notar que las columnas de contaminantes generados no son del vuelo completo, sino que, de la maniobra del vuelo realizada, es decir, si es A es el contaminante generado durante el aterrizaje y si es D es durante el despegue

2.5.2. Cálculo de emisiones contaminantes CCD

Para calcular las emisiones contaminantes de los vuelos durante las fases de crucero (CCD), utilizamos la siguiente fórmula:

$$=BUSCARV([\text{@TIPO}];\text{Tabla8}[\#\text{Todo}];8;\text{FALSO})*[\text{@Distancia (NM)}]$$

Donde:

$BUSCARV([\text{@TIPO}];\text{Tabla2}[\#\text{Todo}];8;\text{FALSO})$ Esta fórmula nos permite calcular la cantidad de contaminante generada por milla náutica recorrida, según la especie seleccionada. En este caso, el número "8" corresponde a los hidrocarburos (HC).

$[\text{@Distancia (NM)}]$ Esta fórmula nos permite obtener la cantidad de millas náuticas recorridas en el viaje específico

Ahora bien, la fórmula " $[\text{@Distancia (NM)}]$ " se formula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} &= (6371 * 2 * \text{ASENO}(\text{RAIZ}(\text{SENO}(\text{RADIANTES}([\text{@Latitud origen}]) - [\text{@Latitud destino}]) / 2)^2 \\ &+ \text{COS}(\text{RADIANTES}([\text{@Latitud origen}])) * \text{COS}(\text{RADIANTES}([\text{@Latitud destino}])) * \\ &\text{SENO}(\text{RADIANTES}([\text{@Longitud origen}]) - [\text{@Longitud destino}]) / 2)^2) * 0.5) / 1.852 \end{aligned}$$

Donde:

La primera parte de la expresión es la fórmula haversine, que se utiliza para calcular la distancia entre dos puntos en una esfera. En este caso, nos permite aproximar las distancias entre aeropuertos, ya que las diferencias con respecto a las rutas aéreas reales son mínimas.

El " $*0.5$ " sirve para dividir la distancia total en dos, ya que cada fila corresponde solo a una maniobra de despegue o de aterrizaje. Por lo tanto, una maniobra de despegue más unas de

aterrizaje conformarían un recorrido completo de un punto a otro.

Por otro lado, el “/1,852” se utiliza para convertir los kilómetros en millas náuticas.

Aplicando todas estas fórmulas a las planillas de CCD, se logra obtener esta nueva tabla:

Tabla 11. Extracto de tabla de contaminantes estimados CCD para el año 2023 por vuelo realizado. Elaboración propia a través de datos proporcionados por la ICAO y la JAC

ORIGEN	DESTINO	AEROLÍNEA	AVIÓN	FECHA	MODELO	AÑO	HC CCD [Kg]	CO CCD [Kg]	NOX CCD [Kg]	CO2 CCD [Kg]	SOX CCD [Kg]	H2O CCD [Kg]	PM non volatile CCD [Kg]	PM volatile (organic+sulphurous) CCD [Kg]	PM TOTAL [Kg]	Distancia [NM]	Latitud origen [°]	Longitud origen [°]	Latitud destino [°]	Longitud destino [°]	Combustible [Kg]
Santiago (SCEL)	Guayaquil	IAN Ecuador	A319	24-12-2023	A319-132	2023	1.3	6.1	46.7	11291.2	3.0	4434.0	0.0	0.5	0.5	698.0	-33.4	-70.7	-23.6	-46.6	2491.8
Santiago (SCEL)	Caldera	LATAM Cargo	A321	27-08-2023	A321-211	2023	0.1	2.5	36.3	7768.5	2.1	3050.7	0.4	0.2	0.6	375.0	-33.4	-70.7	-45.9	-71.7	1507.6
Iquique (SCDA)	Santiago (SCEL)	JAT Airways	A320	15-09-2023	A320-271N	2023	2.2	9.7	75.0	18121.3	4.8	7116.2	0.0	0.7	0.8	1120.2	-33.4	-70.7	3.5	-76.5	3999.0
Santiago (SCEL)	Iquique	Sky Airline	A321	19-10-2023	A321N	2023	0.2	1.0	7.8	1889.3	0.5	741.9	0.0	0.1	0.1	116.8	-36.8	-73.0	-33.4	-70.7	416.9
Santiago (SCEL)	Buenos Aires	LATAM Airline	A320	06-02-2023	A320-233	2023	0.5	14.4	116.7	35802.6	9.5	14059.6	0.1	1.2	1.3	1149.6	-33.4	-70.7	4.7	-74.1	7127.8
Santiago (SCEL)	Ezeiza	LATAM Airline	A320	30-03-2023	A320-233	2023	0.3	1.2	9.1	2201.9	0.6	864.7	0.0	0.1	0.1	136.1	-41.5	-72.9	-45.9	-71.7	485.9
Valdivia (SCVD)	Santiago (SCEL)	LATAM Cargo	A320	24-03-2023	A320-233	2023	0.8	3.5	26.9	6490.6	1.7	2548.9	0.0	0.3	0.3	401.2	-23.7	-70.4	-36.8	-73.0	1432.4
Caldera (SCFR)	Santiago (SCEL)	LATAM Airline	A320	04-06-2023	A320-233	2023	1.3	6.1	46.7	11291.2	3.0	4434.0	0.0	0.5	0.5	698.0	-33.4	-70.7	-23.6	-46.6	2491.8
Santiago (SCEL)	La Serena	LATAM Airline	A320	08-10-2023	A320-233	2023	0.1	1.1	13.2	3203.4	0.9	1258.0	0.0	0.1	0.1	191.6	-33.4	-70.7	-27.1	-70.8	632.4
Santiago (SCEL)	Santiago (SCEL)	Sky Airline	A321	15-10-2023	A321-251N	2023	0.2	1.0	7.8	1889.3	0.5	741.9	0.0	0.1	0.1	116.8	-36.8	-73.0	-33.4	-70.7	416.9
Santiago (SCEL)	Iquique (SCDA)	LATAM Airline	A320	05-12-2022	A320-233	2022	0.8	3.5	26.6	6431.2	1.7	2525.5	0.0	0.3	0.3	397.6	-33.4	-70.7	-20.2	-70.2	1419.3
Antofagasta (SC)	Santiago (SCEL)	Sky Airline	A320	09-09-2022	A320-251N	2022	0.6	2.6	19.7	4760.1	1.3	1869.3	0.0	0.2	0.2	294.3	-23.7	-70.4	-33.4	-70.7	1050.5
La Serena (SCSE)	Santiago (SCEL)	LATAM Airline	A320	02-05-2022	A320-233	2022	0.2	0.9	7.2	1738.9	0.5	682.9	0.0	0.1	0.1	107.5	-29.9	-71.3	-33.4	-70.7	383.7

2.6. Proyección de emisiones y creación de escenarios

Para proyectar los vuelos, utilizaremos la herramienta de previsión de Power BI, que nos permite hacer predicciones sobre series temporales, como la cantidad de vuelos por año, basándonos en los datos históricos disponibles. Esta herramienta aplica modelos estadísticos para extrapolar tendencias futuras a partir de los patrones observados en el pasado.

Por otro lado, para la creación de escenarios futuros se tomarán en cuenta 3 variables:

- Porcentaje de aeronaves a utilizar
- Tipo de combustible a utilizar, en específico los SAF
- Variaciones en el aumento del número de vuelos (Variación porcentual de la previsión generada)

2.6.1. Proyección de vuelos

Para proyectar el número de vuelos, como se mencionó anteriormente, utilizaremos la herramienta de previsión de datos, que nos permite estimar datos futuros basados en la información existente. Aunque solo disponemos de datos anuales de cuatro años (debido a que

el año 2024 está incompleto), cada uno de estos años incluye información diaria proporcionada por la JAC. Es importante omitir los años de la pandemia, ya que podrían distorsionar las proyecciones futuras. A continuación, se presentan los vuelos proyectados:

Gráfico: Proyección vuelos internacionales con intervalo de confianza 95%

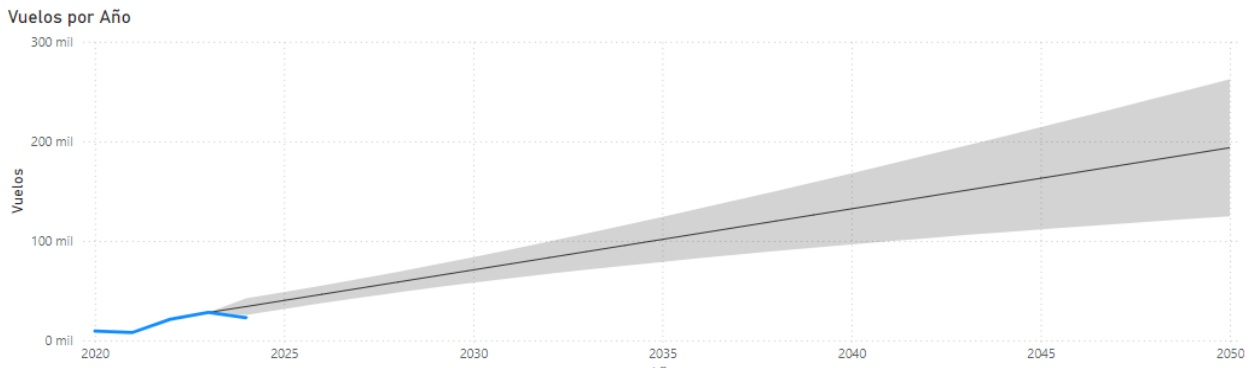


Figura 16. Proyección de vuelos internacionales al 2050 con un 95% de confianza. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.

En la figura 22, se muestra como se genera una proyección de vuelos hasta el año 2050 tomando la opción de “previsión” de Power Bi. Es importante que no se puede tomar el año 2024 para la generación de esta previsión, ya que no se tienen los datos completos de dicho año

Tabla: Forecast de vuelos internacionales con intervalo superior e inferior

Tabla 12. Tabla de Previsión con límite superior e inferior de vuelos internacionales. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC

AÑO	PREVISION	SUPERIOR	INFERIOR
2023	96098	96098	96098
2024	112722	118300	107144
2025	128285	134036	122533
2026	143848	149768	137927
2027	159410	165497	153324
2028	174973	181223	168724
2029	190536	196945	184127
2030	206099	212665	199533
2031	221662	228383	214941
2032	237225	244098	230351
2033	252787	259811	245764
2034	268350	275522	261179
2035	283913	291231	276595
2036	299476	306938	292013
2037	315039	322644	307433
2038	330601	338348	322855
2039	346164	354051	338278
2040	361727	369752	353702
2041	377290	385452	369128
2042	392853	401150	384555
2043	408416	416848	399983
2044	423978	432544	415413
2045	439541	448239	430843
2046	455104	463933	446275
2047	470667	479626	461707
2048	486230	495319	477141
2049	501792	511010	492575
2050	517355	526700	508010

En la tabla 16, por otro lado, se muestran los valores de las proyecciones tanto para las estimaciones superiores como para las inferiores en el intervalo de confianza del 95%.

Gráfico: Proyección vuelos nacionales con intervalo de confianza 95%

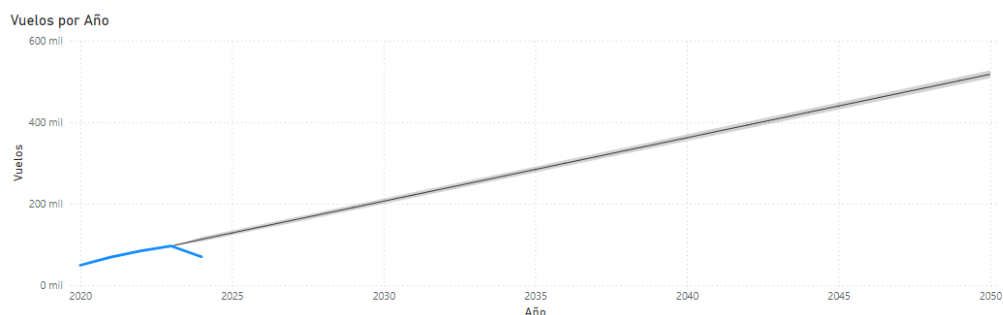


Figura 17. Proyección de vuelos nacionales al 2050 con un 95% de confianza. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.

En la figura 23, se realizó la previsión de manera similar que para los vuelos internacionales.

Tabla: Forecast de vuelos nacionales con intervalo superior e inferior

Tabla 13. Tabla de Previsión con límite superior e inferior de vuelos nacionales. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC

AÑO	PREVISION	SUPERIOR	INFERIOR
2023	28156	28156	28156
2024	34067	42360	25773
2025	40200	48656	31744
2026	46333	55143	37524
2027	52467	61872	43062
2028	58600	68865	48336
2029	64734	76123	53345
2030	70867	83628	58106
2031	77001	91356	62645
2032	83134	99283	66985
2033	89267	107388	71147
2034	95401	115650	75151
2035	101534	124057	79012
2036	107668	132595	82741
2037	113801	141254	86348
2038	119935	150026	89843
2039	126068	158905	93231
2040	132201	167885	96518
2041	138335	176960	99710
2042	144468	186128	102809
2043	150602	195383	105820
2044	156735	204724	108747
2045	162869	214146	111591
2046	169002	223649	114355
2047	175135	233229	117042
2048	181269	242884	119654
2049	187402	252613	122192
2050	193536	262413	124658

En la tabla 17, se recopilamos los datos de manera similar que para los vuelos internacionales.

2.6.2. Variables de creación de escenarios

Como se mencionó anteriormente, se incurrirá en la creación de escenarios futuros a partir de 3 tópicos específicos:

Porcentaje de aeronaves a utilizar

A lo largo de esta memoria, hemos recopilado diversa información. Una de las más importantes es el porcentaje de ocupación de las aeronaves según el tipo de vuelo (nacional o internacional). Estos porcentajes serán de gran ayuda para prever cuántas aeronaves se utilizarán en el futuro y para probar nuevos escenarios. Por otro lado, también se ha mencionado el cambio de paradigmas, siendo uno de los más claros la transición de aeronaves "Jumbo" a otras de menor capacidad de pasajeros, como el A320, o de igual capacidad, pero con menor consumo de combustible y emisiones contaminantes, como el A20N. A continuación, se muestran los porcentajes que se utilizarán para las previsiones de vuelos por aeronave y los valores que serán sometidos a cambios.

Tabla: Porcentaje de uso aeronaves nacional

Tabla 14. Tabla de participación de aeronaves entre los años 2020-2023 para vuelos nacionales. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.

TIPO	Vuelos	% Vuelos
A320	179502	60,17%
A321	75287	25,24%
A21N	15250	5,11%
A20N	15178	5,09%
A319	3336	1,12%
RJ85	2187	0,73%
B789	1793	0,60%
RJ1H	1781	0,60%
B788	1679	0,56%
B462	1491	0,50%
PA31	406	0,14%
L410	139	0,05%
B200	125	0,04%
C208	78	0,03%
AS50	13	0,00%
C550	13	0,00%
B300	8	0,00%
A535	5	0,00%
BN2B	5	0,00%
C206	4	0,00%
EC	4	0,00%
B407	3	0,00%
C210	3	0,00%
A119	2	0,00%
EC20	2	0,00%
PAY2	2	0,00%
B505	1	0,00%
B733	1	0,00%
C172	1	0,00%
DHC6	1	0,00%
E190	1	0,00%
EC30	1	0,00%
EC45	1	0,00%
GLF5	1	0,00%
P210	1	0,00%
PA38	1	0,00%

De acuerdo con la tabla 18, durante el periodo 2020 a 2024 un 60% de los vuelos se hizo por medio de un A320, mientras que un 25% por A321, esta tabla será de mucha ayuda para realizar la proyección de vuelos de acuerdo a aeronave utilizada.

Tabla: Porcentaje de uso aeronaves internacional

Tabla 15. Tabla de participación de aeronaves entre los años 2020-2023 para vuelos internacionales. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC

TIPO	Vuelos	% Vuelos
A320	28865	42,94%
B789	8357	12,43%
B788	7749	11,53%
B738	5900	8,78%
A321	2827	4,21%
A359	2259	3,36%
A319	2107	3,13%
A21N	1896	2,82%
B763	1146	1,70%
A20N	1135	1,69%
B772	934	1,39%
A332	649	0,97%
B737	597	0,89%
E190	567	0,84%
B39M	486	0,72%
B739	319	0,47%
B37M	309	0,46%
A333	293	0,44%
B77W	197	0,29%
B773	178	0,26%
B764	135	0,20%
A330	79	0,12%
B733	67	0,10%
B38M	58	0,09%
B744	58	0,09%
CRJ2	42	0,06%
B734	13	0,02%
RJ1H	2	0,00%
A346	1	0,00%
RJ85	1	0,00%

La tabla 19, muestra que durante los años 2020 a 2024 un 42% de los vuelos internacionales fueron realizados por un A320, mientras que un 12% por un B789. Esta tabla ayudara también a realizar una proyección de vuelos realizados según aeronave.

Porcentaje de combustible SAF utilizado

Otra variable en la creación de escenarios es el porcentaje de uso de SAF (Combustible de Aviación Sostenible). Dependiendo de la cantidad de SAF que se utilice en las aeronaves, se traducirá en una reducción de los gases de efecto invernadero netos a lo largo de todo el proceso. Es decir, las aeronaves seguirán emitiendo contaminantes, pero si el SAF proviene de fabricación nacional, esto producirá una disminución en las emisiones netas al considerar todo el ciclo, desde la producción del combustible hasta su emisión.

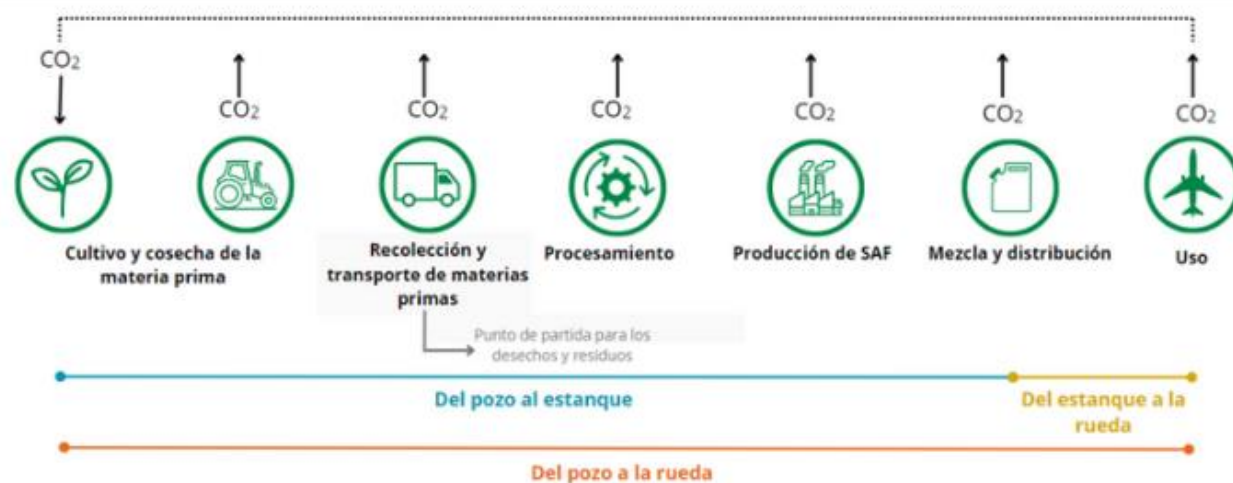


Figura 18. Ciclo de vida de los SAF. Vuelo limpio.

Es importante mencionar que el potencial para reducir los gases de efecto invernadero (GEI) está estrechamente relacionado con la cantidad de GEI que se utiliza en la producción del combustible y cuánto se emite durante todo el proceso de transporte, fabricación y combustión del producto.

Variaciones en el aumento del número de vuelos (Variación porcentual de la previsión generada)

Finalmente, consideramos la variación porcentual de los vuelos. Aunque al principio hicimos una previsión basada en una extrapolación de datos, es interesante crear escenarios donde los vuelos

aumenten más allá de los límites de confianza establecidos por el pronóstico. Esto nos permite observar cómo se comportan los valores de generación de contaminantes en esas situaciones-

2.6.3. Planilla de creación de escenarios

Crearemos los escenarios utilizando Excel, ya que es una herramienta práctica que nos permite variar valores de manera rápida y sencilla. A continuación, presentamos la cantidad de vuelos previstos por aeronave y por año, basándonos en los datos históricos extraídos de la JAC

Tabla proyección de uso de aeronaves nacional

Tabla 16. Extracto de tabla de proyección de vuelos nacionales generados por aeronave al 2050. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.

AÑO	A320	A321	A21N	A20N	A319	RJ85	B789	RJ1H	B788
2023	4912.722171	4889.52768	57825.80034	24253.38453	1074.678109	704.5326812	577.607269	573.7415205	540.8826574
2024	5762.574336	5735.367428	67829.08974	28448.97928	1260.586753	826.4098409	677.5275925	672.9931077	634.4499876
2025	6558.186057	6527.222818	77193.93532	32376.79696	1434.630078	940.5083874	771.0706623	765.9101225	722.0455338
2026	7353.797778	7319.078208	86558.7809	36304.61464	1608.673402	1054.606934	864.6137322	858.8271372	809.64108
2027	8149.358377	8110.882718	95923.02475	40232.17994	1782.705544	1168.698149	958.1507915	951.7381816	897.2309977
2028	8944.970098	8902.738108	105287.8703	44159.99762	1956.748869	1282.796695	1051.693861	1044.655196	984.8265439
2029	9740.581819	9694.593498	114652.7159	48087.8153	2130.792193	1396.895242	1145.236931	1137.572211	1072.42209
2030	10536.19354	10486.44889	124017.5615	52015.63298	2304.835518	1510.993788	1238.780001	1230.489226	1160.017636
2031	11331.80526	11278.30428	133382.4071	55943.45066	2478.878843	1625.092335	1332.323071	1323.406241	1247.613182
2032	12127.41698	12070.15967	142747.2527	59871.26835	2652.922167	1739.190881	1425.866141	1416.323255	1335.208729
2033	12922.97758	12861.96418	152111.4965	63798.83364	2826.954309	1853.282096	1519.4032	1509.2343	1422.798646
2034	13718.5893	13653.81957	161476.3421	67726.65132	3000.997633	1967.380643	1612.94627	1602.151314	1510.394193
2035	14514.20102	14445.67496	170841.1877	71654.469	3175.040958	2081.479189	1706.48934	1695.068329	1597.989739
2036	15309.81274	15237.53035	180206.0332	75582.28669	3349.084283	2195.577736	1800.03241	1787.985344	1685.585285
2037	16105.42446	16029.38574	189570.8788	79510.10437	3523.127607	2309.676282	1893.57548	1880.902359	1773.180831
2038	16900.98506	16821.19025	198935.1227	83437.66966	3697.159749	2423.767497	1987.112539	1973.813403	1860.770749
2039	17696.59678	17613.04564	208299.9682	87365.48735	3871.203073	2537.866044	2080.655609	2066.730418	1948.366295
2040	18492.2085	18404.90103	217664.8138	91293.30503	4045.246398	2651.96459	2174.198679	2159.647433	2035.961841
2041	19287.82022	19196.75642	227029.6594	95221.12271	4219.289723	2766.063137	2267.741748	2252.564447	2123.557387
2042	20083.43195	19988.61181	236394.505	99148.94039	4393.333047	2880.161683	2361.284818	2345.481462	2211.152934
2043	20879.04367	20780.4672	245759.3506	103076.7581	4567.376372	2994.260229	2454.827888	2438.398477	2298.74848
2044	21674.60427	21572.27171	255123.5944	107004.3234	4741.408513	3108.351444	2548.364947	2531.309521	2386.338397
2045	22470.21599	22364.1271	264488.44	110932.141	4915.451838	3222.449991	2641.908017	2624.226536	2473.933944
2046	23265.82771	23155.98249	273853.2856	114859.9587	5089.495163	3336.548537	2735.451087	2717.143551	2561.52949
2047	24061.43943	23947.83788	283218.1312	118787.7764	5263.538487	3450.647084	2828.994157	2810.060565	2649.125036
2048	24857.05115	24739.69327	292582.9767	122715.5941	5437.581812	3564.74563	2922.537227	2902.97758	2736.720582
2049	25652.61175	25531.49778	301947.2206	126643.1594	5611.613953	3678.836845	3016.074286	2995.888624	2824.3105
2050	26448.22347	26323.35317	311312.0662	130570.9771	5785.657278	3792.935392	3109.617356	3088.805639	2911.906046

En la tabla 20, se presentan las proyecciones de vuelos realizados, esta tabla se realizó gracias a las previsiones realizadas en la figura 23 y los porcentajes de participación de cada aeronave en la tabla 18.

