



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis de la tendencia de formación de turbulencias haciendo
uso de los resultados de los modelos de proyección climática del
CMIP6*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Diego Justino Ruiz Antón

DIRECTOR: Jorge Eiras Barca

CURSO ACADÉMICO: 2021-2022

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis de la tendencia de formación de turbulencias haciendo
uso de los resultados de los modelos de proyección climática del
CMIP6*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General / Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

Se espera que el incremento gradual de temperatura que ha venido acentuándose desde el inicio de la revolución industrial –y que previsiblemente continuará a lo largo del siglo XXI– refuerce las cizalladuras verticales del viento en las altitudes de crucero, tanto en términos generales como dentro de las corrientes de chorro atmosféricas. Este fortalecimiento aumentaría las inestabilidades de cizalladura (cambios bruscos en las componentes vertical y horizontal de los cambios de viento) que generan la turbulencia. Sin embargo, existen muy pocas investigaciones que estudien la respuesta de la turbulencia al cambio climático.

Las turbulencias atmosféricas son una de las principales causas de incidentes de aviación relacionados con las condiciones meteorológicas de vuelo. Las aeronaves se enfrentan a turbulencias miles de veces al año en todo el mundo, causando centenares de heridos (en ocasiones mortales), costando a las compañías aéreas millones de euros y provocando daños estructurales en los aviones. A menudo, los pilotos no pueden evitar este tipo de turbulencias porque es invisible a simple vista e indetectable para los sensores a bordo. Por esta razón, resulta fundamental analizar estos cambios para poder observar como el cambio climático afectará a la aviación tanto civil como militar y poder buscar medidas de adaptación al respecto.

En el presente estudio se utilizan simulaciones de modelos climáticos del proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados de sexta generación (CMIP6, por sus siglas en inglés) para estudiar el impacto que el cambio climático podría haber tenido en la turbulencia para un periodo histórico que va de 1950 a 2015, y el que podría tener para un periodo futuro, de 2015 a 2100, a altura de vuelo ordinario para las aeronaves de ala fija. Para ello, se hace uso de un índice frecuentemente utilizado en el estudio de la turbulencia que potencialmente puede afectar a las aeronaves, conocido como ‘índice T1’, en el nivel de presión de 250hPa, coincidente con las altitudes de crucero habituales. Este índice permite el análisis y la predicción de cualquier tipo de turbulencia -incluida la de aire seco o aire claro- que presente cizalladuras verticales en los campos de viento. Además se amplía el trabajo analizando ocho regiones geográficas de interés para las operaciones militares y los intereses nacionales.

El resultado del estudio permite predecir un aumento significativo de la turbulencia de aire claro en el espacio aéreo internacional más transitado, así como en las zonas de interés geopolítico para España a lo largo del siglo XXI. Los resultados muestran con claridad que la previsión de incremento de turbulencias es mayor al considerar los escenarios de mayor emisión de CO₂.

PALABRAS CLAVE

Aeronave, cambio climático, turbulencia, índice T1, ruta aérea.

AGRADECIMIENTOS

Con estas palabras quería finalizar este proyecto, y con él una etapa muy importante en mi vida, que aunque estaba deseando terminar sé que echaré de menos; una etapa que comencé siendo un muchacho y finalizó con unos añitos más encima, donde he conocido a gente magnífica y a gente que no tanto pero que de todos ellos he aprendido aunque sea un poquito. Después de 5 años, donde he vivido momentos buenos, que quedarán en recuerdos inolvidables; y momentos menos buenos, que sirven para aprender a esquivar la siguiente piedra; guardo esta bonita etapa en el baúl de los recuerdos y doy paso a una nueva página.

Quiero que mis primeras palabras de agradecimiento sean para mi familia, en especial a mis padres y hermanos, por el apoyo diario que muchas veces sirve de energía cuando la vida se pone cuesta arriba, por inculcarme los valores que tengo y por enseñarme a dar los primeros pasos, os ha salido un corredor. Gracias por confiar en mí.

También querría agradecer a mis compañeros de promoción por acompañarme durante estos cinco años y en especial a esos, con los que he aprendido que la vida es más divertida haciendo el tonto un poco, que a veces se gana y otras muchas se pierde, que de las malas decisiones quedan historias para enmarcar y que siempre se puede con una más. Seréis los primeros a los que llame para deciros que me caso.

A mi tutor, Jorge, por su paciencia cuando no trabajaba y su disponibilidad cuando si lo hacía, por haber conseguido despertar en mí la curiosidad por este trabajo y por descubrir que por mucho que me guste trabajar solo siempre obtendré mejor resultado con ayuda.

Por último, a mis amigos de toda la vida que aunque probablemente no lo lean nunca, gracias por que siempre he podido contar con vosotros cuando lo necesitaba.