Tabla proyección de uso de aeronaves internacional

Tabla 17. Extracto de proyección de vuelos internacionales generados por aeronave al 2050. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC

AÑO	A320	B789	B788	B738	A321	A359	A319	A21N	B763	A20N	B772
2023	475.3675661	3500.129295	3245.483057	2471.073692	794.0941897	946.1280457	882.4664862	1184.021242	479.9746527	12644	391.1835302
2024	575.1650403	4234.937658	3926.831628	2989.844703	960.8043317	1144.755794	1067.729286	1432.591691	580.739327	15298.44964	473.3076191
2025	678.7106179	4997.34329	4633.769672	3528.099247	1133.775623	1350.843424	1259.950019	1690.497724	685.2884301	18052.5927	558.5160503
2026	782.2561955	5759.748922	5340.707717	4066.353792	1306.746913	1556.931053	1452.170752	1948.403757	789.8375331	20806.73576	643.7248816
2027	885.8186565	6522.278865	6047.76103	4604.6961	1479.746408	1763.052286	1644.422827	2206.351843	894.4036831	23561.32789	728.9468063
2028	989.3642341	7284.684497	6754.699075	5142.950644	1652.717699	1969.139916	1836.643561	2464.257876	998.9527861	26315.47095	814.1552376
2029	1092.926695	8047.214441	7461.752387	5681.292952	1825.717193	2175.261149	2028.895636	2722.205962	1103.518936	29070.06308	899.3775623
2030	1196.472273	8809.620073	8168.690432	6219.547497	1998.688484	2381.348779	2221.116369	2980.111595	1208.068039	31824.20614	984.5859935
2031	1300.034734	9572.150016	8875.743745	6757.889805	2171.687978	2587.470012	2413.368444	3238.060081	1312.634189	34578.79827	1069.808318
2032	1403.580311	10334.55565	9582.68179	7296.144349	2344.659269	2793.557641	2605.589177	3495.966114	1417.183292	37332.94133	1155.016749
2033	1507.125889	11096.96128	10289.61983	7834.398893	2517.63056	2999.645271	2797.80991	3753.872148	1521.732395	40087.08439	1240.225181
2034	1610.68835	11859.49122	10996.67315	8372.741201	2690.630054	3205.766504	2990.061985	4011.820233	1626.298545	42841.67652	1325.447505
2035	1714.233927	12621.89686	11703.61119	8910.995746	2863.601345	3411.854134	3182.282718	4269.726267	1730.847648	45595.81958	1410.655937
2036	1817.796388	13384.4268	12410.6645	9449.338054	3036.600839	3617.975367	3374.534793	4527.674352	1835.413798	48350.41171	1495.878261
2037	1921.341966	14146.83243	13117.60255	9987.592598	3209.57213	3824.062996	3566.755526	4785.580386	1939.962901	51104.55477	1581.086693
2038	2024.90427	14909.36237	13824.65586	10525.93491	3382.571624	4030.184229	3759.007601	5043.528471	2044.529051	53859.1469	1666.309017
2039	2128.450004	15671.76801	14531.59391	11064.18945	3555.542915	4236.271859	3951.228334	5301.434505	2149.078154	56613.28996	1751.517449
2040	2231.995582	16434.17364	15238.53195	11602.44399	3728.514206	4442.359489	4143.449067	5559.340538	2253.627257	59367.43302	1836.72588
2041	2335.558043	17196.70358	15945.58526	12140.7863	3901.5137	4648.480722	4335.701142	5817.288623	2358.193407	62122.02515	1921.948205
2042	2439.103621	17959.10921	16652.52331	12679.04085	4074.484991	4854.568352	4527.921875	6075.194657	2462.74251	64876.16821	2007.156636
2043	2542.666082	18721.63916	17359.57662	13217.38316	4247.484855	5060.689584	4720.173951	6333.142742	2567.30866	67630.76034	2092.378961
2044	2646.211659	19484.04479	18066.51467	13755.6377	4420.455776	5266.777214	4912.394684	6591.048776	2671.857763	70384.9034	2177.587392
2045	2749.77412	20246.57473	18773.56798	14293.98001	4593.45527	5472.898447	5104.646759	6848.996861	2776.423913	73139.49552	2262.809716
2046	2853.319698	21008.98036	19480.50602	14832.23455	4766.426561	5678.986077	5296.867492	7106.902895	2880.973016	75893.63859	2348.01848
2047	2956.865275	21771.386	20187.44407	15370.4891	4939.397852	5885.073707	5489.088225	7364.808928	2985.522119	78647.78165	2433.226579
2048	3060.427736	22533.91594	20894.49738	15908.8314	5112.397346	6091.194939	5681.3403	7622.757014	3090.088269	81402.37377	2518.448904
2049	3163.973314	23296.32157	21601.43543	16447.08595	5285.368637	6297.282569	5873.561033	7880.663047	3194.637372	84156.51683	2603.657335
2050	3267.535775	24058.85152	22308.48874	16985.42826	5458.368111	6503.403802	6065.813108	8138.611133	3299.203522	86911.10896	2688.87966

En la tabla 21, se presenta la previsión de vuelos realizados por aeronaves de acuerdo a diferentes años, esto también se realizó con ayuda de la proyección realizada en la figura 22 y la participación de aeronaves en la tabla 19.

3. Resultados y análisis

3.1.1. Resultados estimaciones contaminantes LTO

Los resultados obtenidos de las cinco hojas de cálculo LTO para los años 2020 a 2024 se cargaron en Power BI, donde se generó un dashboard para visualizar mejor la información calculada. En cuanto a las emisiones estimadas, se guardaron en dashboards separados para analizar detalladamente cada una de las especies

Dashboard: CO2 LTO

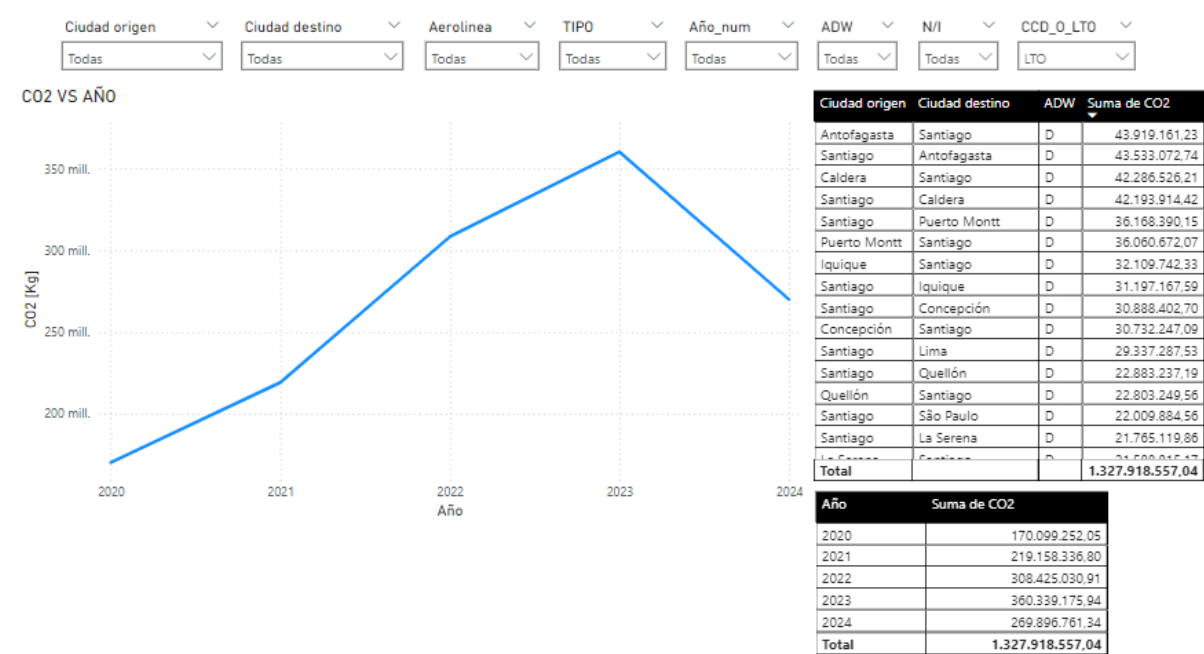


Figura 19. Dashboard para visualización de CO2 LTO generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC

El dióxido de carbono, principal responsable del cambio climático, muestra un crecimiento sostenido. En 2021, las emisiones aumentaron un 28.84%, probablemente debido a la reactivación de la actividad aérea tras una contracción en 2020. El año 2022 evidenció un incremento aún mayor, alcanzando un 40.65%, reflejo de un repunte acelerado en las operaciones. Sin embargo, en 2023, el crecimiento se moderó a un 16.87%, lo que sugiere una estabilización en la actividad o mejoras operativas.

Dashboard: CO LTO

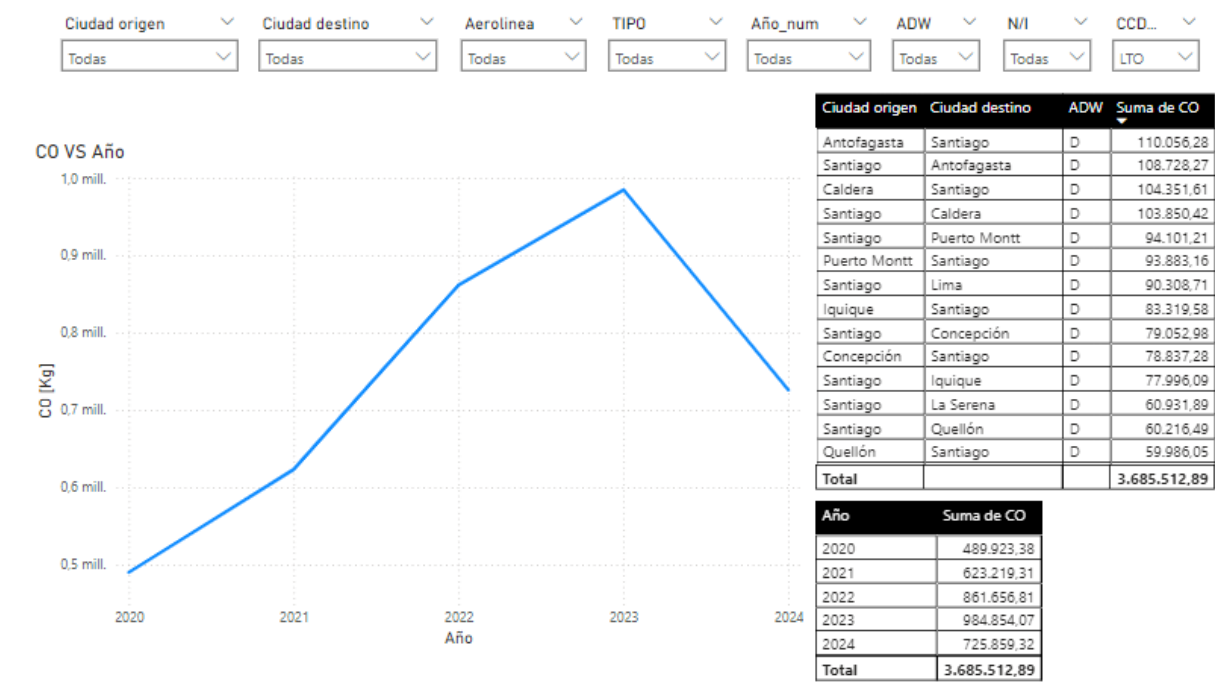


Figura 20. Dashboard para visualización de CO LTO generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC

El monóxido de carbono sigue una tendencia similar al CO2. En 2021, las emisiones crecieron un 29.19%, mientras que en 2022 el aumento fue del 36.14%, marcando un crecimiento significativo. Para 2023, el ritmo de crecimiento se redujo al 14.31%, lo que podría estar relacionado con mejoras en la eficiencia de los motores o un mejor control en la combustión.

Dashboard: HC LTO

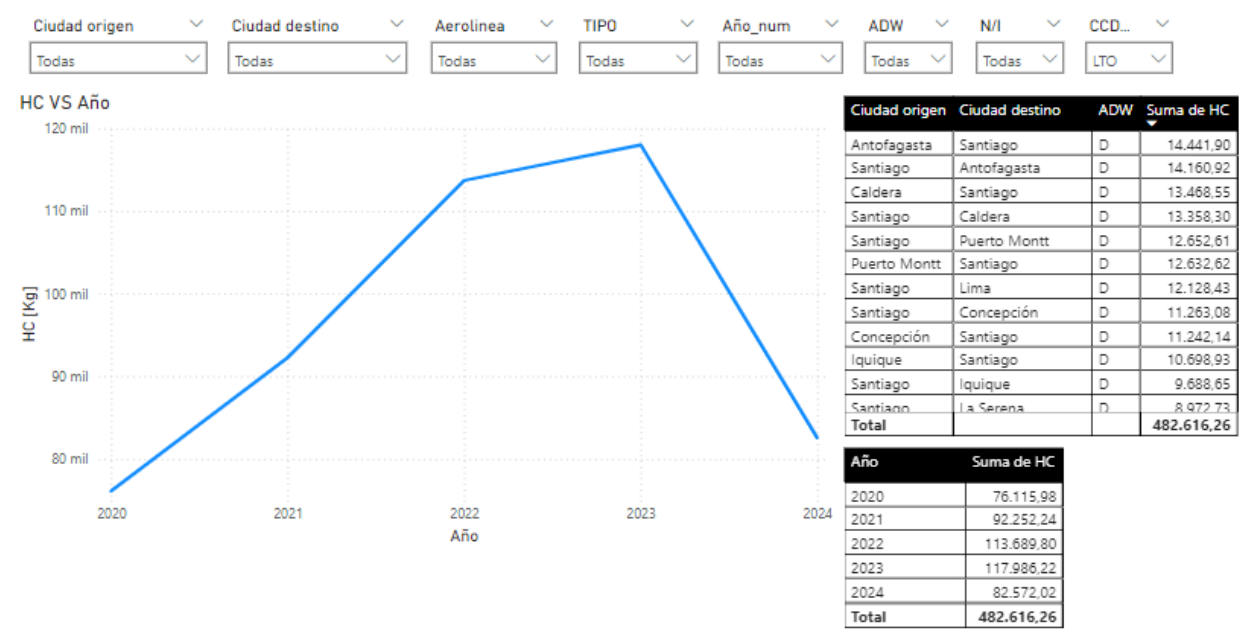


Figura 21. Dashboard para visualización de HC LTO generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC

Los hidrocarburos no quemados, asociados a una combustión incompleta, aumentaron un 21.20% en 2021 y un 23.24% en 2022, reflejando una tendencia de crecimiento sostenido. En 2023, el incremento fue más leve, con solo un 3.76%, lo que podría indicar mejoras en la tecnología de combustión o cambios en la calidad del combustible utilizado.

Dashboard: H2O LTO

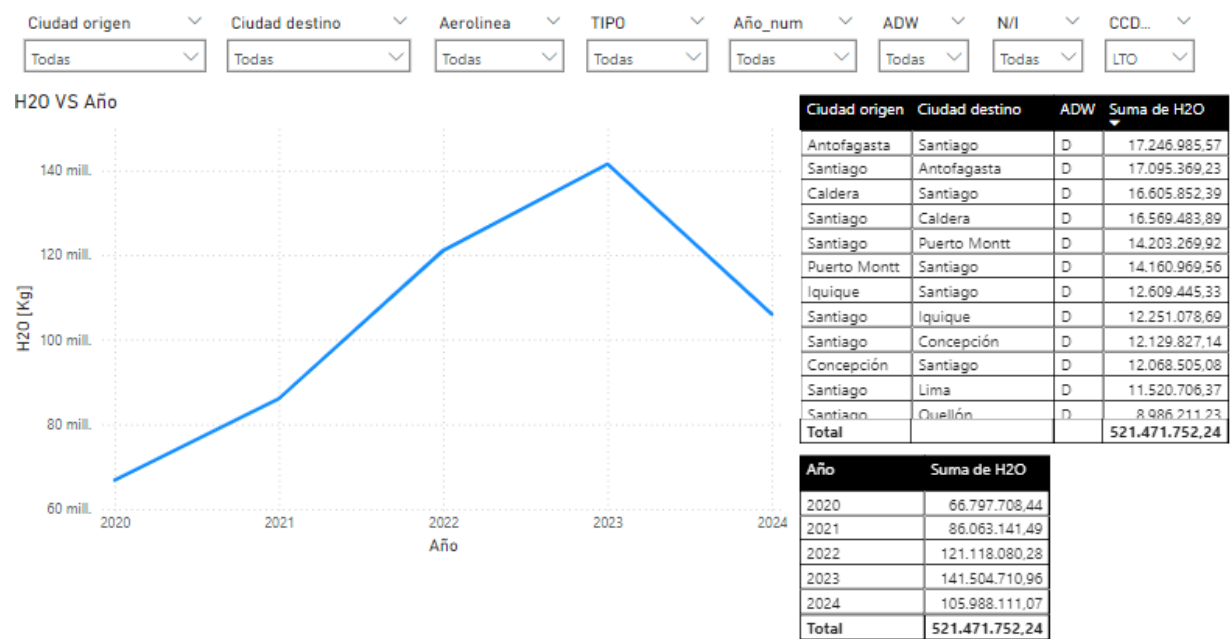


Figura 22. Dashboard para visualización de H2O LTO generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC

El vapor de agua, un subproducto directo de la quema de combustibles fósiles, registró un incremento del 28.53% en 2021 y un notable 40.68% en 2022, manteniéndose en línea con el comportamiento del CO2. En 2023, el aumento se desaceleró a un 16.87%, posiblemente debido a la estabilización del volumen de operaciones.

Dashboard: NOX LTO

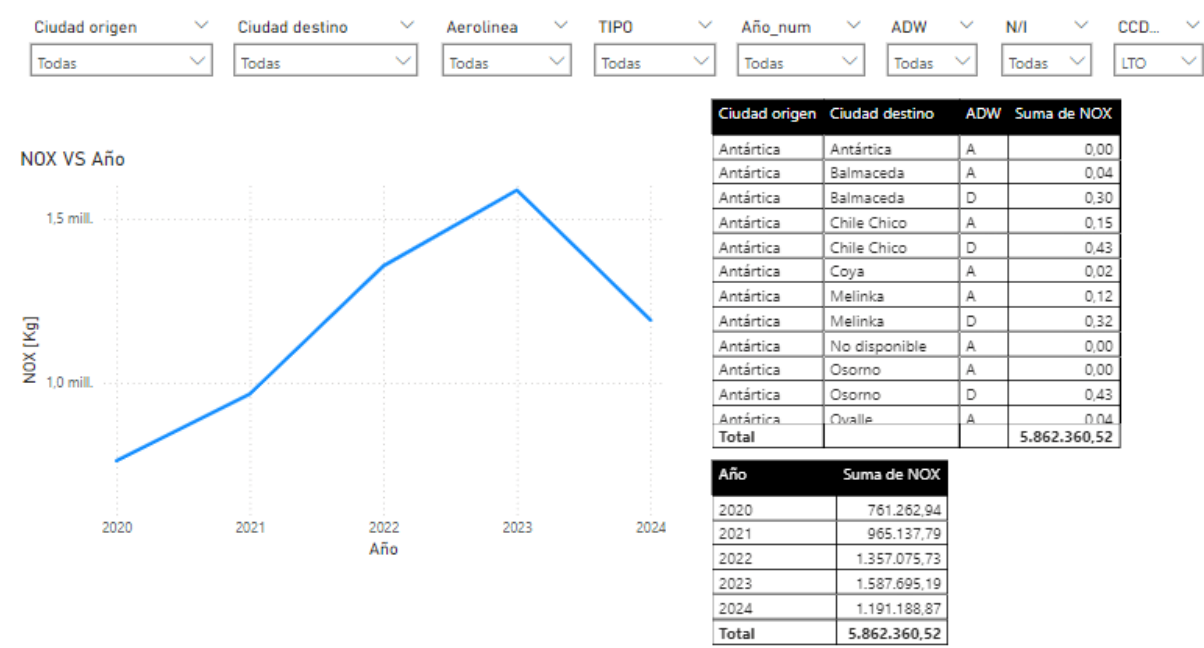


Figura 23. Dashboard para visualización de NOX LTO generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC

Los óxidos de nitrógeno, conocidos por su impacto en la calidad del aire y la formación de ozono troposférico, aumentaron un 26.78% en 2021. En 2022, las emisiones crecieron un 40.61%, alineándose con el auge en la actividad aérea. Sin embargo, en 2023 el crecimiento se redujo a un 16.99%, probablemente por la implementación de mejoras en los motores o la adopción de tecnologías más limpias.

Dashboard: SOX LTO

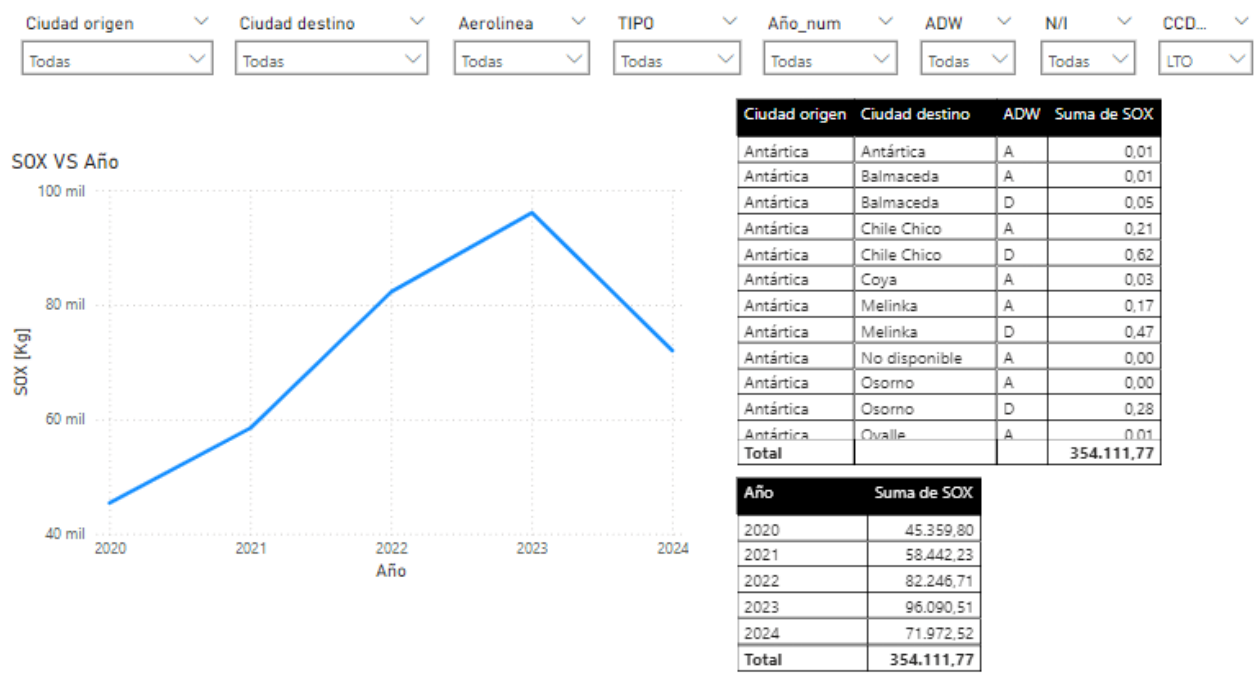


Figura 24- Dashboard para visualización de SOX LTO generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC

Los óxidos de azufre, relacionados con el contenido de azufre en los combustibles, mostraron un crecimiento del 28.33% en 2021 y un 41.76% en 2022, destacándose como uno de los contaminantes con mayor incremento. En 2023, su crecimiento se moderó al 16.97%, lo que podría atribuirse a una mayor regulación en los combustibles utilizados.

Dashboard: PM TOTAL LTO

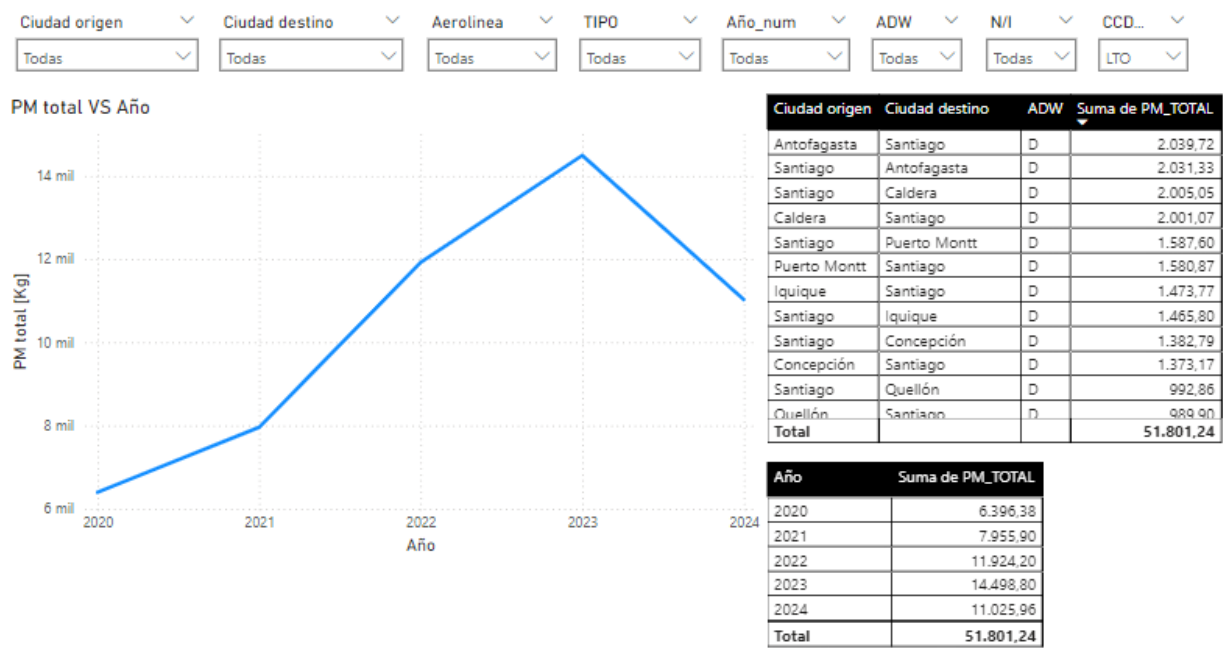


Figura 25. Dashboard para visualización de PM total LTO generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC

Las partículas totales, críticas por su impacto en la salud humana, experimentaron un crecimiento del 24.38% en 2021. En 2022, el incremento alcanzó un alarmante 50.10%, el mayor entre todos los contaminantes. Aunque en 2023 el crecimiento se redujo al 21.41%, sigue siendo una de las principales preocupaciones ambientales.

Resumen de emisiones generadas LTO

Tabla 18. Tabla resumen de las emisiones generadas LTO. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC

Año	CO2 [Kg]	CO [Kg]	H2O [Kg]	HC [Kg]	NOX [Kg]	SOX [Kg]	PM TOTAL [Kg]
2020	170.099.252,05	489.923,38	66.797.708,44	76.115,98	761.262,94	45.359,80	6.396,38
2021	219.158.336,80	623.219,31	86.063.141,49	92.252,24	965.137,79	58.442,23	7.955,90
2022	308.425.030,91	861.656,81	121.118.080,28	113.689,80	1.357.075,73	82.246,71	11.924,20
2023	360.339.175,94	984.854,07	141.504.710,96	117.986,22	1.587.695,19	96.090,51	14.498,80
2024	269.896.761,34	725.859,32	105.988.111,07	82.572,02	1.191.188,87	71.972,52	11.025,96
Total	1.327.918.557,04	3.685.512,89	521.471.752,24	482.616,26	5.862.360,52	354.111,77	51.801,24

3.1.2. Resultados estimación contaminantes CCD

Para estimar los contaminantes en las maniobras CCD, utilizaremos el mismo dashboard que usamos para las estimaciones de LTO. Sin embargo, en esta ocasión, solo consideraremos las emisiones CCD dentro del territorio nacional.

Dashboard: CO2 CCD NACIONAL

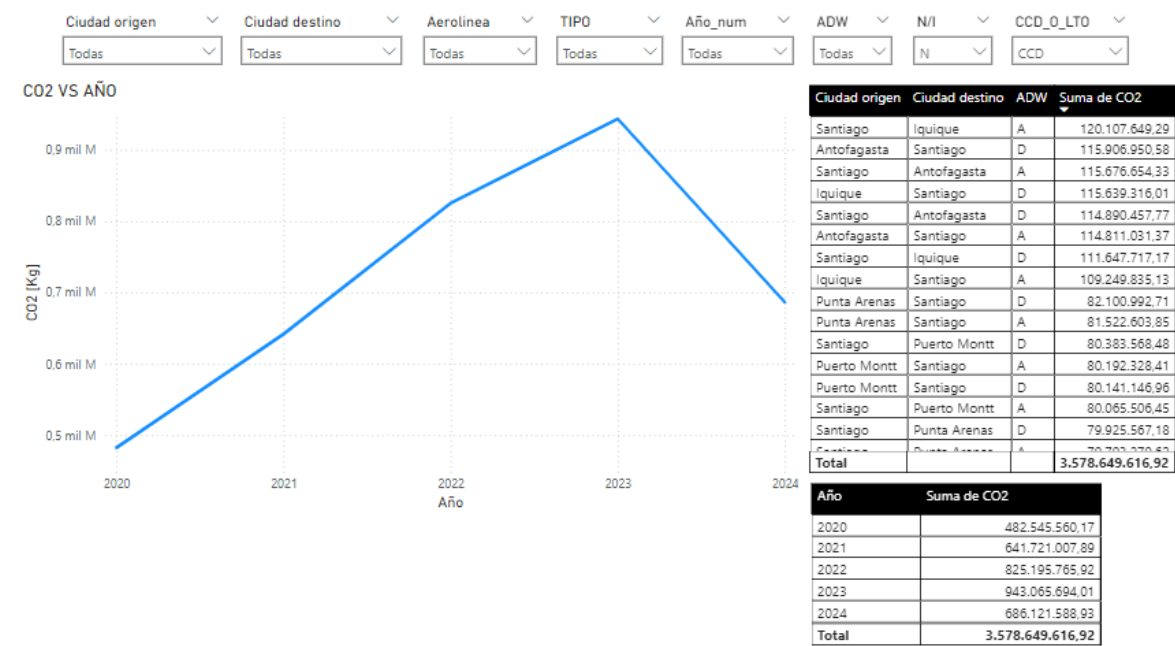


Figura 26. Dashboard para visualización de CO2 CCD nacional generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC

El dióxido de carbono muestra un comportamiento típico de recuperación post-pandemia. En 2021, las emisiones crecieron un 27.78%, impulsadas por la reactivación de vuelos. Para 2022, el crecimiento fue del 34.78%, marcando el mayor incremento de este periodo, probablemente relacionado con el aumento en la cantidad de operaciones. En 2023, el crecimiento se moderó al 19.35%, lo que podría sugerir una estabilización del sector o la implementación de pequeñas mejoras en eficiencia operativa

Dashboard: CO CCD NACIONAL



Figura 27. . Dashboard para visualización de CO CCD nacional generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC

El monóxido de carbono sigue un patrón de crecimiento similar al CO2. En 2021, las emisiones aumentaron un 30.00%, reflejo del aumento en la actividad aérea. En 2022, este crecimiento alcanzó

un 33.85%, destacándose como un año de máxima actividad. Para 2023, el incremento fue más contenido, del 14.94%, posiblemente gracias a mejoras en los sistemas de combustión o un menor crecimiento en operaciones.

Dashboard: H2O CCD NACIONAL

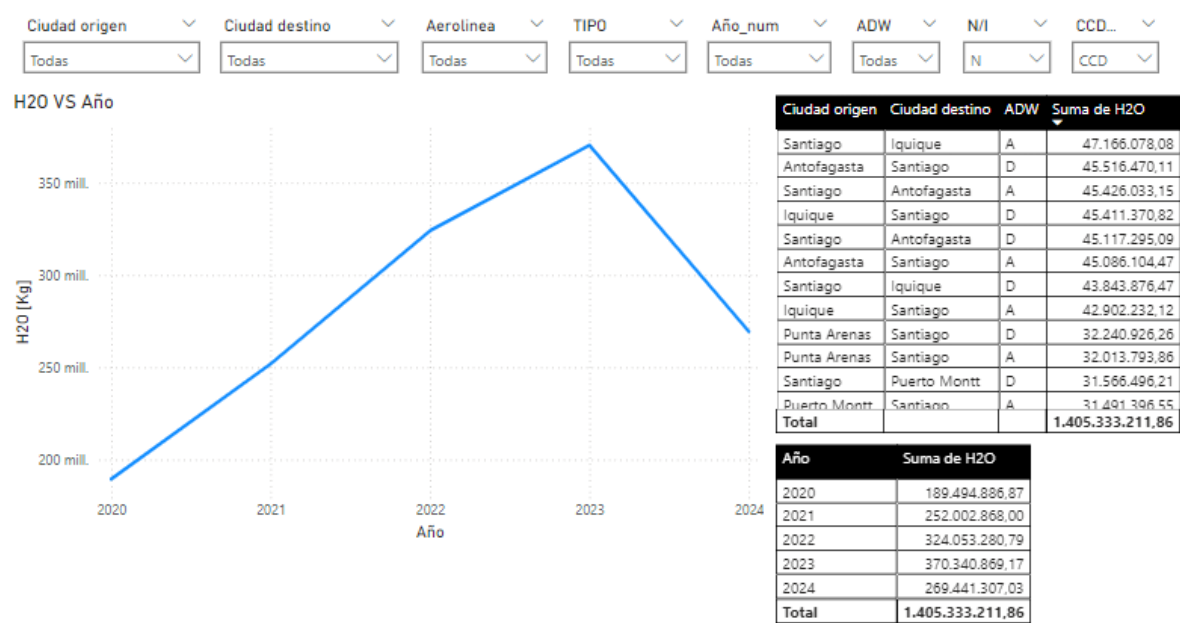


Figura 28. . Dashboard para visualización de H2O CCD nacional generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC

El vapor de agua, producto directo de la quema de combustibles, mostró un crecimiento del 28.57% en 2021, manteniéndose alineado con las emisiones de CO2. En 2022, el aumento fue del 38.89%, el más alto de este contaminante, lo que subraya el fuerte repunte en la actividad aérea. Para 2023, el crecimiento fue más moderado, del 16.00%, reflejando cierta estabilización en las emisiones.

Dashboard: HC CCD NACIONAL

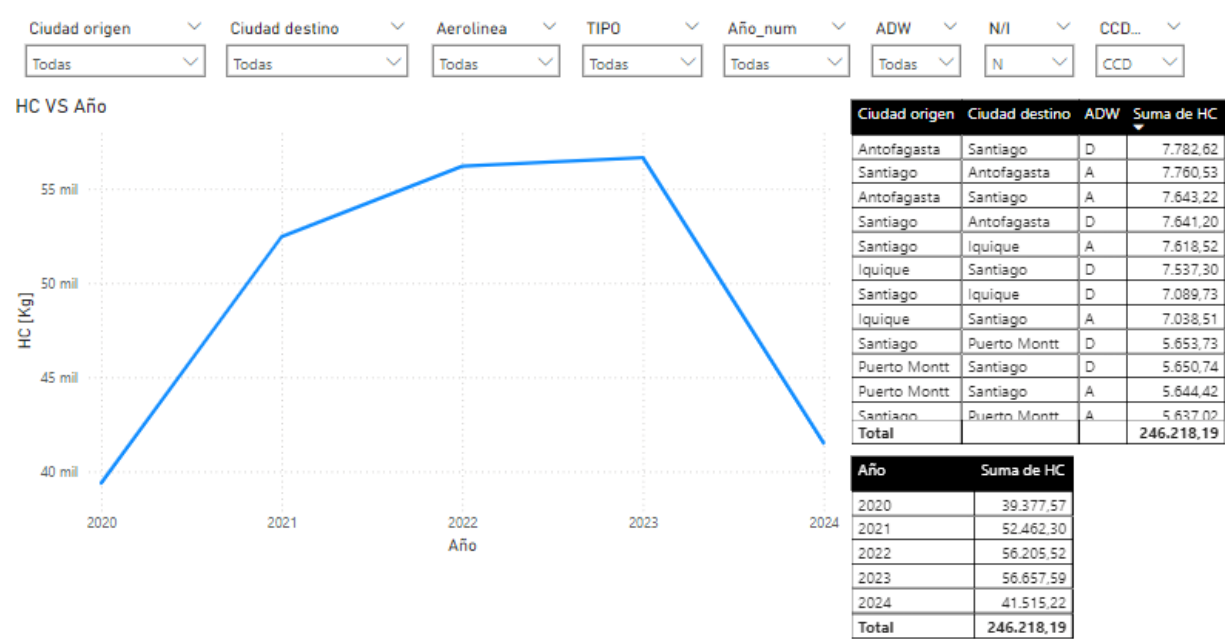


Figura 29. . Dashboard para visualización de HC CCD nacional generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC

Los hidrocarburos no quemados, resultado de una combustión incompleta, registraron un crecimiento del 18.75% en 2021, siendo uno de los incrementos más bajos. En 2022, el aumento fue del 26.32%, reflejando un posible impacto de variaciones en la calidad del combustible o el número de operaciones. Para 2023, el crecimiento fue mínimo, del 4.17%, lo que podría indicar mejoras tecnológicas en los motores.

Dashboard: PM TOTAL CCD NACIONAL

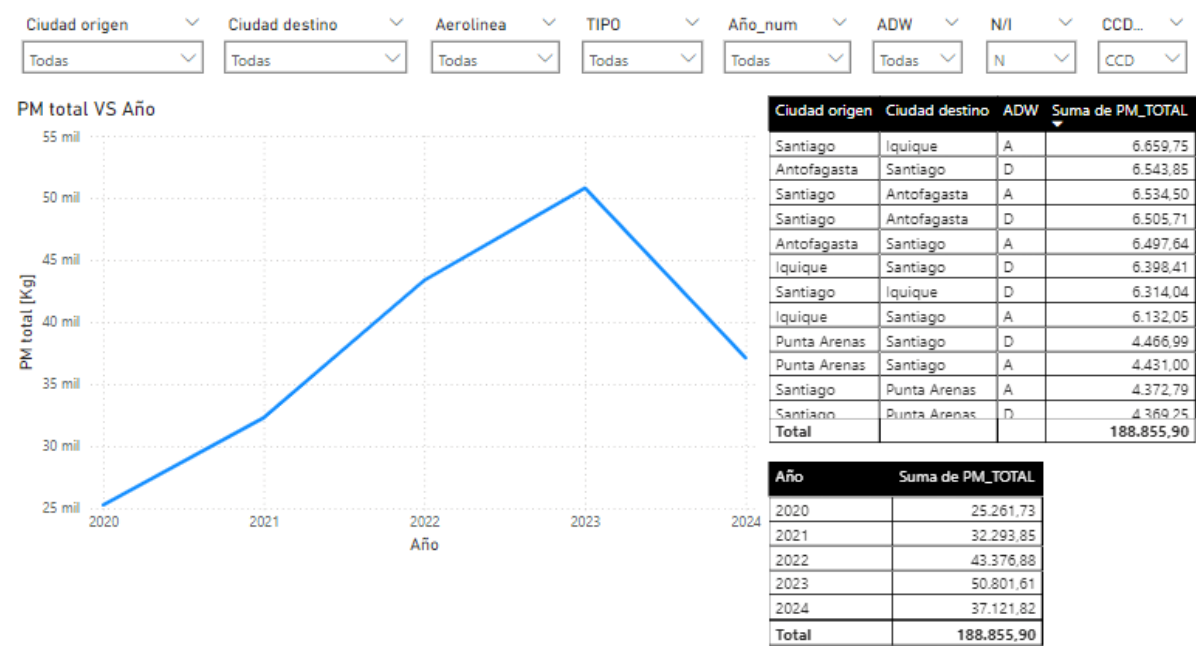


Figura 30. . Dashboard para visualización de PM total CCD nacional generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC

Las partículas totales tuvieron un crecimiento del 23.08% en 2021, relacionado directamente con el aumento en las operaciones. En 2022, el incremento fue notablemente alto, del 50.00%, el mayor entre todos los contaminantes, indicando una preocupación importante. Para 2023, el crecimiento fue del 25.00%, reflejando cierta desaceleración, aunque sigue siendo preocupante.

Dashboard: NOX CCD NACIONAL

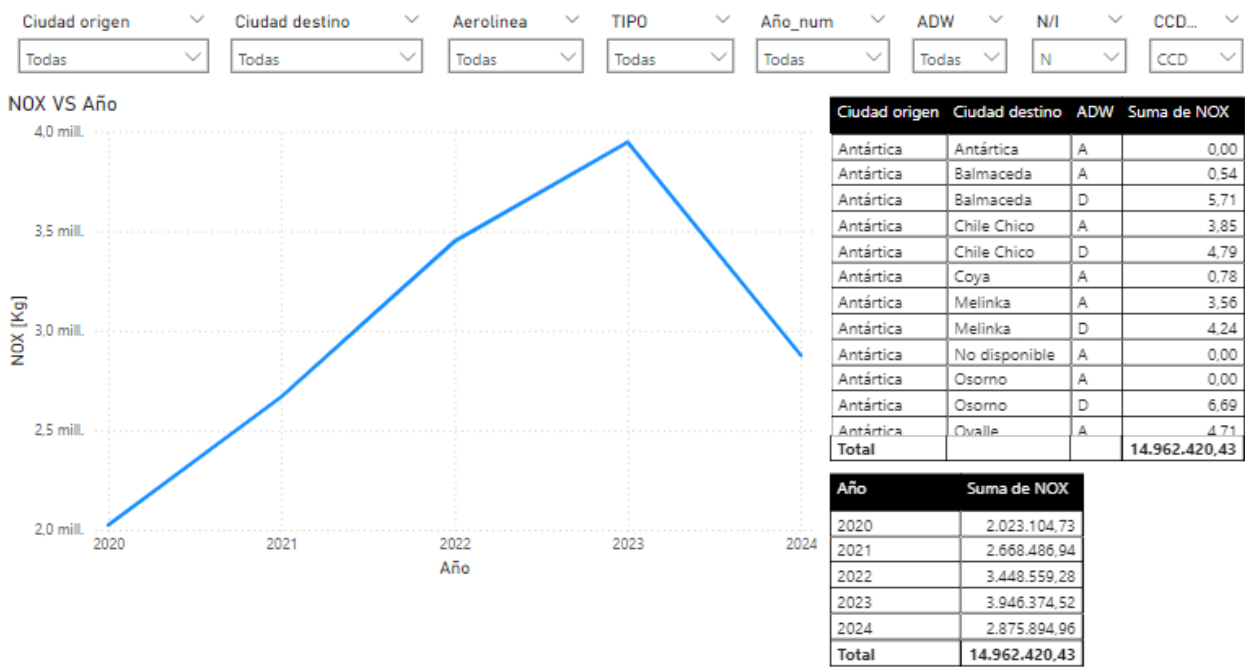


Figura 31. . Dashboard para visualización de NOX CCD nacional generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC

Los óxidos de nitrógeno, importantes por su impacto en la calidad del aire, aumentaron un 25.00% en 2021. En 2022, el incremento fue significativo, del 40.00%, destacándose como un año de máxima generación de este contaminante. Para 2023, el crecimiento fue más contenido, del 14.29%, posiblemente gracias a medidas de mitigación o estabilización operativa.

Dashboard: SOX CCD NACIONAL

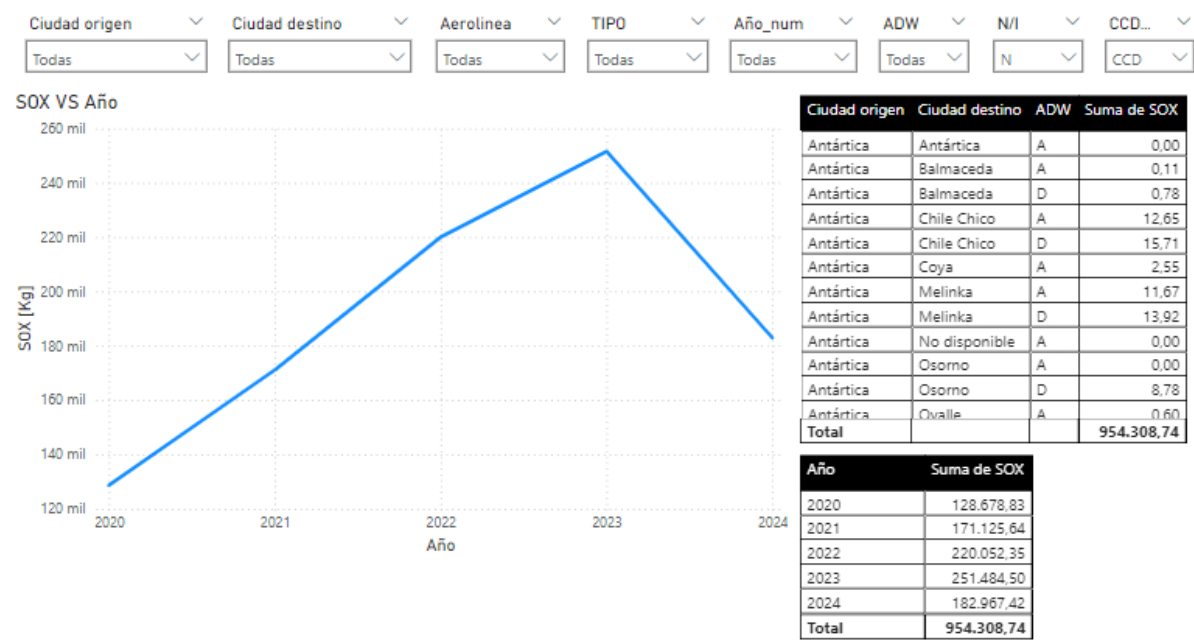


Figura 32. . Dashboard para visualización de SOX CCD nacional generado entre los periodos 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC

Los óxidos de azufre reflejan un crecimiento del 30.43% en 2021, debido probablemente al uso de combustibles con contenido de azufre. En 2022, el crecimiento fue del 41.67%, el mayor de este contaminante, resaltando la necesidad de mayor regulación. Para 2023, el crecimiento se moderó al 15.29%, sugiriendo el inicio de medidas de control.

Resumen de emisiones generadas CCD Nacional

Tabla 19. Tabla resumen de las emisiones generadas CCD nacional. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la ICAO y la JAC

Año	CO2 [Kg]	CO [Kg]	H2O [Kg]	HC [Kg]	NOX [Kg]	SOX [Kg]	PM total [Kg]
2020	482.545.560,17	227.288,46	189.494.886,87	39.377,57	2.023.104,73	128.678,83	25.261,73
2021	641.721.007,89	304.357,80	252.002.868,00	52.462,30	2.668.486,94	171.125,64	32.293,85
2022	825.195.765,92	382.956,91	324.053.280,79	56.205,52	3.448.559,28	220.052,35	43.376,88
2023	943.065.694,01	439.791,04	370.340.869,17	56.657,59	3.946.374,52	251.484,50	50.801,61
2024	686.121.588,93	504.180,13	269.441.307,03	41.515,22	2.875.894,96	182.967,42	37.121,82
Total	3.578.649.616,92	1.858.574,35	1.405.333.211,86	246.218,19	14.962.420,43	954.308,74	188.855,90

3.1.3. Proyección de contaminantes LTO Nacional

Además de los vuelos, también es posible proyectar con ayuda de la herramienta de previsión los contaminantes ya estimados. Por practicidad y comodidad solo se presentará la proyección de CO2 LTO Nacional, el cual se presenta a continuación

Proyección de CO2 LTO NACIONAL

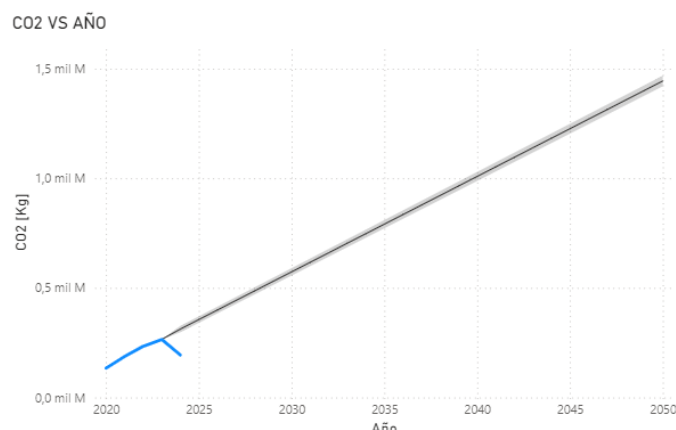


Figura 33. Proyección de emisiones de CO2 para vuelos nacionales en maniobra LTO. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.

Para la elaboración de los modelos se empleó la herramienta de previsión disponible en el software Power Bi, la cual utiliza el método de suavización exponencial triple para generar las proyecciones. Sin embargo, los datos analizados no presentan una estacionalidad definida, lo que orienta la previsión hacia una extrapolación lineal. Es importante destacar que la recopilación de una mayor cantidad de datos es fundamental, ya que esto permitiría identificar una posible estabilización en las tendencias de crecimiento y, de esta manera, obtener proyecciones más precisas y confiables.

3.2. Análisis de rutas aéreas y aeronaves utilizadas

Con los datos de la JAC ya limpios y organizados, y tras entender la dinámica de los vuelos en el documento, se puede iniciar el análisis de las rutas aéreas y aeronaves utilizadas entre 2020 y 2024. Para esto, se usará Power BI, una herramienta ideal para visualizar los datos de forma clara y extraer información relevante.

3.2.1. Vuelos realizados 2020-2024

Para analizar los vuelos realizados, se diseñó un dashboard con cuatro filtros: uno para vuelos nacionales e internacionales, otro para LTO y CCD, uno más para despegue y aterrizaje, y un último filtro por año. También se incluyó una tabla con las ciudades de origen y destino, la cantidad de vuelos realizados y su porcentaje de participación. Acompañando esta tabla, se añadieron dos gráficos de torta que muestran las principales ciudades de origen y destino. El dashboard final es el siguiente:

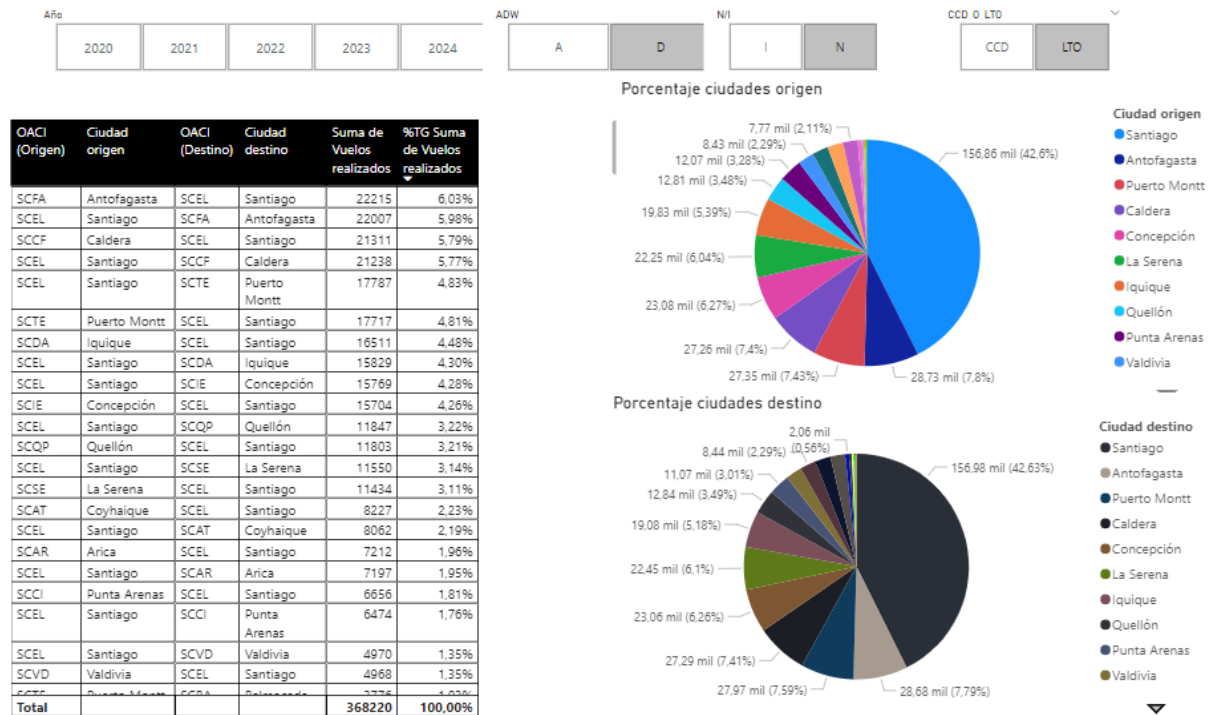


Figura 34. Dashboard de análisis de vuelos nacionales. Elaboración propia a partir de datos de la JAC

En el dashboard que se aprecia en la figura 34, se logran apreciar dos gráficos de torta y una tabla. En los primeros gráficos damos cuenta del porcentaje de ciudades origen y destino, mientras que en la tabla identificamos las cantidad y valores porcentuales de cada ruta aérea. Cabe destacar que dicho dashboard presta utilidad para toda la gama de vuelos realizados, es decir, se puede filtrar de acuerdo a maniobra CCD o LTO, también respecto a vuelo nacional e internacional e incluso de acuerdo a año.

Tabla: Vuelos nacionales

Tabla 20. Tabla de vuelos nacionales realizados. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.

OACI (Origen)	Ciudad origen	OACI (Destino)	Ciudad destino	Suma de Vuelos realizados	%TG Suma de Vuelos realizados
SCFA	Antofagasta	SCEL	Santiago	22215	6,03%
SCEL	Santiago	SCFA	Antofagasta	22007	5,98%
SCCF	Caldera	SCEL	Santiago	21311	5,79%
SCEL	Santiago	SCCF	Caldera	21238	5,77%
SCEL	Santiago	SCTE	Puerto Montt	17787	4,83%
SCTE	Puerto Montt	SCEL	Santiago	17717	4,81%
SCDA	Iquique	SCEL	Santiago	16511	4,48%
SCEL	Santiago	SCDA	Iquique	15829	4,30%
SCEL	Santiago	SCIE	Concepción	15769	4,28%
SCIE	Concepción	SCEL	Santiago	15704	4,26%
SCEL	Santiago	SCQP	Quellón	11847	3,22%
SCQP	Quellón	SCEL	Santiago	11803	3,21%
SCEL	Santiago	SCSE	La Serena	11550	3,14%
SCSE	La Serena	SCEL	Santiago	11434	3,11%
SCAT	Coyhaique	SCEL	Santiago	8227	2,23%
SCEL	Santiago	SCAT	Coyhaique	8062	2,19%
SCAR	Arica	SCEL	Santiago	7212	1,96%
SCEL	Santiago	SCAR	Arica	7197	1,95%
SCCI	Punta Arenas	SCEL	Santiago	6656	1,81%
SCEL	Santiago	SCCI	Punta Arenas	6474	1,76%
SCEL	Santiago	SCVD	Valdivia	4970	1,35%
SCVD	Valdivia	SCEL	Santiago	4968	1,35%
SCTE	Puerto Montt	SCFA	Antofagasta	3776	1,03%
Total				368220	100,00%

La tabla 20 muestra las ciudades con mayor flujo de vuelos, destacando la ruta SCFA-SCEL como la más activa, con 22.215 vuelos y una participación del 6,03%. En segundo lugar, está la ruta SCEL-SCFA, con 22.007 vuelos y un 5,98% de participación. Esto es esperable, ya que los aviones deben completar el ciclo LTO, lo que implica viajes de ida y vuelta entre estos aeropuertos.

Tabla: Vuelos internacionales

Tabla 21. Tabla de vuelos internacionales realizados. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC

OACI (Origen)	Ciudad origen	OACI (Destino)	Ciudad destino	Suma de Vuelos realizados	%TG Suma de Vuelos realizados
SCEL	Santiago	SPJC	Lima	13704	15,20%
SCEL	Santiago	SBGR	São Paulo	9269	10,28%
SCEL	Santiago	SAEZ	Ezeiza	7835	8,69%
SCEL	Santiago	SKBO	Bogotá	6941	7,70%
SCEL	Santiago	SABE	Buenos Aires	6685	7,41%
SCEL	Santiago	MPTO	Ciudad de Panamá	6350	7,04%
SCEL	Santiago	SBGL	Río de Janeiro	4736	5,25%
SCEL	Santiago	KMIA	Miami	3811	4,23%
SCEL	Santiago	LEMD	Madrid	3136	3,48%
SCEL	Santiago	SAME	Mendoza	2429	2,69%
SCEL	Santiago	SUMU	Montevideo	2369	2,63%
SCEL	Santiago	MMMX	Ciudad de México	1786	1,98%
SCEL	Santiago	SBFL	Florianópolis	1700	1,89%
SCEL	Santiago	KJFK	Nueva York	1351	1,50%
SCEL	Santiago	KATL	Atlanta	1199	1,33%
SCEL	Santiago	LFPG	París	1176	1,30%
SCEL	Santiago	KIAH	Houston	1142	1,27%
SCEL	Santiago	SEGU	Guayaquil	1130	1,25%
SCEL	Santiago	SACO	Córdoba	994	1,10%
SCEL	Santiago	SGAS	Asunción	917	1,02%
SCEL	Santiago	SKCL	Cali	879	0,97%
SCEL	Santiago	NZAA	Auckland	850	0,94%
Total				90184	100,00%

La tabla 21 indica que la ruta SCEL-SPJC tiene el mayor flujo de vuelos internacionales, con 13.704 vuelos, lo que representa un 15,20% de participación. En segundo lugar, está la ruta SCEL-SBGR, con 9.269 vuelos y un 10,28% de participación en el total de vuelos internacionales.

Gráfico de torta: Vuelos nacionales Ciudades Origen y Ciudades Destino

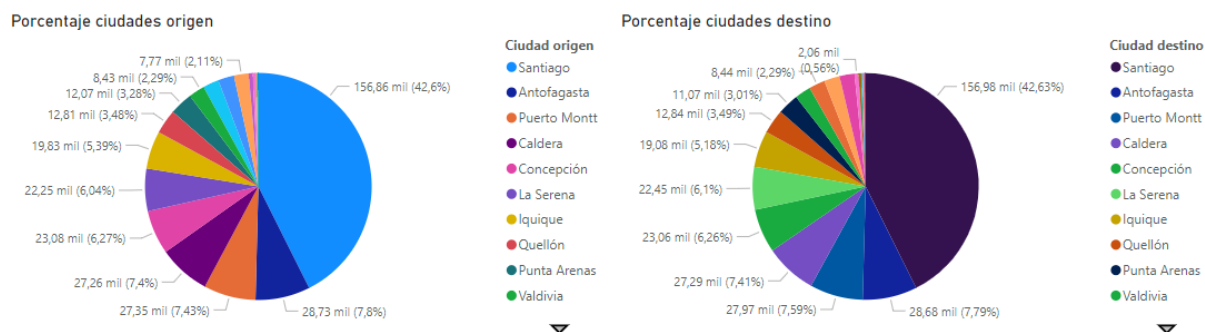


Figura 35. Gráficos de torta de vuelos nacionales respecto a ciudades de origen y ciudades destino. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.

Los gráficos de la figura 35 confirman la predominancia del aeropuerto de Santiago a nivel nacional, pero también destacan puntos de crecimiento en aeropuertos como Antofagasta, Puerto Montt, Caldera y Concepción. Cada uno de estos aeropuertos muestra potencial de expansión, ya sea por la actividad minera o por el volumen de personas que movilizan. Esto nos permite anticipar algunas de las tendencias futuras en el sector

Gráfico de torta: Vuelos internacionales Ciudades Origen y Ciudades Destino

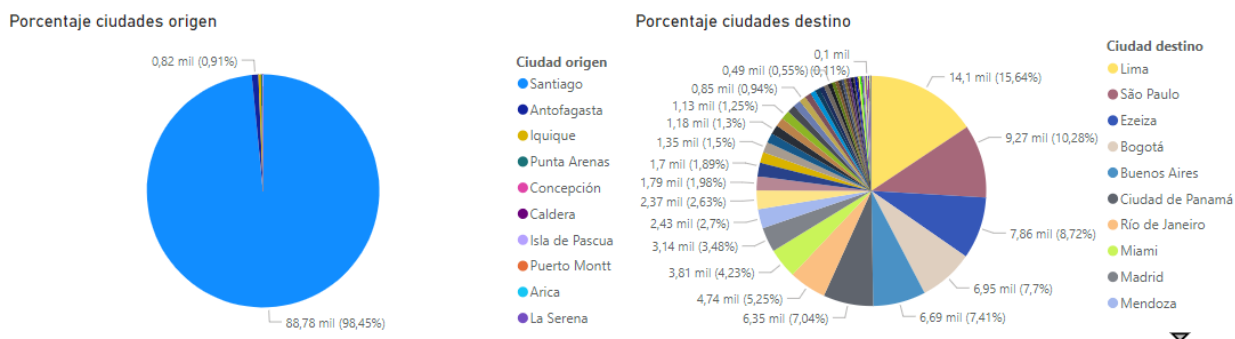


Figura 36. Gráficos de torta de vuelos internacionales respecto a ciudades de origen y ciudades destino. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.

Por otro lado, de acuerdo con la figura 36, la mayoría de los vuelos internacionales parten desde Santiago, lo cual es lógico considerando su tamaño y capacidad. En cuanto a las ciudades de destino,

no se dispone de más información adicional a la que ya se ha extraído de la tabla de datos.

3.2.2. Aviones utilizados 2020-2024

Se creó un dashboard similar al anterior para analizar el uso de aeronaves entre 2020 y 2024, con una distinción entre vuelos nacionales e internacionales.

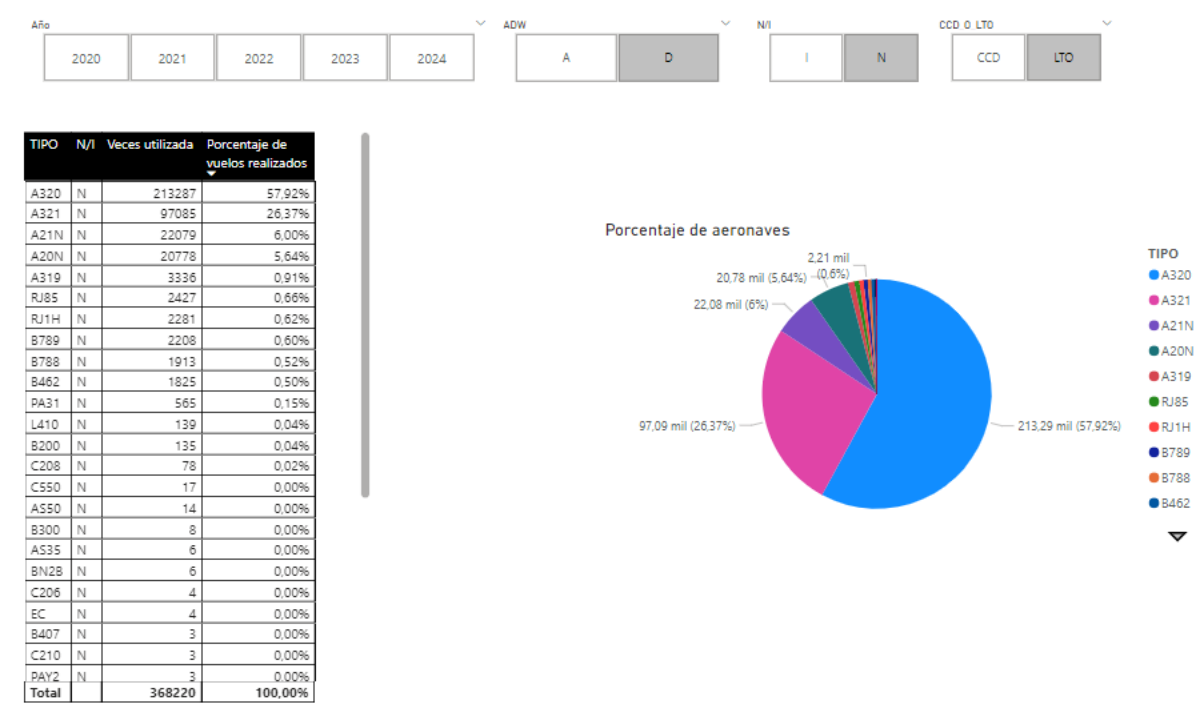


Figura 37. Dashboard de participación de aeronaves en vuelos nacionales. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.

El dashboard de la figura 37 se creó con el fin de analizar las aeronaves que presentaron actividad en el territorio nacional, dando la posibilidad de filtrar según año, maniobra de vuelo, vuelo nacional e internacional. Por otro lado, se creó una tabla donde se presentan el tipo de aeronave, cantidad de vuelos y porcentaje de participación, además de un gráfico de torta que ayuda apreciar de mejor manera dichos porcentajes

Tabla: Vuelos nacionales

Tabla 22. Tabla de participación de aeronaves en vuelos nacionales. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la

TIPO	N/I	Veces utilizada	Porcentaje de vuelos realizados
A320	N	213287	57,92%
A321	N	97085	26,37%
A21N	N	22079	6,00%
A20N	N	20778	5,64%
A319	N	3336	0,91%
RJ85	N	2427	0,66%
RJ1H	N	2281	0,62%
B789	N	2208	0,60%
B788	N	1913	0,52%
B462	N	1825	0,50%
PA31	N	565	0,15%
L410	N	139	0,04%
B200	N	135	0,04%
C208	N	78	0,02%
C550	N	17	0,00%
AS50	N	14	0,00%
B300	N	8	0,00%
AS35	N	6	0,00%
BN28	N	6	0,00%
C206	N	4	0,00%
EC	N	4	0,00%
B407	N	3	0,00%
C210	N	3	0,00%
PAY2	N	3	0,00%
Total		368220	100,00%

En la tabla 22 con relación a los vuelos nacionales, predominan claramente los aviones A320 y A321, con una participación del 57,92% y 27,73%, respectivamente. Les siguen sus versiones NEO, el A21N y el A20N, con un 6,00% y un 5,64% de participación. Esta información nos ayuda a perfilar el tipo de viaje típico dentro del país y a identificar las aeronaves que probablemente reemplazarán a los A320 y A321 en el futuro cercano.

Tabla: Vuelos internacionales

Tabla 23. Tabla de participación de aeronaves en vuelos internacionales. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC

TIPO	N/I	Veces utilizada	Porcentaje de vuelos realizados
A320	I	38168	42,32%
B789	I	10728	11,90%
B788	I	9804	10,87%
B738	I	7190	7,97%
A321	I	5572	6,18%
A21N	I	3743	4,15%
A359	I	3013	3,34%
A319	I	2619	2,90%
A20N	I	1944	2,16%
B763	I	1301	1,44%
B772	I	1046	1,16%
B737	I	766	0,85%
A332	I	753	0,83%
B39M	I	689	0,76%
E190	I	657	0,73%
B739	I	492	0,55%
B37M	I	398	0,44%
A333	I	294	0,33%
B77W	I	200	0,22%
B773	I	186	0,21%
B38M	I	181	0,20%
B764	I	136	0,15%
B733	I	87	0,10%
A330	I	81	0,09%
Total		90184	100,00%

En la tabla 23 se observa una mayor diversidad de aeronaves en vuelos internacionales, con el A320 a la cabeza, representando un 42,32% de participación, seguido por el B789 con un 11,90%. Esta variedad se explica por el mayor número de aerolíneas que participan en el transporte internacional, a diferencia del ámbito nacional, donde operan solo tres aerolíneas principales.

Gráfico de torta: Vuelos nacionales aeronaves

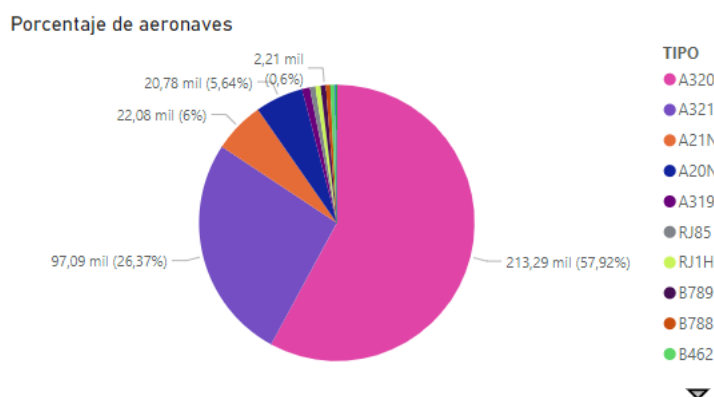


Figura 38. Gráfico de torta de participación de aeronaves en vuelos nacionales. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.

En el gráfico presente en la figura 38, se puede evidenciar que la mayoría de vuelos realizados en el territorio nacional es por medio de los A320 y A321, lo cual nos ayuda a entender a qué tipo y segmento de aeronave se debe estudiar y atacar en el caso de las emisiones.

Gráfico de torta: Vuelos internacionales aeronaves

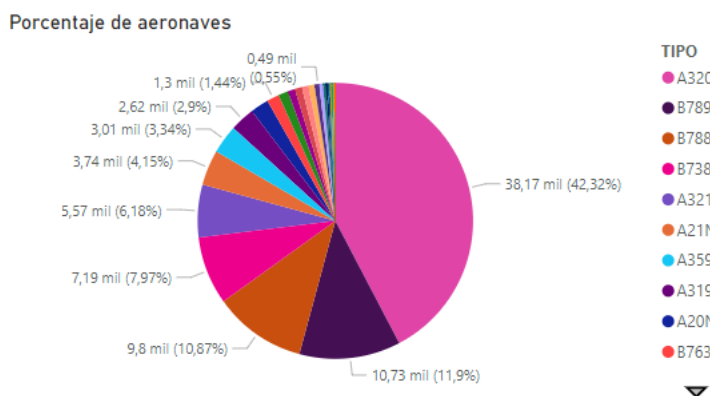


Figura 39. Gráfico de torta de participación de aeronaves en vuelos internacionales. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.

Por otro lado, en el gráfico de la figura 39, si bien se presenta una distribución más homogénea en los puestos 2 y 5, sigue siendo el principal participante de vuelos el A320 y por consecuencia, la

aeronave que es más merecedora de estudios y análisis de proyección

3.3. Escenarios creados para maniobras LTO nacionales e internacionales

A continuación, se analizan distintos escenarios que exploran posibles futuros para la industria aeronáutica en las maniobras LTO en vuelos nacionales e internacionales. Estos escenarios consideran la adopción de aeronaves más eficientes, como las variantes NEO (New Engine Option) de Airbus, así como cambios en la frecuencia de vuelos proyectados. Factores como la transición tecnológica, el crecimiento o reducción del tráfico aéreo y la distribución de las flotas permiten evaluar el impacto en las emisiones de contaminantes clave, tales como CO₂, NOX, SOX y HC.

En total, se presentan 10 escenarios que combinan la implementación de tecnologías más eficientes con ajustes en la demanda de vuelos. Algunos escenarios proponen cambios inmediatos en la composición de las flotas, mientras que otros plantean transiciones graduales hasta el año 2050. Asimismo, se evalúan los efectos de aumentos y reducciones en el número de vuelos proyectados, proporcionando una visión detallada de cómo estas variables influyen en las emisiones y en la sostenibilidad de la industria aérea.

Escenario 1: Se instauro con efecto inmediato un cambio en los porcentajes de participación de aeronaves del tipo NEO en vuelos nacionales, pasando a

representar el 60% y 25% de los A320 y A321, respectivamente.

En el panorama nacional las aerolíneas chilenas firman un acuerdo para comenzar a utilizar en la mayoría de sus vuelos aeronaves del tipo neo, esto se ve reflejado en un aumento en los porcentajes anuales de participación de los Airbus A21N y A20N. Los nuevos porcentajes de participación de los Airbus A21N y A20 N son 60% y 25%, porcentajes que antes pertenecían a los A320 y A321. Como resultado de este escenario, se logran obtener las siguientes nuevas proyecciones, junto con la comparativa de la proyección simple de datos iniciales.

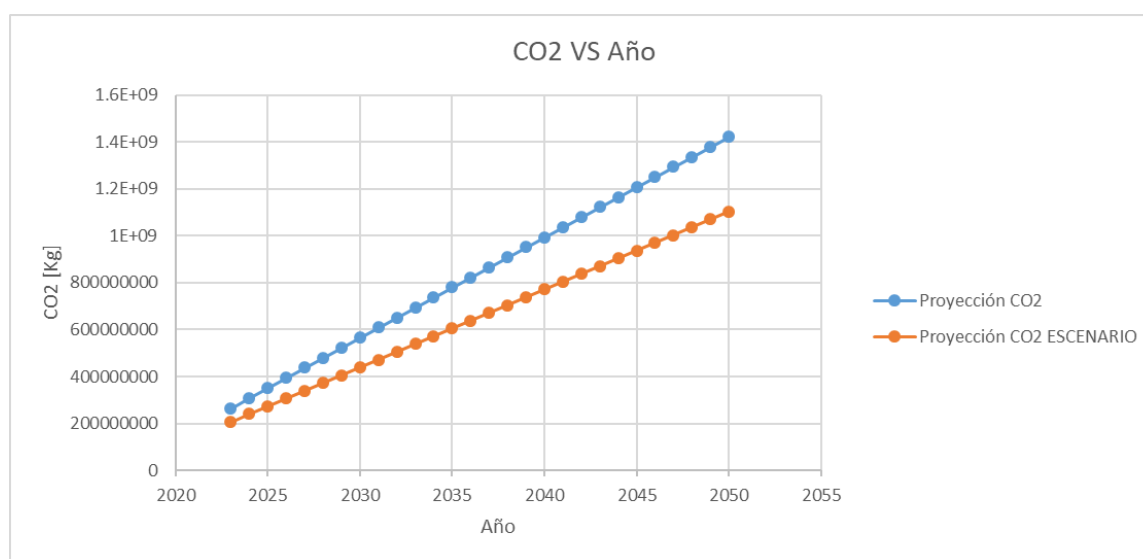


Figura 40. Grafico comparativo de escenario 1 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.

Se puede dar cuenta de una disminución de cerca del 22% en relación a que se hubiesen seguido utilizando en la misma proporción las aeronaves en las condiciones iniciales.

Cuadro resumen de disminución de contaminantes

Tabla 24. Tabla comparativa escenario 1 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.

Especie	Variación	Normal [Kg]	Escenario [Kg]
CO2	-13.799%	23,630,416,944	20,369,618,475
NOX	-24.093%	105,230,921	79,877,183
SOX	-13.799%	6,301,449	5,431,903
CO	1.574%	64,630,561	65,647,775
H2O	-13.799%	9,279,633,520	7,999,123,277
HC	-79.061%	9,187,111	1,923,672
PM	-36.904%	984,602	621,245

Escenario 2: Aumento gradual de la participación del tipo NEO en las variantes A20N y A21N en los periodos comprendidos entre los años 2025-2050 en vuelos nacionales

El uso de nuevas tecnologías en la industria aeronáutica no suele ser un cambio abrupto, si no que más bien gradual. Por lo que un escenario más realista en el caso de la adopción de nuevas tecnologías en la industria aeronáutica podría ser desarrollando un aumento gradual en la participación de las aeronaves NEO, para el caso de la transición de la línea A320 a los A20 N se realizara con aumento y disminución lineal respectivamente tomando los valores actuales de participación de cada una de las aeronaves, sacando su diferencia y dividiendo esta entre el periodo comprendido entre 2025 a 2050, la misma secuencia se repite para la transición entre A321 a los A21N dando como resultado la siguiente tabla

Tabla 25. Aumento porcentual de aeronaves nacionales a partir de 2025 hasta 2050. Elaboración propia.

Aeronave en disminución	Aeronave en ascenso	Aumento porcentual anual
A320	A20N	0.008
A321	A21N	0.021

Logrando obtener el siguiente gráfico:

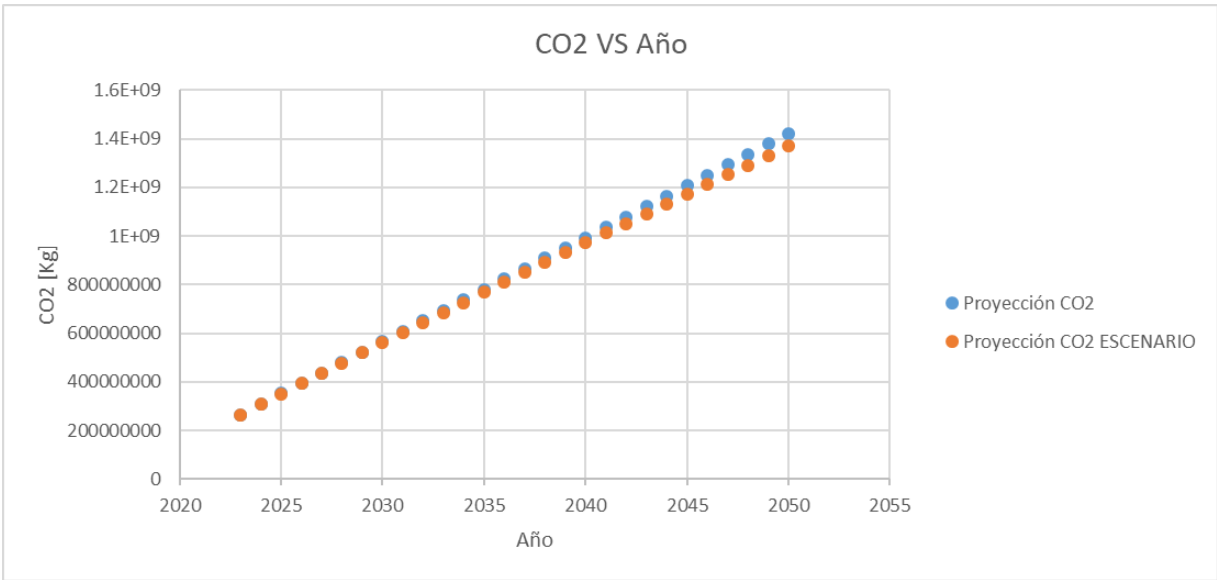


Figura 41. Gráfico comparativo de escenario 2 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.

En este caso se logra apreciar una separación gradual a las líneas de tendencia de proyección con datos iniciales, por otro lado, se puede notar que hay una disminución de alrededor del 15% en las emisiones totales generadas entre los años 2020-2050.

Tabla 26. Tabla comparativa escenario 2 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia

Especie	Variación	Normal [kt]	Escenario [kt]
CO2	-2.2%	23,630.4	23,114.9
NOX	-4.2%	105.2	100.8
SOX	-2.2%	6.3	6.2
CO	-2.8%	64.6	62.8
H2O	-2.2%	9279.6	9,077.2
HC	-17.7%	9.2	7.6
PM	-4.2%	1.0	0.9

Escenario 3: Se instauro con efecto inmediato un cambio en los porcentajes de participación de aeronaves del tipo NEO en vuelos internacional, pasando a representar el 45% y 4.2% de los A320 y A321, respectivamente.

De manera similar al escenario 1, el escenario 2 plantea un cambio en la participación de las aeronaves A320 y A321 con su contraparte NEO. Sin embargo, en esta ocasión el escenario no representa una gran disminución en las emisiones contaminantes, debido a que en los vuelos internacionales tenemos una participación más diseminada entre varios modelos, esto debido principalmente a la gran cantidad de aerolíneas participantes, las cuales tienen su propio modelo de aeronave en particular.

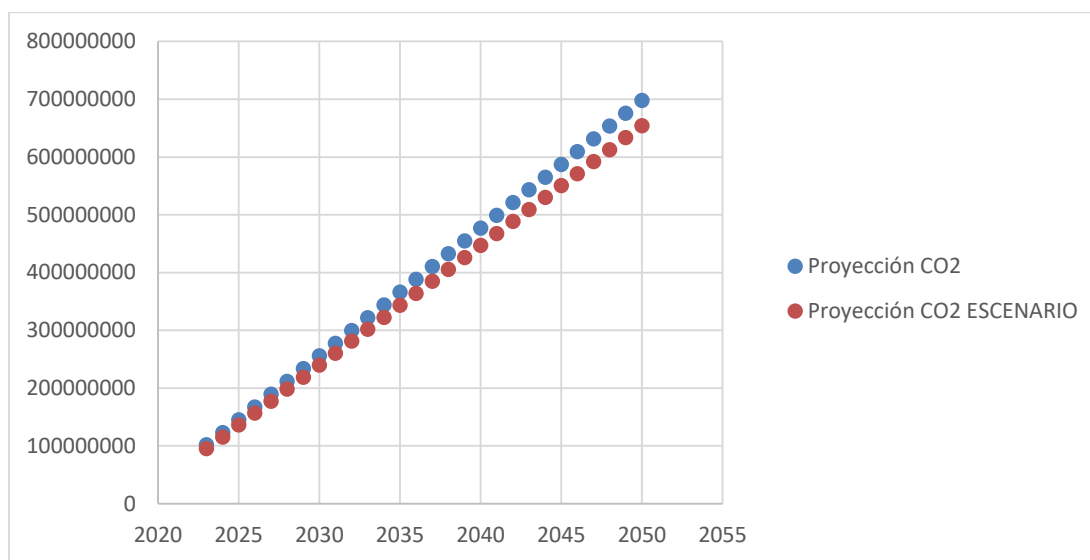


Figura 42. Grafico comparativo de escenario 3 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.

Si bien, este caso se aprecia una disminución en los contaminantes, eso solo se logra apreciar de manera sustancial al año 2045

Tabla 27. Tabla comparativa escenario 3 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia

Especie	Variación	Normal [Kg]	Escenario [Kg]
CO2	-6.261%	11,179,151,241	10,479,239,655
NOX	-12.440%	47,894,481	41,936,235
SOX	-6.261%	2,981,107	2,794,464
CO	-6.474%	33,876,313	31,683,161
H2O	-6.261%	4,390,034,965	4,115,180,872
HC	-53.827%	3,841,396	1,773,694
PM	-19.207%	310,933	251,211

Por otro lado, las especies de SOX, CO y H2O tuvieron una disminución casi imperceptible, mientras que la que más se benefició de este cambio fue el HC, el cual disminuyó en un 53,827%

Escenario 4: Aumento gradual de la participación del tipo NEO en las variantes A20N y A21N en los periodos comprendidos entre los años 2025-2050 en vuelos internacionales

En el escenario 4, el impacto es mucho más lento debido a que no todas las empresas operan con estos Airbus y por consiguiente no tienen una alternativa NEO.

Tabla 28. Aumento porcentual de aeronaves internacionales a partir de 2025 hasta 2050. Elaboración propia.

Aeronave en disminución	Aeronave en ascenso	Aumento porcentual anual
A320	A20N	0.016
A321	A21N	0.001

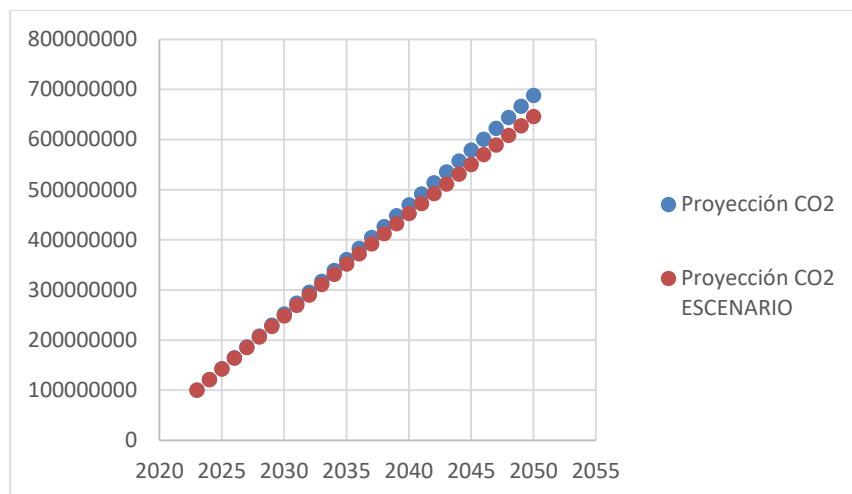


Figura 43. Grafico comparativo de escenario 4 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.

. Con relación al grafico anterior se ve claramente que la diferencia no es muy grande lo cual se condice con lo dicho en un principio en relación al porcentaje de participación de las aeronaves Airbus.

Tabla 29. Tabla comparativa escenario 4 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia

Especie	Variación	Normal [Kg]	Escenario [Kg]
CO2	-3.769%	11,022,129,401	10,606,665,779
NOX	-7.489%	47,205,422	43,670,407
SOX	-3.769%	2,939,235	2,828,444
CO	-3.879%	33,372,741	32,078,240
H2O	-3.769%	4,328,372,738	4,165,220,877
HC	-32.706%	3,741,483	2,517,812
PM	-11.601%	306,437	270,887

Realizando un aumento gradual en el porcentaje de participación de las líneas NEO en reemplazo de las aeronaves Airbus convencionales. La especie que presenta una mayor disminución es el HC con una disminución del 32,706%, un 16% menos que el escenario 3.

Escenario 5: El aumento de vuelos nacionales aumenta un 20% más de lo previsto

En este escenario, el incremento del 20% en los vuelos nacionales respecto a las proyecciones originales genera un aumento significativo en las emisiones de CO₂ y otros contaminantes asociados a la aviación. Este cambio en el tráfico aéreo nacional implica mayores emisiones debido a la mayor frecuencia de operaciones, afectando los niveles de emisión proyectados en comparación con los valores iniciales.

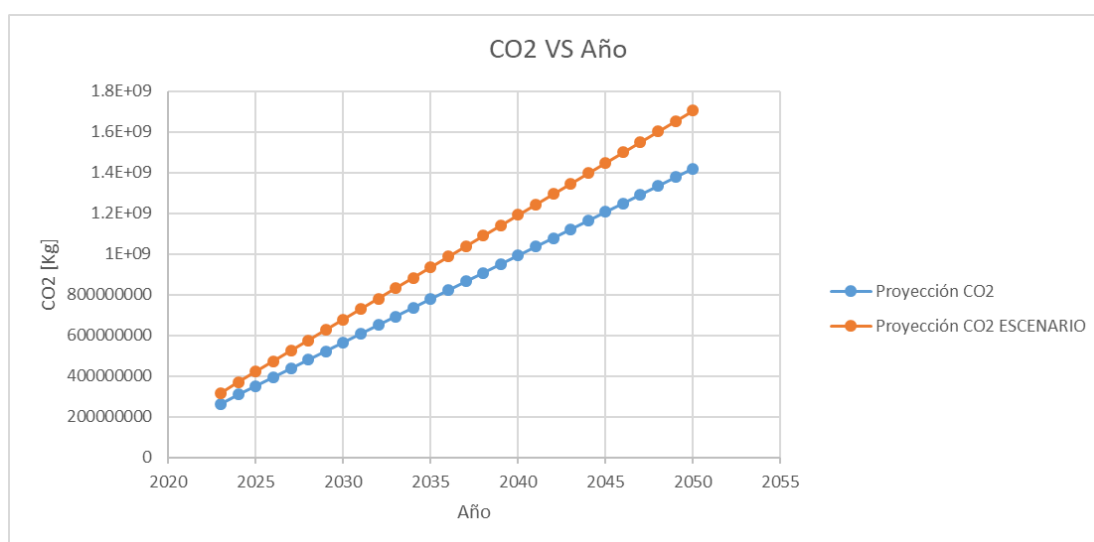


Figura 44. Grafico comparativo de escenario 5 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.

La gráfica muestra la proyección de emisiones de CO₂ (en kg) desde el año 2020 hasta el 2025, comparando la proyección original con la nueva proyección generada bajo el escenario ajustado. Se observa que, bajo el nuevo escenario, la curva de emisiones de CO₂ se encuentra consistentemente por encima de la proyección inicial, alcanzando un valor estimado de 14,413,050 kg para el año 2025 en comparación con los 13,840,063 kg de la proyección original. Esto evidencia un aumento del 4.14% en las emisiones de CO₂ como consecuencia del incremento de vuelos nacionales.

Especie	Variación	Normal [Kg]	Escenario [Kg]
CO2	20.000%	23,630,416,944	28,356,500,333
NOX	20.000%	105,230,921	124,866,413
SOX	20.000%	6,301,449	7,477,263
CO	20.000%	64,630,561	76,690,256
H2O	20.000%	9,279,633,520	11,011,160,372
HC	20.000%	9,187,111	10,901,374
PM	20.000%	984,602	1,168,323

Figura 45. Tabla comparativa escenario 5 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia

La tabla resume las variaciones en las emisiones de diferentes contaminantes bajo el nuevo escenario en comparación con el escenario original. Esta tabla no muestra cambios sorprendentes, ya que varían de manera lineal respecto al 20% de aumento en los vuelos.

Escenario 6: El aumento de vuelos nacionales es un 20% menor a lo previsto

Este escenario plantea una reducción del 20% en las proyecciones de emisiones, buscando minimizar el impacto ambiental asociado al aumento en la frecuencia de vuelos y al uso intensivo de combustibles. La implementación de esta reducción afecta las proyecciones de contaminantes para el año 2025, marcando un cambio en la gestión de emisiones.

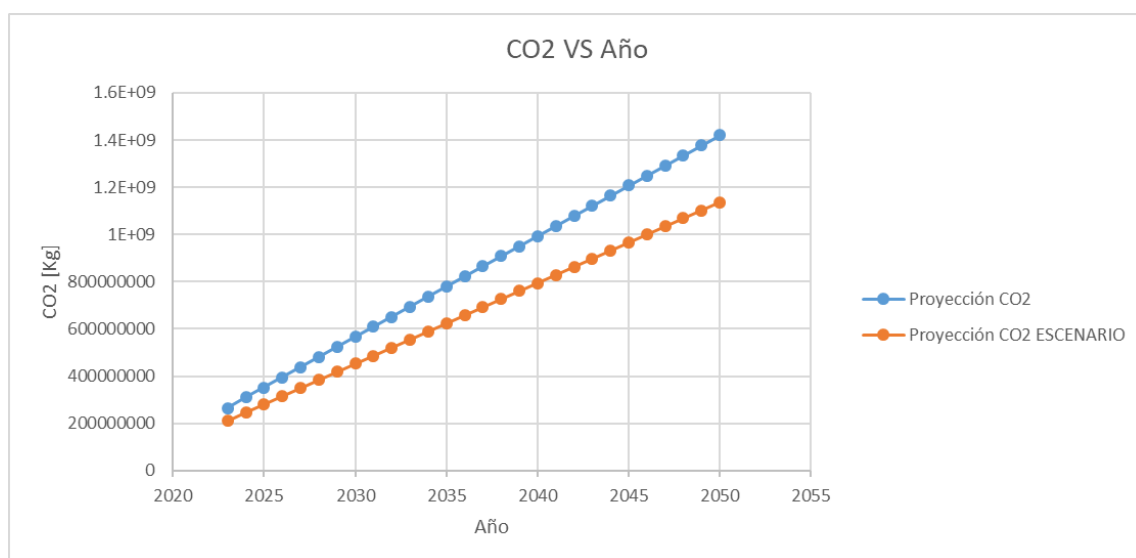


Figura 46. Gráfico comparativo de escenario 6 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.

La gráfica de proyección de CO₂ muestra cómo la implementación de una reducción del 20% en las emisiones proyectadas disminuye notablemente la curva de CO₂ esperada en comparación con la proyección inicial. Para el año 2025, el escenario ajustado muestra emisiones de aproximadamente 12,564,238 kg, frente a los 15,705,297 kg de la proyección normal, destacando una reducción considerable en la huella de carbono de la aviación.

Tabla 30. Tabla comparativa escenario 6 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia

Especie	Variación	Normal [Kg]	Escenario [Kg]
CO2	-20.000%	23,630,416,944	18,904,333,555
NOX	-20.000%	105,230,921	83,244,275
SOX	-20.000%	6,301,449	4,984,842
CO	-20.000%	64,630,561	51,126,838
H2O	-20.000%	9,279,633,520	7,340,773,581
HC	-20.000%	9,187,111	7,267,583
PM	-20.000%	984,602	778,882

Al igual que en el escenario anterior, no se presentan grandes sorpresas en esta tabla, ya que muestra lógicamente una disminución lineal en las emisiones generadas, debido a la disminución de vuelos realizados.

Escenario 7: El aumento de vuelos internacionales aumenta un 20% más de lo previsto

En este escenario, se proyecta una reducción del 20% en las emisiones de todas las especies contaminantes para cumplir con los objetivos de sostenibilidad y reducir el impacto ambiental de la aviación. Este ajuste refleja un compromiso hacia una operación más responsable y con menor huella de carbono.

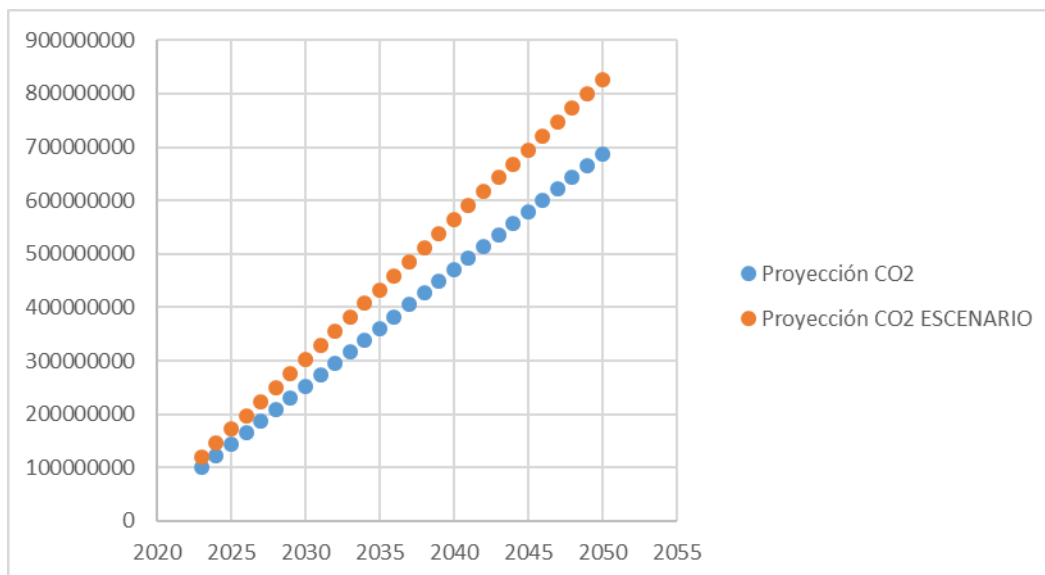


Figura 47. Grafico comparativo de escenario 7 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.

La gráfica de proyección de CO₂ muestra cómo la implementación de una reducción del 20% en las emisiones proyectadas disminuye notablemente la curva de CO₂ esperada en comparación con la proyección inicial. Para el año 2025, el escenario ajustado muestra emisiones de aproximadamente 12,564,238 kg, frente a los 15,705,297 kg de la proyección normal, destacando una reducción considerable en la huella de carbono de la aviación.

Tabla 31. Tabla comparativa escenario 7 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia

Especie	Variación	Normal [Kg]	Escenario [Kg]
CO2	20.000%	11,022,129,401	13,226,555,281
NOX	20.000%	47,205,422	56,132,141
SOX	20.000%	2,939,235	3,495,055
CO	20.000%	33,372,741	39,683,649
H2O	20.000%	4,328,372,738	5,146,883,905
HC	20.000%	3,741,483	4,449,012
PM	20.000%	306,437	364,385

La tabla muestra como aumentarían de manera lineal los contaminantes si aumentara un 20% los vuelos realizados en el ámbito internacional, si bien no es de gran utilidad por sí sola, si ayudara a la hora de generar los siguientes escenarios.

Escenario 8: El aumento de vuelos internacionales es un 20% menor a lo previsto

En este escenario, se proyecta una reducción del 20% en las emisiones de todas las especies contaminantes para cumplir con los objetivos de sostenibilidad y reducir el impacto ambiental de la aviación. Este ajuste refleja un compromiso hacia una operación más responsable y con menor huella de carbono.

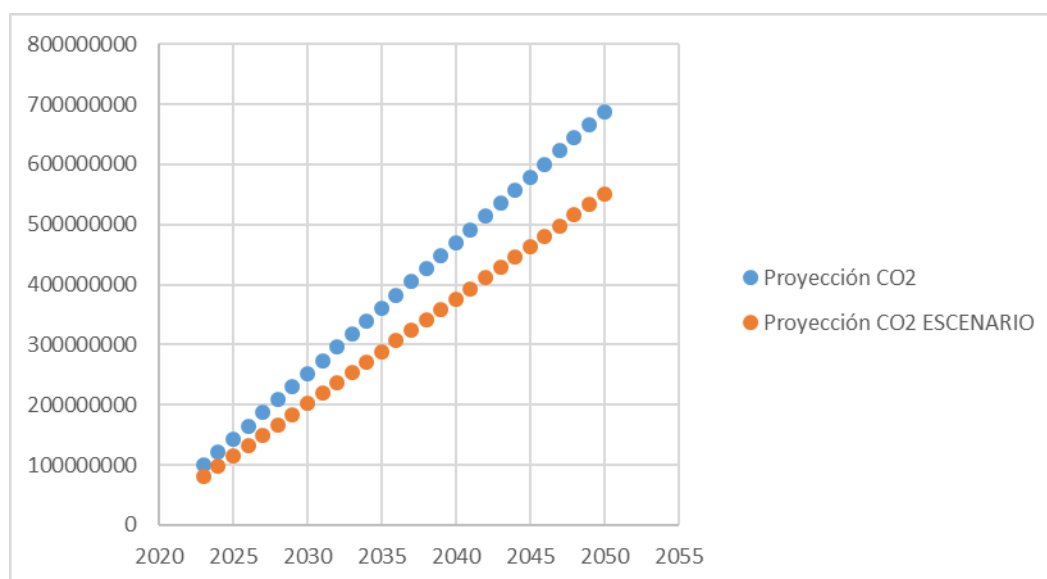


Figura 48. Gráfico comparativo de escenario 8 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.

La gráfica de proyección de CO₂ muestra cómo el ajuste del 20% en las emisiones proyectadas impacta la curva de emisiones, posicionando la proyección ajustada consistentemente por debajo de la original. Para el año 2025, el CO₂ proyectado en el escenario ajustado es de aproximadamente 8,817,021 kg, mientras que la proyección original era de 11,021,276 kg, lo que representa una reducción significativa en las emisiones de carbono.

Tabla 32. Tabla comparativa escenario 8 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia

Especie	Variación	Normal [Kg]	Escenario [Kg]
CO2	-20.000%	11,022,129,401	8,817,703,521
NOX	-20.000%	47,205,422	37,421,427
SOX	-20.000%	2,939,235	2,330,036
CO	-20.000%	33,372,741	26,455,766
H2O	-20.000%	4,328,372,738	3,431,255,937
HC	-20.000%	3,741,483	2,966,008
PM	-20.000%	306,437	242,923

Al igual que la tabla anterior, esta tabla solo presenta una variación porcentual de los vuelos, sin embargo, al mezclarlo con variaciones en el tipo de aeronave si presentara un cambio.

Escenario 9: Se produce en vuelos nacionales un cambio gradual en los vuelos a la línea NEO y además los vuelos en general presentan una disminución de un 20% respecto a la previsión

En este escenario, se observa un cambio gradual en los vuelos nacionales hacia la línea NEO, junto con una reducción del 20% en el total de vuelos en comparación con las previsiones iniciales. Esta transición hacia aeronaves más eficientes y la disminución en la frecuencia de vuelos impactan positivamente en las proyecciones de emisiones, con una reducción significativa de los contaminantes.

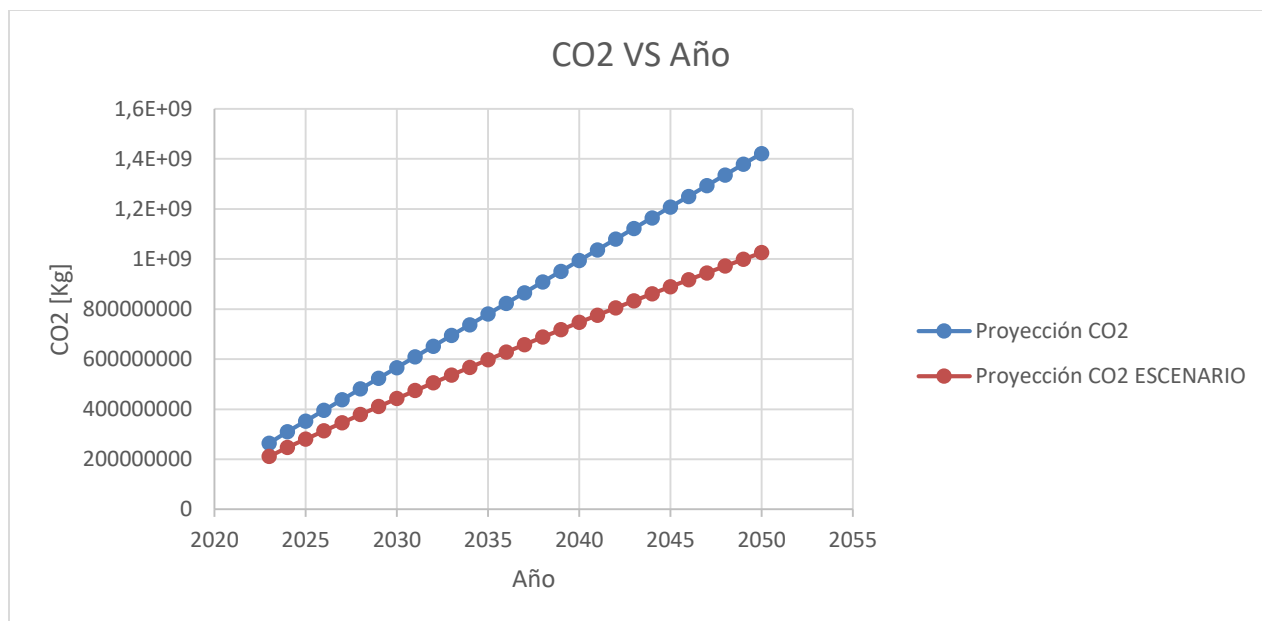


Figura 49. Grafico comparativo de escenario 9 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.

La gráfica muestra la proyección de CO₂ en dos escenarios: el escenario original y el escenario ajustado con la transición a la línea NEO y la reducción del 20% en vuelos. La proyección ajustada de CO₂ presenta una curva considerablemente inferior, alcanzando aproximadamente 10,622,359 kg en el año 2025 frente a los 13,278,737 kg de la proyección normal. Esta disminución refleja el impacto positivo de las medidas implementadas en la reducción de la huella de carbono en los vuelos nacionales.

Tabla 33. Tabla comparativa escenario 9 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia

Especie	Variación	Normal [Kg]	Escenario [Kg]
CO2	-21.745%	23,630,416,944	18,491,952,788
NOX	-23.373%	105,230,921	79,694,423
SOX	-21.745%	6,301,449	4,931,191
CO	-22.252%	64,630,561	50,248,917
H2O	-21.745%	9,279,633,520	7,261,765,592
HC	-34.158%	9,187,111	6,048,982
PM	-23.349%	984,602	754,704

La variación de contaminantes generados disminuye aún más, teniendo en cuenta el cambio progresivo del uso de aeronaves del tipo NEO, además de la disminución del 20% de vuelos

realizados. Siendo el HC el contaminante que presenta una mayor disminución con un 34% y el que presenta una mayor disminución el CO₂, SOX y H₂O con solo un 21%.

Escenario 10: Se produce en vuelos internacionales un cambio gradual en los vuelos a la línea NEO y además los vuelos en general presentan una disminución de un 20% respecto a la previsión

En este escenario, se plantea un cambio gradual hacia aeronaves de la línea NEO en vuelos internacionales, además de una reducción del 20% en la cantidad total de vuelos previstos. Esta combinación de factores permite reducir las emisiones de CO₂ y otros contaminantes en rutas internacionales, alineando las operaciones con metas de sostenibilidad

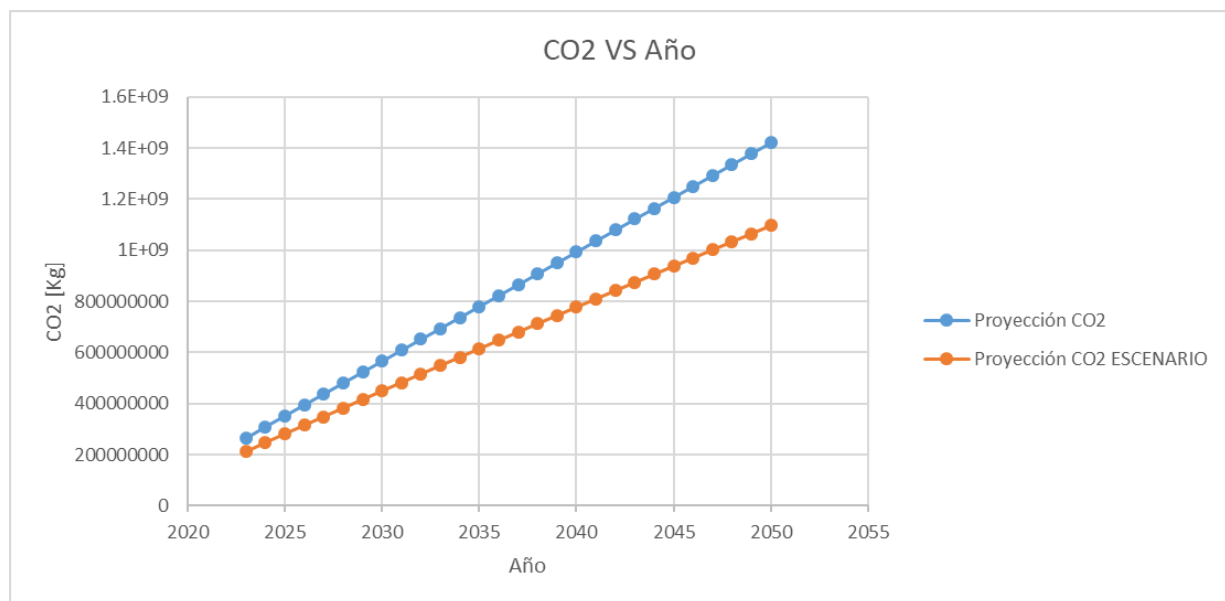


Figura 50. Gráfico comparativo de escenario 10 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia.

La gráfica ilustra la proyección de emisiones de CO₂ bajo dos escenarios: la proyección inicial y la ajustada, que considera la transición a aeronaves NEO y la reducción del 20% en vuelos. La

proyección ajustada muestra una disminución notable en las emisiones de CO₂, con un valor aproximado de 8,667,276 kg para el año 2025 en comparación con los 11,297,925 kg del escenario original. Esta reducción refleja el efecto de las medidas implementadas para reducir la huella de carbono en vuelos internacionales.

Tabla 34. Tabla comparativa escenario 10 vs proyección con datos iniciales. Elaboración propia

Especie	Variación	Normal [Kg]	Escenario [Kg]
CO2	-23.015%	11,022,129,401	8,485,332,623
NOX	-25.991%	47,205,422	34,593,415
SOX	-23.015%	2,939,235	2,262,755
CO	-23.103%	33,372,741	25,662,592
H2O	-23.015%	4,328,372,738	3,332,176,702
HC	-46.164%	3,741,483	2,014,250
PM	-29.281%	306,437	216,709

En este caso, las variaciones son aún mayores, puesto que el cambio de aeronaves NEO es inmediato, esto se evidencia en el porcentaje de disminución del HC siendo el mayoritario con 46%, mientras que los que presentan una menor disminución son los CO₂, SOX, H₂O y CO con solo un 23%.

4. Conclusiones y recomendaciones

Conclusión general

El objetivo principal fue proyectar las emisiones de contaminantes generados por la industria aeronáutica chilena hasta el año 2050. Para lograrlo, se estimaron las emisiones entre 2020 y 2024, con el fin de establecer líneas de tendencia basadas en la cantidad de vuelos realizados y en contaminantes clave como CO₂, CO, HC, NOX, SOX, PM y H₂O. Sin embargo, al comparar estos resultados con años anteriores, como 2015 y 2020, se observó una clara desviación, explicada principalmente por el impacto de la pandemia, que alteró significativamente las tendencias normales de la industria.

A partir de estas proyecciones, se estima que en 2050 el número de vuelos nacionales oscilará entre 508.010 y 515.355, mientras que, en el ámbito internacional, la variabilidad es mucho mayor, con cifras estimadas entre 124.658 y 262.413 vuelos, debido a la incertidumbre provocada por la pandemia. En cuanto a las emisiones de contaminantes, los resultados muestran un crecimiento proporcional al aumento de vuelos:

Para vuelos nacionales al 2050 en su fase LTO:

- CO₂: entre 1.419 y 1.468 kilotoneladas
- CO: entre 3,504 y 3,609 kilotoneladas
- H₂O: entre 576 y 577 kilotoneladas
- HC: entre 261 y 314 toneladas
- PM total: entre 69.4 y 70.5 toneladas
- SOX: entre 378 y 391 toneladas

- NOX: entre 6,377 y 6,584 kilotoneladas

Para vuelos internacionales al 2050 en su fase LTO:

- CO₂: entre 411 y 839 kilotoneladas
- CO: entre 1,140 y 2,483 kilotoneladas
- H₂O: entre 161 y 329 kilotoneladas
- HC: entre 88 y 279 toneladas
- PM total: entre 11 y 25 toneladas
- SOX: entre 109 y 223 toneladas
- NOX: entre 1,535 y 3,503 kilotoneladas

Por otro lado, se tienen las emisiones en la fase CCD, las cuales se presentan a continuación:

Para vuelos nacionales al 2050 en su fase CCD:

- CO₂: entre 5.111 y 5.186 kilotoneladas
- CO: entre 2,342 y 2,389 kilotoneladas
- H₂O: entre 2.007 y 2.036 kilotoneladas
- HC: entre 188 y 217 toneladas
- PM total: entre 285 y 289 toneladas
- SOX: entre 1,363 y 1,383 toneladas
- NOX: entre 21,4 y 21,6 kilotoneladas

Para vuelos internacionales al 2050 en su fase CCD:

- CO₂: entre 6.639 y 11.420 kilotoneladas
- CO: entre 2,568 y 4,440 kilotoneladas
- H₂O: entre 2.607 y 4.484 kilotoneladas
- HC: entre 126 y 416 toneladas

- PM total: entre 265 y 471 toneladas
- SOX: entre 1,770 y 3,045 kilotoneladas
- NOX: entre 24 y 46 kilotoneladas

Es evidente que la pandemia dejó una huella significativa en la industria, especialmente en el ámbito internacional, donde las proyecciones presentan mayor incertidumbre. Aun así, estos resultados entregan una visión clara del posible comportamiento de las emisiones a futuro y subrayan la necesidad de medidas que mitiguen su impacto en el medioambiente.

Conclusiones específicas

De acuerdo con los objetivos específicos planteados, se realizó un análisis detallado de las rutas aéreas y la participación de aeronaves en vuelos nacionales e internacionales entre los años 2020 y 2024. A nivel nacional, destacan las rutas SCFA-SCEL y SCCL-SCCF, con un 6,03% y 5,79% de la actividad total, respectivamente, debido a su relevancia para la industria minera. La tercera ruta más significativa es SCCL-SCTE, con un 4,83%, probablemente impulsada por la industria salmonera y el turismo en la región, lo que podría ser un factor clave en futuras proyecciones. Por su parte, en el ámbito internacional, las rutas más importantes son SCCL-SPJC y SCCL-SBGR, con una participación del 15,20% y 10,28%, respectivamente. Esto se explica porque ambas rutas conectan con centros estratégicos en Sudamérica, facilitando conexiones hacia el Caribe, América del Norte y Europa, además de fortalecer los lazos comerciales y turísticos con Perú y Brasil.

En términos de participación de aeronaves, en vuelos nacionales predomina el uso de A320 y A321, con un 57,92% y 26,37%, seguidos de sus versiones NEO con 5,65% y 6,00%, respectivamente. Estos datos son relevantes, ya que permiten caracterizar el crecimiento de contaminantes a partir de

estos dos modelos principales. Otras aeronaves, como el A319, tienen participaciones marginales, con apenas un 0,91%. En contraste, en vuelos internacionales, aunque el A320 sigue liderando con un 42,32%, se observa una mayor diversificación con modelos como el B789 (11,90%), B788 (10,87%), B732 (7,97%), A321 (6,18%) y A21N (4,15%). Esta variedad hace que, si bien un modelo predomina, el análisis del restante 50% de la flota resulte más complejo debido a la diversidad de aeronaves utilizadas.

En cuanto a las emisiones totales generadas entre 2020 y 2024, los resultados fueron comparados y validados con los datos presentados por Flores (2020) en su memoria “Estimación de los niveles de actividad y emisiones producidas por el transporte marítimo y aéreo en Chile al 2050”, y con los datos reportados por el INGEI hasta el año 2020. Se obtuvo un margen de error del 5% en las emisiones proyectadas, lo que reafirma la consistencia y precisión del análisis.

Tabla 35. Tabla resumen emisiones generadas 2020-2024. Elaboración propia a partir de datos JAC y OACI

Año	CO2 [Kg]	CO [Kg]	H2O [Kg]	HC [Kg]	PM total [Kg]	NOX [Kg]	SOX [Kg]
2020	1.229.720.551,51	920.176,42	482.909.313,56	138.725,72	54.108,50	5.353.556,01	327.925,49
2021	1.454.446.140,87	1.136.857,56	571.158.737,85	160.165,10	62.845,66	6.102.624,02	387.852,34
2022	2.288.782.489,97	1.678.287,23	898.801.498,02	210.904,72	100.538,53	9.565.204,85	610.342,18
2023	2.720.566.423,89	1.953.549,58	1.068.362.648,27	222.236,03	122.558,69	11.386.572,22	725.484,74
2024	2.051.442.399,10	1.635.750,62	805.600.685,06	159.399,04	93.255,95	8.581.428,24	547.053,01
Total	9.744.958.005,33	7.324.621,41	3.826.832.882,76	891.430,62	433.307,33	40.989.385,34	2.598.657,76

En el proceso de creación de escenarios, se identificaron 10 escenarios principales, donde las variables más relevantes son el tipo de aeronave y el crecimiento o reducción en la cantidad de vuelos. En vuelos nacionales, el cambio de aeronaves convencionales a las versiones NEO muestra una reducción del 13,8% en emisiones de CO₂ para un cambio inmediato y un 2,22% para un cambio gradual hasta el año 2050, siendo esta última opción más viable desde una perspectiva económica y técnica. En vuelos internacionales, las reducciones son menores, con 6,23% para el cambio

inmediato y 3,77% para el gradual, debido a la mayor diversificación de aeronaves.

Por último, la combinación de una reducción del 20% en vuelos nacionales con una adopción gradual de tecnología NEO resulta en una disminución total de emisiones cercana al 21,75% para el CO₂, mientras que, si solo se considera el cambio gradual de tecnología, la reducción sería del 12%. Esto demuestra que la disminución de vuelos juega un rol fundamental para lograr reducciones significativas en las emisiones de contaminantes en la industria aérea nacional.

Recomendaciones

Es importante tener en cuenta las siguientes recomendaciones que permitirán entender de mejor manera esta memoria y las formas en que la misma puede ser mejorar:

- Actualizar los datos hasta la fecha más reciente en la que se esté realizando la memoria, con el fin de obtener resultados actualizados que permitan realizar proyecciones más precisas.
- Al solicitar información a cualquier institución gubernamental, es crucial pedir un desglose detallado para evitar cálculos erróneos o duplicación de datos. Esto se evidencia, por ejemplo, al identificar que un mismo vuelo puede aparecer en dos registros distintos: uno para el despegue y otro para el aterrizaje.
- Informarse sobre los paradigmas que guían las tendencias en el área a medir y proyectar. En este caso, un cambio en el tipo de aeronave afecta directamente la cantidad de contaminantes emitidos. Sin embargo, si se considera el uso de combustibles sostenibles (SAF), es importante entender que estos solo mitigan los gases de efecto invernadero si se considera el ciclo completo, desde la producción hasta la emisión de gases de combustión.

Referencias

EEA (2013). Emisiones de dióxido de carbono. Recuperado el 4 de julio de 2024, de https://www.eea.europa.eu/es/pressroom/infografia/emisiones-de-dioxido-de-carbono/image/image_view_fullscreen

DGAC. (s.f.). Servicio de transporte aéreo aeronaves grandes. Obtenido de <https://www.dgac.gob.cl/servicio-de-transporte-aereo-aeronaves-grandes/>

ENAER (n.d.). *Historia*. Recuperado el 4 de julio de 2024, de <https://www.enaer.cl/historia/>

JAC. (n.d.). *Historia*. Recuperado el 4 de julio de 2024, de <https://www.jac.gob.cl/historia>

OACI. (n.d.). Sobre la OACI. el 4 de julio de 2024, de <https://www.icao.int/about-icao/Pages/ES/default.aspx>

IATA. (n.d.). About IATA. Recuperado el 4 de julio de 2024, de <https://www.iata.org/en/about/>

IATA. (n.d.). Environmental Assessment (IEnvA). Recuperado el 1 de diciembre de 2024, de <https://www.iata.org/en/services/certification/environment-sustainability/environmental-assessment/>

OACI (n.d.). *Environmental Assessment (IEnvA)*. Recuperado el 1 de diciembre de 2024, de <https://www.iata.org/en/services/certification/environment-sustainability/environmental-assessment/>

Statista. (n.d.). *Tráfico mundial de pasajeros del transporte aéreo desde 2004 hasta 2022*. Recuperado el 1 de diciembre de 2024, de <https://es.statista.com/estadisticas/1123603/trafico->

[mundial-de-pasajeros-del-transporte-aereo/](#)

Birtles, P. (1999). *Boeing: The complete story*. The Crowood Press.

Miller, R. E. (1991). *Jet Age: The Comet, the 707, and the race to shrink the world*. Smithsonian Books.

Doganis, R. (2006). *The airline business*. Routledge.

International Air Transport Association (IATA). (n.d.). *Sustainable aviation fuel (SAF)*. Recuperado de <https://www.iata.org>.

Airbus. (n.d.). *Hydrogen aviation: Towards zero-emission flights*. Recuperado de <https://www.airbus.com>.

International Civil Aviation Organization (ICAO). (n.d.). *Artificial intelligence in aviation*. Recuperado de <https://www.icao.int>.

JAC. (n.d.). Base de datos T672.xlsx. Recuperado el 4 octubre 2024, de <https://drive.google.com/drive/folders/1K8Tc2nYSnnOfrVbPG5ZNqhJJ8PXpeW4y?usp=sharing>

Rolls-Royce. (2005). *The jet engine* (5th ed.). Wiley.

Mattingly, J. D., Heiser, W. H., & Pratt, D. T. (2002). *Aircraft engine design*. AIAA Education Series.

IATA. (n.d.). Fuel Fact Sheet. Recuperado de <https://www.iata.org>

Latam Airlines Group. (n.d.). *Nuestra flota*. Recuperado el 1 de diciembre de 2024, de <https://www.latam.com>

Sky Airline. (n.d.). *Nuestra flota y destinos*. Recuperado el 1 de diciembre de 2024, de <https://www.skyairline.com>

JetSmart Airlines. (n.d.). *Nuestra flota*. Recuperado el 1 de diciembre de 2024, de <https://www.jetSMART.com>

Flores, C. (2023). *Estimación de los niveles de actividad y emisiones producidas por el transporte marítimo y aéreo en Chile al 2050* (Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad Técnica Federico Santa María). Documento no publicado.

Bibliografía

Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea. (s.f.). ICAO Aircraft Engine Emissions Databank. Obtenido de <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>

Agencia Europea de Medio Ambiente. (2023). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023. Obtenido de <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation.3/view>

Airfleets. (s.f.). Home. Obtenido de <https://www.airfleets.es/home/>

Banco Mundial. (2021). Departures of air transport passengers. Obtenido de https://datos.bancomundial.org/indicador/IS.AIR.DPRT?end=2021&name_desc=false&start=1970&view=chart

Dirección General de Aeronáutica Civil de Chile. (s.f.). Servicio de transporte aéreo aeronaves grandes. Obtenido de <https://www.dgac.gob.cl/servicio-de-transporte-aereo-aeronaves->

grandes/

Flightradar24. (s.f.). Statistics. Obtenido de <https://www.flightradar24.com/data/statistics>

Flores, C. (2023). Estimación de los niveles de actividad y emisiones producidas por el transporte marítimo y aéreo en Chile al 2050 [Memoria de titulación]. Universidad Técnica Federico Santa María.

García Hernández, L. (2017). Optimización del uso de combustibles en aeronaves comerciales. Universidad de Sevilla. Obtenido de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/use/abreproy//fichero/60424%252FPFC+Luca+Garc%C3%ADa+Hern%C3%A1ndez.pdf>

Gobierno de Chile. (s.f.). Ministerio de Energía y MTT lanzan programa Vuelo Limpio para impulsar sostenibilidad junto a aerolíneas. Obtenido de <https://www.gob.cl/noticias/ministerio-de-energia-y-mtt-lanzan-programa-vuelo-limpio-para-impulsar-sostenibilidad-junto-a-aerolineas/>

Hannah Ritchie. (2024). What share of global CO₂ emissions come from aviation? Published

online at OurWorldinData.org. Obtenido de <https://ourworldindata.org/global-aviation-emissions>

JetSMART. (s.f.). Sostenibilidad SMART. Obtenido de <https://jetsmart.com/cl/es/minisitios/sostenibilidad-smart/home>

Junta aeronáutica Civil. (2024). T672 [Documento recibido a través de solicitud de transparencia]. Junta aeronáutica Civil.

Junta de Aeronáutica Civil de Chile. (2020). Anuario 2020. Obtenido de <https://www.jac.gob.cl/wp-content/uploads/2021/12/Anuario-2020-final.pdf>

LATAM Airlines Group. (s.f.). Fleet. Obtenido de <https://www.latamairlinesgroup.net/es/fleet>

López, J. (2013). Análisis de los sistemas de combustibles de una aeronave comercial. Universitat Politècnica de Catalunya. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/17686/1/PFC%20Jose%20Lopez%20Memoria.pdf>

Memoria Chilena. (s.f.). La aviación en Chile. Obtenido de <https://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-728.html>

Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (s.f.). Sector Energía en el Sistema Nacional de Información. Obtenido de <https://snichile.mma.gob.cl/sector-energia/>

Organización de Aviación Civil Internacional. (s.f.). Manual de métodos de cálculo de las emisiones de CO₂. Obtenido de https://www.icao.int/publications/Documents/9889_cons_es.pdf

SKY Airline. (2023). Cerramos 2023 con 30 aviones en nuestra flota. Obtenido de <https://www.skyairline.com/blog/cerramos-2023-con-30-aviones-en-nuestra-flota/>

Sociedad Aeronáutica de Chile. (s.f.). Las fases de un vuelo más allá del despegue y aterrizaje. Obtenido de <https://www.sociedadaeronautica.org/las-fases-de-un-vuelo-mas-alla-del-despegue-y-aterrizaje/>

Urbaneja Marcano, L. C. (2016). Influencia de los factores externos en la operación de los sistemas de combustibles de aeronaves. Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de

https://oa.upm.es/42931/1/TFG_LUISANA_CAROLINA_URBANEJA_MARCANO.pdf

Vuelo Limpio. (2024). SAF2050. Obtenido de https://vuelolimpio.cl/wp-content/uploads/2024/04/HDR_SAF2050.pdf

World Aviation ATO. (s.f.). Combustible de un avión. Obtenido de [https://worldaviationato.com/es/combustible-de-un-avion/#:~:text=Entre%20los%20distintos%20tipos%20de,JET%20B%20\(Jet%20fuels\).](https://worldaviationato.com/es/combustible-de-un-avion/#:~:text=Entre%20los%20distintos%20tipos%20de,JET%20B%20(Jet%20fuels).)

Agencia Europea de Medio Ambiente. (2013). Emisiones de dióxido de carbono. Recuperado el 1 de diciembre de 2024, de https://www.eea.europa.eu/es/pressroom/infografia/emisiones-de-dioxido-de-carbono/image/image_view_fullscreen

Rolls-Royce. (2005). *The jet engine* (5th ed.). Wiley.

Mattingly, J. D., Heiser, W. H., & Pratt, D. T. (2002). *Aircraft engine design*. AIAA Education Series.

ANEXOS

Anexo 1: Sigla ICAO, ciudad y País

ICAO	Ciudad	País
SCAR	Arica	Chile
SCAS	Ovalle	Chile
SCAT	Coyhaique	Chile
SCBA	Balmaceda	Chile
SCCC	Chile Chico	Chile
SCCF	Caldera	Chile
SCCI	Punta Arenas	Chile
SCCY	Antártica	Chile
SCDA	Iquique	Chile
SCEL	Santiago	Chile
SCES	Porvenir	Chile
SCFA	Antofagasta	Chile
SCFT	Futaleufú	Chile
SCGE	Temuco	Chile
SCGZ	La Serena	Chile
SCHR	Pichilemu	Chile
SCIE	Concepción	Chile
SCIP	Isla de Pascua	Chile

SCIR	Isla Mocha	Chile
SCJO	Valdivia	Chile
SCLL	Vallenar	Chile
SCMK	Melinka	Chile
SCNT	Santiago	Chile
SCON	Osorno	Chile
SCPF	Puerto Montt	Chile
SCPQ	Dalcahue	Chile
SCQP	Quellón	Chile
SCRM	Antártica	Chile
SCSE	La Serena	Chile
SCTE	Puerto Montt	Chile
SCTN	Aysén	Chile
SCVD	Valdivia	Chile
SCVM	Vallenar	Chile
CYYZ	Toronto	Canadá
EGLL	Londres	Reino Unido
EGYP	RAF Mount Pleasant	Islas Malvinas
EHAM	Ámsterdam	Países Bajos
GCTS	Tenerife	España

KATL	Atlanta	EE. UU.
KBFM	Mobile	EE. UU.
KDFW	Dallas/Fort Worth	EE. UU.
KIAH	Houston	EE. UU.
KJFK	Nueva York	EE. UU.
KLAX	Los Ángeles	EE. UU.
KMCO	Orlando	EE. UU.
KMIA	Miami	EE. UU.
LEBL	Barcelona	España
LEMD	Madrid	España
LFBD	Burdeos	Francia
LFPG	París	Francia
LIRF	Roma	Italia
MDPC	Punta Cana	República Dominicana
MDSD	Santo Domingo	República Dominicana
MMMX	Ciudad de México	México
MMUN	Cancún	México
MPTO	Ciudad de Panamá	Panamá
MTTP	Puerto Príncipe	Haití

NTAA	Papeete	Tahití
NZAA	Auckland	Nueva Zelanda
SABE	Buenos Aires	Argentina
SACO	Córdoba	Argentina
SADP	El Palomar	Argentina
SAEZ	Ezeiza	Argentina
SAME	Mendoza	Argentina
SANE	Santiago del Estero	Argentina
SASA	Salta	Argentina
SAVY	Villa Reynolds	Argentina
SAWC	El Calafate	Argentina
SAWG	Río Gallegos	Argentina
SAWH	Ushuaia	Argentina
SAZS	Bariloche	Argentina
SBBR	Brasilia	Brasil
SBCF	Belo Horizonte	Brasil
SBCT	Curitiba	Brasil
SBFI	Foz do Iguaçu	Brasil
SBFL	Florianópolis	Brasil
SBFZ	Fortaleza	Brasil

SBGL	Río de Janeiro	Brasil
SBGR	São Paulo	Brasil
SBKP	Campinas	Brasil
SBPA	Porto Alegre	Brasil
SBSV	Salvador	Brasil
SBCT	Curitiba	Brasil
SBGR	Guarulhos	Brasil
SBPA	Porto Alegre	Brasil
	No	No
AA41	disponible	disponible
	No	No
AB13	disponible	disponible
	No	No
AC20	disponible	disponible
	No	No
AC63	disponible	disponible
	No	No
AC65	disponible	disponible
	No	No
AC69	disponible	disponible
	No	No
AC70	disponible	disponible
	No	No
AC72	disponible	disponible

	No	No
AC73	disponible	disponible
SBRF	Recife	Brasil
SCAP	Chaitén	Chile
SCBT	Los Ángeles	Chile
SCCH	Chillán	Chile
SCCZ	Futaleufú	Chile
SCFM	Frutillar	Chile
SCGO	Osorno	Chile
SCIH	Coya	Chile
SCKP	Copiapó	Chile
SCLD	Valdivia	Chile
SCLI	Curacaví	Chile
	Puerto	
SCMA	Montt	Chile
SCNK	Concepción	Chile
SCOH	Osorno	Chile
SCOV	Ovalle	Chile
	Puerto	
SCPB	Barrios	Guatemala
	Puerto	
SCPC	Carreño	Colombia
SCPE	Pucón	Chile
	Puerto	
SCPH	Aysén	Chile

SCPK	Palena	Chile
	Puerto	
SCPM	Montt	Chile
SCRD	Río Claro	Chile
SCSR	Santiago	Chile
SCTB	Tobalaba	Chile
SCVI	Vicuña	Chile
	Santiago del	
SDSC	Estero	Argentina
SEGU	Guayaquil	Ecuador
SEQM	Quito	Ecuador
SGAS	Asunción	Paraguay
SHBH	Bahía	Brasil
SHPG	Porto Alegre	Brasil
SHSE	Salvador	Brasil
SKBO	Bogotá	Colombia
SKBQ	Barranquilla	Colombia
SKCG	Cartagena	Colombia
SKCL	Cali	Colombia
SKLT	Leticia	Colombia
SKRG	Rionegro	Colombia
SLCB	Cochabamba	Bolivia
SLLP	La Paz	Bolivia
SLVR	Santa Cruz	Bolivia

		Guayana
SOCA	Cayenne	Francesa
SPHI	Chiclayo	Perú
SPJC	Lima	Perú
SPLO	Ilo	Perú
SPQU	Arequipa	Perú
SPRU	Trujillo	Perú
SPSO	Pisco	Perú
SPZO	Cusco	Perú
	Punta del	
SULS	Este	Uruguay
SUMU	Montevideo	Uruguay
YMML	Melbourne	Australia
YSSY	Sídney	Australia

Anexo 2: Ciudad, país, latitud y longitud

Ciudad	País	Latitud	Longitud	Latitud2	Longitud2
Arica	Chile	18.4783° S	70.3126° W	-18.4783	-70.3126
Ovalle	Chile	30.5986° S	71.2008° W	-30.5986	-71.2008
Coyhaique	Chile	45.5711° S	72.0683° W	-45.5711	-72.0683
Balmaceda	Chile	45.9167° S	71.7000° W	-45.9167	-71.7

Chile Chico	Chile	46.5414° S	71.7266° W	-46.5414	-71.7266
Caldera	Chile	27.0669° S	70.8167° W	-27.0669	-70.8167
Punta Arenas	Chile	53.1638° S	70.9171° W	-53.1638	-70.9171
Antártica	Chile	62.1598° S	58.4926° W	-62.1598	-58.4926
Iquique	Chile	20.2141° S	70.1529° W	-20.2141	-70.1529
Santiago	Chile	33.4489° S	70.6693° W	-33.4489	-70.6693
Porvenir	Chile	53.3023° S	70.3666° W	-53.3023	-70.3666
Antofagasta	Chile	23.6500° S	70.4000° W	-23.65	-70.4
Futaleufú	Chile	43.1820° S	71.8675° W	-43.182	-71.8675
Temuco	Chile	No disponible	No disponible	-38.7417	-72.5908
La Serena	Chile	29.9027° S	71.2519° W	-29.9027	-71.2519
Pichilemu	Chile	34.3866° S	72.0066° W	-34.3866	-72.0066

Concepción	Chile	36.8201° S	73.0444° W	-36.8201	-73.0444
Isla de Pascua	Chile	27.1127° S	109.3497° W	-27.1127	-109.3497
Isla Mocha	Chile	38.3897° S	73.8667° W	-38.3897	-73.8667
Valdivia	Chile	39.8174° S	73.2425° W	-39.8174	-73.2425
Vallenar	Chile	28.5763° S	70.7571° W	-28.5763	-70.7571
Melinka	Chile	43.8972° S	73.7428° W	-43.8972	-73.7428
Santiago	Chile	33.4489° S	70.6693° W	-33.4489	-70.6693
Osorno	Chile	40.5741° S	73.1339° W	-40.5741	-73.1339
Puerto Montt	Chile	41.4717° S	72.9369° W	-41.4717	-72.9369
Dalcahue	Chile	42.3803° S	73.6519° W	-42.3803	-73.6519
Quellón	Chile	43.1207° S	73.6163° W	-43.1207	-73.6163
Antártica	Chile	62.1598° S	58.4926° W	-62.1598	-58.4926

La Serena	Chile	29.9027° S	71.2519° W	-29.9027	-71.2519
Puerto Montt	Chile	41.4717° S	72.9369° W	-41.4717	-72.9369
Aysén	Chile	45.4036° S	72.6912° W	-45.4036	-72.6912
Valdivia	Chile	39.8174° S	73.2425° W	-39.8174	-73.2425
Vallenar	Chile	28.5763° S	70.7571° W	-28.5763	-70.7571
Toronto	Canadá	43.6511° N	79.3837° W	43.6511	-79.3837
Londres	Reino Unido	51.5074° N	0.1278° W	51.5074	-0.00001278
RAF Mount Pleasant	Islas Malvinas	51.8228° S	58.4473° W	-51.8228	-58.4473
Ámsterdam	Países Bajos	52.3676° N	4.9041° E	52.3676	4.9041
Tenerife	España	28.2916° N	16.6291° W	28.2916	-16.6291
Atlanta	EE. UU.	33.7490° N	84.3880° W	33.749	-84.388
Mobile	EE. UU.	30.6954° N	88.0399° W	30.6954	-88.0399

Dallas/Fort Worth	EE. UU.	32.8998° N	97.0403° W	32.8998	-97.0403
Houston	EE. UU.	29.7604° N	95.3698° W	29.7604	-95.3698
Nueva York	EE. UU.	40.7128° N	74.0060° W	40.7128	-74.006
Los Ángeles	EE. UU.	34.0522° N	118.2437° W	34.0522	-118.2437
Orlando	EE. UU.	28.5383° N	81.3792° W	28.5383	-81.3792
Miami	EE. UU.	25.7617° N	80.1918° W	25.7617	-80.1918
Barcelona	España	41.3851° N	2.1734° E	41.3851	2.1734
Madrid	España	40.4168° N	3.7038° W	40.4168	-3.7038
Burdeos	Francia	44.8378° N	0.5792° W	44.8378	-0.00005792
París	Francia	48.8566° N	2.3522° E	48.8566	2.3522
Roma	Italia	41.9028° N	12.4964° E	41.9028	12.4964
Punta Cana	República Dominicana	18.5601° N	68.3725° W	18.5601	-68.3725
Santo Domingo	República Dominicana	18.4861° N	69.9312° W	18.4861	-69.9312
Ciudad de México	México	19.4326° N	99.1332° W	19.4326	-99.1332
Cancún	México	21.1619° N	86.8515° W	21.1619	-86.8515

Ciudad de Panamá	Panamá	8.9824° N	79.5199° W	8.9824	-79.5199
Puerto Príncipe	Haití	18.5944° N	72.3074° W	18.5944	-72.3074
Papeete	Tahití	17.5516° S	149.5585° W	-17.5516	-149.5585
Auckland	Nueva Zelanda	36.8485° S	174.7633° E	-36.8485	174.7633
Buenos Aires	Argentina	34.6037° S	58.3816° W	-34.6037	-58.3816
Córdoba	Argentina	31.4201° S	64.1888° W	-31.4201	-64.1888
El Palomar	Argentina	34.6085° S	58.5565° W	-34.6085	-58.5565
Ezeiza	Argentina	34.8546° S	58.5358° W	-34.8546	-58.5358
Mendoza	Argentina	32.8895° S	68.8458° W	-32.8895	-68.8458
Santiago del Estero	Argentina	27.7844° S	64.2642° W	-27.7844	-64.2642
Salta	Argentina	24.7821° S	65.4232° W	-24.7821	-65.4232
Villa Reynolds	Argentina	33.7260° S	65.3871° W	-33.726	-65.3871

El Calafate	Argentina	50.3379° S	72.2648° W	-50.3379	-72.2648
Río Gallegos	Argentina	51.6226° S	69.2181° W	-51.6226	-69.2181
Ushuaia	Argentina	54.8019° S	68.3030° W	-54.8019	-68.303
Bariloche	Argentina	41.1335° S	71.3103° W	-41.1335	-71.3103
Brasilia	Brasil	15.7939° S	47.8828° W	-15.7939	-47.8828
Belo Horizonte	Brasil	19.9167° S	43.9345° W	-19.9167	-43.9345
Curitiba	Brasil	25.4284° S	49.2733° W	-25.4284	-49.2733
Foz do Iguaçu	Brasil	25.5163° S	54.5854° W	-25.5163	-54.5854
Florianópolis	Brasil	27.5954° S	48.5480° W	-27.5954	-48.548
Fortaleza	Brasil	3.7172° S	38.5434° W	-3.7172	-38.5434
Río de Janeiro	Brasil	22.9068° S	43.1729° W	-22.9068	-43.1729
São Paulo	Brasil	23.5505° S	46.6333° W	-23.5505	-46.6333

Campinas	Brasil	22.9099° S	47.0626° W	-22.9099	-47.0626
Porto Alegre	Brasil	30.0346° S	51.2177° W	-30.0346	-51.2177
Salvador	Brasil	12.9714° S	38.5014° W	-12.9714	-38.5014
Recife	Brasil	8.0476° S	34.8770° W	-8.0476	-34.877
Chaitén	Chile	42.9143° S	72.7077° W	-42.9143	-72.7077
Los Ángeles	Chile	37.4697° S	72.3537° W	-37.4697	-72.3537
Chillán	Chile	36.6066° S	72.1023° W	-36.6066	-72.1023
Futaleufú	Chile	43.1820° S	71.8675° W	-43.182	-71.8675
Frutillar	Chile	41.1264° S	73.0300° W	-41.1264	-73.03
Osorno	Chile	40.5741° S	73.1339° W	-40.5741	-73.1339
Coya	Chile	34.2981° S	70.5178° W	-34.2981	-70.5178
Copiapó	Chile	27.3668° S	70.3322° W	-27.3668	-70.3322

Valdivia	Chile	39.8174° S	73.2425° W	-39.8174	-73.2425
Curacaví	Chile	33.3989° S	71.1399° W	-33.3989	-71.1399
Puerto Barrios	Guatemala	15.7175° N	88.5965° W	15.7175	-88.5965
Puerto Carreño	Colombia	6.1894° N	67.4858° W	6.1894	-67.4858
Pucón	Chile	39.2821° S	71.9535° W	-39.2821	-71.9535
Puerto Aysén	Chile	45.4042° S	72.6885° W	-45.4042	-72.6885
Palena	Chile	43.6156° S	71.8036° W	-43.6156	-71.8036
Río Claro	Chile	35.1387° S	71.2626° W	-35.1387	-71.2626
Tobalaba	Chile	33.4426° S	70.5448° W	-33.4426	-70.5448
Vicuña	Chile	30.0319° S	70.7081° W	-30.0319	-70.7081
Guayaquil	Ecuador	2.1700° S	79.9224° W	-2.17	-79.9224
Quito	Ecuador	0.1807° S	78.4678° W	-0.2297	-78.4678

Asunción	Paraguay	25.2637° S	57.5759° W	-25.2637	-57.5759
Bahía	Brasil	12.9714° S	38.5014° W	-12.9714	-38.5014
Bogotá	Colombia	4.7110° N	74.0721° W	4.711	-74.0721
Barranquilla	Colombia	10.9685° N	74.7813° W	10.9685	-74.7813
Cartagena	Colombia	10.3910° N	75.4794° W	10.391	-75.4794
Cali	Colombia	3.4516° N	76.5320° W	3.4516	-76.532
Leticia	Colombia	4.2150° S	69.9406° W	-4.215	-69.9406
Rionegro	Colombia	6.1551° N	75.3756° W	6.1551	-75.3756
Cochabamba	Bolivia	17.4134° S	66.1658° W	-17.4134	-66.1658
La Paz	Bolivia	16.5000° S	68.1500° W	-16.5	-68.15
Santa Cruz	Bolivia	17.8146° S	63.1561° W	-17.8146	-63.1561
Cayenne	Guayana Francesa	4.9224° N	52.3134° W	4.9224	-52.3134

Chiclayo	Perú	6.7714° S	79.8409° W	-6.7714	-79.8409
Lima	Perú	12.0464° S	77.0428° W	-12.0464	-77.0428
Ilo	Perú	17.6399° S	71.3371° W	-17.6399	-71.3371
Arequipa	Perú	16.4090° S	71.5375° W	-16.409	-71.5375
Trujillo	Perú	8.1092° S	79.0215° W	-8.1092	-79.0215
Pisco	Perú	13.7107° S	76.2030° W	-13.7107	-76.203
Cusco	Perú	13.5320° S	71.9675° W	-13.532	-71.9675
Punta del Este	Uruguay	34.9504° S	54.9500° W	-34.9504	-54.95
Montevideo	Uruguay	34.9011° S	56.1645° W	-34.9011	-56.1645
Melbourne	Australia	37.8136° S	144.9631° E	-37.8136	144.9631
Sídney	Australia	33.8688° S	151.2093° E	-33.8688	151.2093

Anexo3: Sigla ICAO y aeronalinea

Sigla	Aerolínea
AAL	American Airlines
ACA	Air Canada
AFR	Air France
AMX	Aeroméxico
ARG	Aerolíneas Argentinas
AUT	Austral
AVA	Avianca
AZA	Alitalia
AZN	Andes Líneas Aéreas
AZP	Aerolíneas Amazonas Paraguay
BAW	British Airways
CDA	China Southern Airlines
CMP	Copa Airlines

DAE	Dutch Antilles Express
DAL	Delta Air Lines
DAP	Aerovías DAP
DSM	Dynamic Airways
DWI	Darwin Airline
EAU	Eurowings
ETR	Eastern Airlines
GLO	Gol Transportes Aéreos
GTI	Atlas Air
IBE	Iberia
JAP	JAPSA
JAT	Jat Airways
JES	JetSmart
KLM	KLM Royal Dutch Airlines

LAN	LATAM Airlines
LAP	LATAM Paraguay
LNE	LAN Ecuador
LPE	LATAM Perú
LRC	Línea Regional Colombiana
LSE	LATAM Cargo
LTG	LATAM Cargo Brasil
LXP	LATAM Cargo Chile
MPH	Martinair
QFA	Qantas
SKU	Sky Airline
SKX	Sky Airline Perú
SRF	Surinam Airways
TAM	LATAM Airlines Brasil

	(antigua TAM)
UAE	Emirates
UAL	United Airlines
13V	Particular
15A	Particular
16Z	Particular
17B	Particular
17F	Particular
17V	Particular
17W	Particular
17Y	Particular
18G	Particular
19B	Particular
20E	Particular
22I	Particular
24J	Particular
27H	Particular
27I	Particular
30O	Particular
36K	Particular
3U	Sichuan Airlines
43G	Particular

46F	Particular
47R	Particular
48D	Particular
51A	Particular
51H	Particular
52J	Particular
53O	Particular
60F	Particular
60N	Particular
62B	Particular
66Q	Particular
68Z	Particular
69N	Particular
69V	Particular
6I	Particular
6R	Particular
72F	Particular
93X	Particular

Anexo 4: Proyección de CO LTO NACIONAL

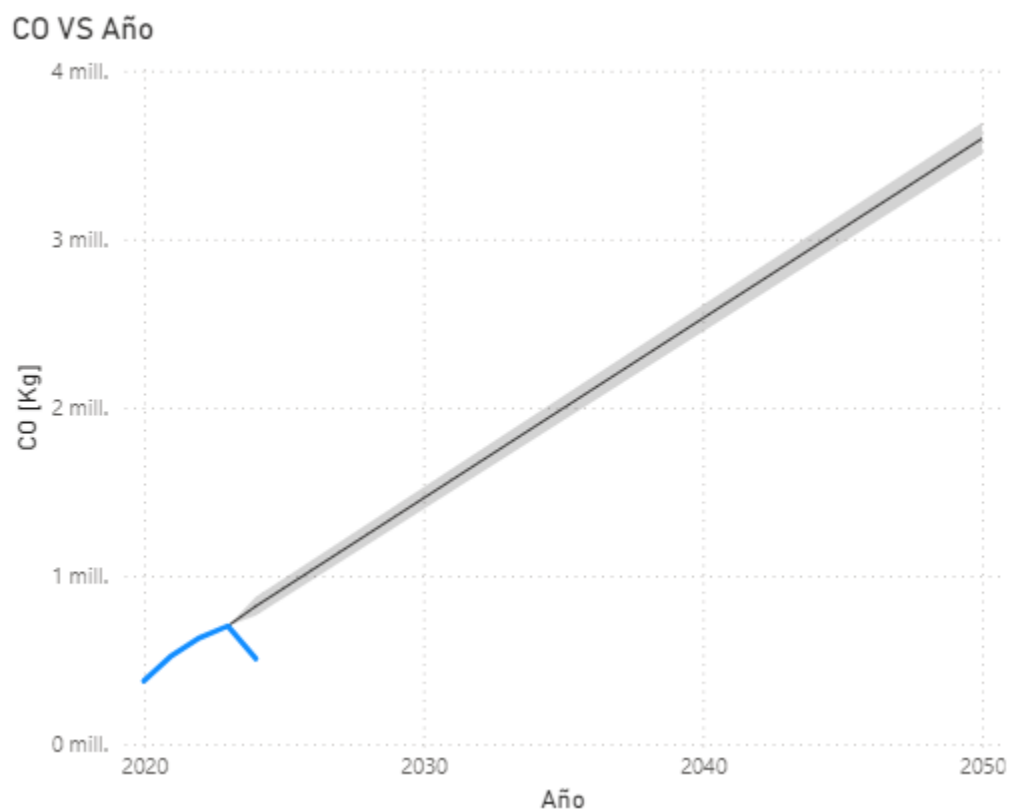


Figura 51. Proyección de emisiones de CO para vuelos nacionales en maniobra LTO. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.

Anexo 6: Proyección de H2O LTO NACIONAL

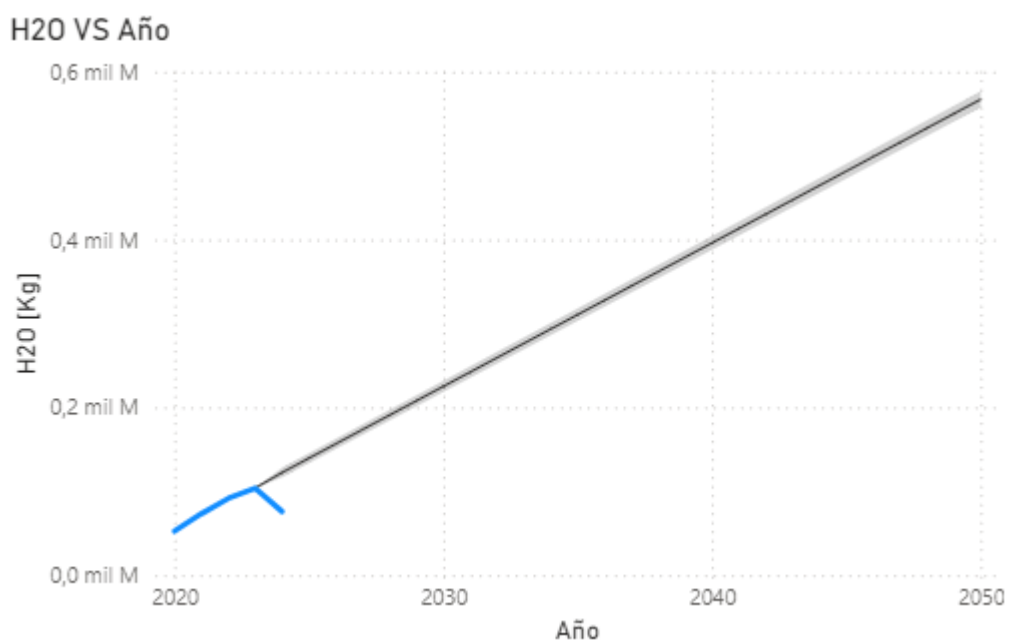


Figura 52. Proyección de emisiones de H2O para vuelos nacionales en maniobra LTO. Elaboración propia a partir de datos

proporcionados por la JAC.

Anexo 7: Proyección de HC LTO NACIONAL

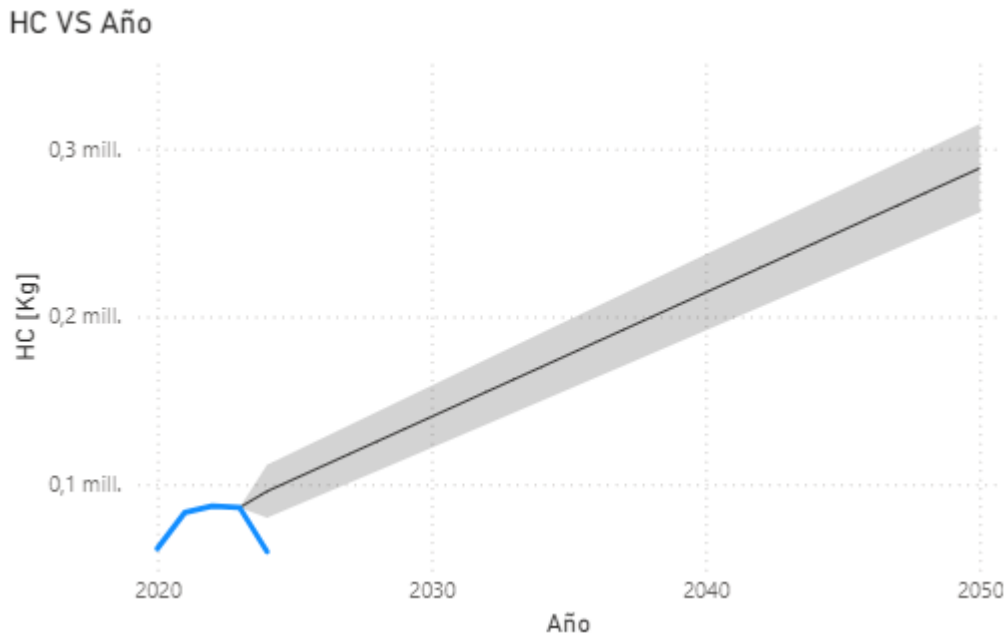


Figura 53. Proyección de emisiones de HC para vuelos nacionales en maniobra LTO. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.

Anexo 8: Proyección de PM TOTAL LTO NACIONAL

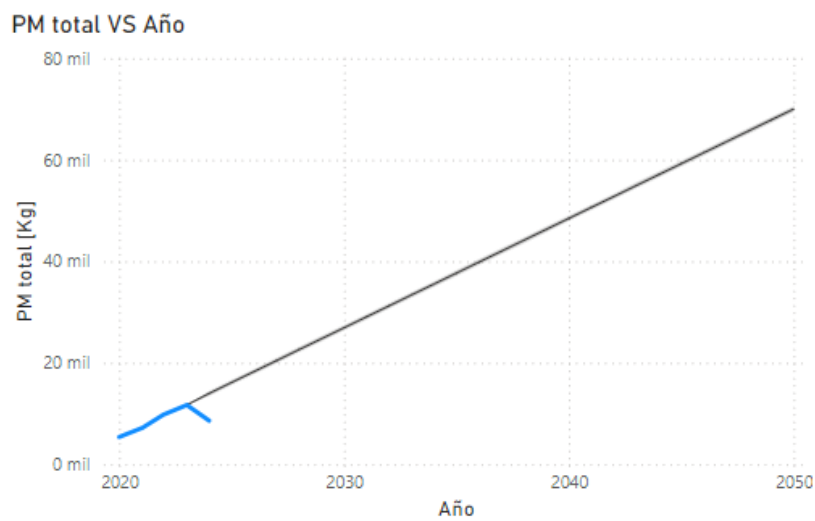


Figura 54. Proyección de emisiones de PM total para vuelos nacionales en maniobra LTO. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.

Anexo 9:Proyección de SOX LTO NACIONAL

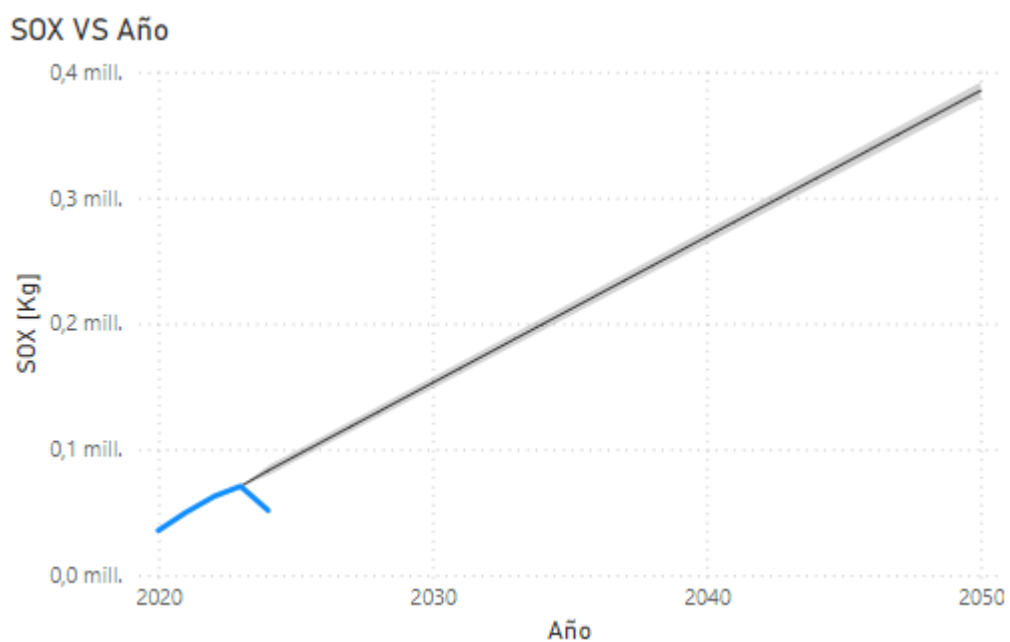


Figura 55. Proyección de emisiones de SOX para vuelos nacionales en maniobra LTO. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.

Anexo 10: Proyección de NOX LTO NACIONAL

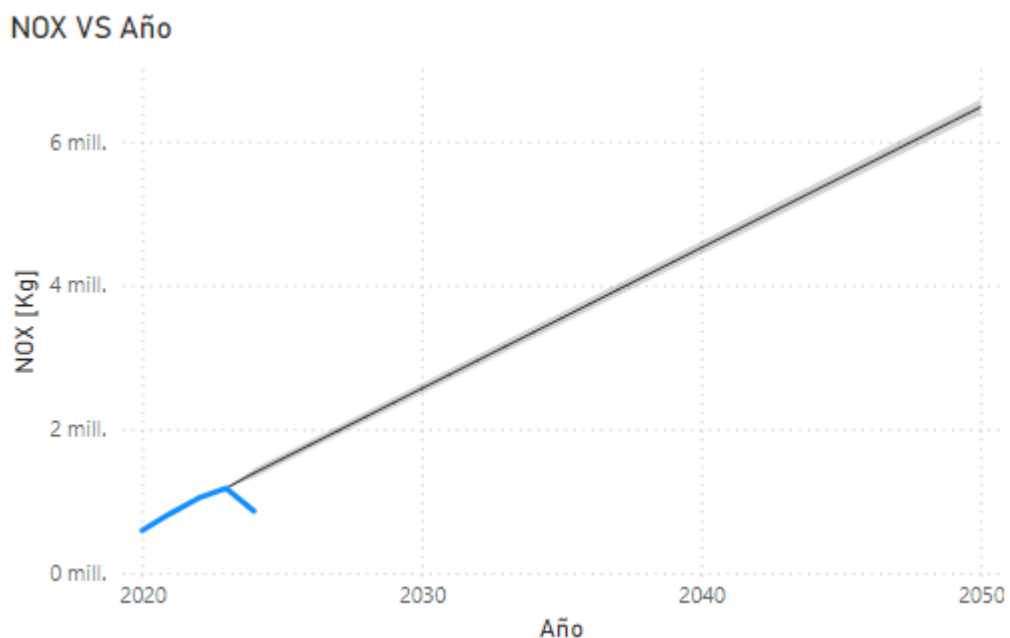


Figura 56. Proyección de emisiones de NOX para vuelos nacionales en maniobra LTO. Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la JAC.