Vive felizmente, feliz de mente, feliz y demente –Anónimo–

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Ecuaciones	5
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Contexto	7
1.1.1 La aviación.....	7
1.1.2 Efectos de la aviación en el medio ambiente.....	9
1.1.3 Efectos del cambio climático sobre la aviación.....	11
1.2 Motivación	12
1.3 Objetivos	12
1.4 Estructura de la memoria	13
2 Estado del arte	15
2.1 CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project).....	15
2.1.1 Definición e historia	15
2.1.2 Organización.....	16
2.1.3 ScenarioMIP	16
2.2 Turbulencias.....	17
2.2.1 Definición y efectos.....	17
2.2.2 Tipos de turbulencias.....	18
2.3 Turbulencia de aire claro.....	21
2.3.1 Formación y efectos.....	21
2.3.2 Índices de diagnóstico.....	22
2.4 Índice T1	25
2.5 Zonas de interés	27
3 Desarrollo del TFG.....	33
3.1 Datos para el cálculo del índice TI1.....	33
3.2 Cálculo del índice TI1.....	34
3.3 Integración espacial (tendencia).....	36
4 Resultados	37
4.1 Climatología del índice TI1	37
4.2 Porcentaje de cambio del índice TI1	42
4.3 Tendencia en las zonas de interés.	45

5 Conclusiones y líneas futuras	51
5.1 Conclusiones	51
5.1.1 Índice T1 y Scenario MIP	51
5.1.2 Programación y código	51
5.1.3 Incremento de turbulencias	52
5.1.4 Zonas de interés	53
5.1.5 Conclusión final	54
5.2 Líneas futuras	54
5.3 Propuestas finales.....	55
6 Bibliografía.....	56
Anexo I: Porcentaje de cambio del índice para el periodo de 2015-2054.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Vuelo de los hermanos Wright [3]	7
Figura 1-2: Evolución pasajeros 2012-2020 [8]	8
Figura 1-3: Modelo avión eléctrico [11]	9
Figura 1-4: Avión despegando [14].....	10
Figura 1-5: Formación estela de condensación [18].....	11
Figura 2-1 Evolución CMIP [30]	16
Figura 2-2 Principales fuentes de turbulencia [42].....	19
Figura 2-3 Turbulencia convectiva [45]	20
Figura 2-4 Nubes en forma de onda [59]	22
Figura 2-5 Turbulencias entre dos corrientes paralelas. La imagen superior es a mayor velocidad. El flujo va de izquierda a derecha [69].	24
Figura 2-6 Ejemplos de flujos con deformación. Entre ellos están: a) cols b) troughs c) y d) corriente de chorro [55]	26
Figura 2-7: Mapa del tráfico aéreo de España a nivel global [88].	28
Figura 2-8: Mapa de calor del tráfico aéreo en España [87].	29
Figura 2-9: Ala 35 del ejército español [89].....	30
Figura 2-10: T21 del ejército español [91]	30
Figura 3-1:Características de los escenarios empleados en el estudio	34
Figura4-1: Valor promedio del índice TI1 para los cuatro periodos estacionales (DEF, MAM, JJA, SON) durante el periodo de 1950-2015.	38
Figura 4-2: Valor promedio del índice TI1 durante los periodos de 2015-2054 y 2055-2100 en los tres escenarios futuros (SSP126, SSP245, SSP585) durante los meses de DEF.....	39
Figura 4-3 Valor promedio del índice TI1 durante los periodos de 2015-2054 y 2055-2100 en los tres escenarios futuros (SSP126, SSP245, SSP585) durante los meses de MAM.	40
Figura 4-4: Valor promedio del índice TI1 durante los periodos de 2015-2054 y 2055-2100 en los tres escenarios futuros (SSP126, SSP245, SSP585) durante los meses de MAM.	41
Figura 4-5: Valor promedio del índice TI1 durante los periodos de 2015-2054 y 2055-2100 en los tres escenarios futuros (SSP126, SSP245, SSP585) durante los meses de SON.	42
Figura 4-6: Variación del índice T1 en la segunda mitad de siglo utilizando el escenario SSP126.	43
Figura 4-7: Variación del índice T1 en la segunda mitad de siglo utilizando el escenario SSP245.	44
Figura 4-8: Variación del índice T1 en la segunda mitad de siglo utilizando el escenario SSP585. .	45
Figura 4-9: Mapa global con la tendencia del índice T1 de 1950-2015 con las zonas de interés representadas	46
Figura 4-10: Análisis de tendencia histórica y futura considerando los tres escenarios de proyección futura a nivel global y en cada zona de interés.....	47
Figura 4-11: Tendencia del índice T1 en las zonas de interés.....	49
Figura 0-1: Variación del índice T1 en la primera mitad de siglo utilizando el escenario SSP126..	64

Figura 0-2: Variación del índice T1 en la primera mitad de siglo utilizando el escenario SSP245..65

Figura 0-3: Variación del índice T1 en la primera mitad de siglo utilizando el escenario SSP585..65

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1	22
Ecuación 2-2	23
Ecuación 2-3	23
Ecuación 2-4	24
Ecuación 2-5	24
Ecuación 2-6	25
Ecuación 2-7	25
Ecuación 2-8	25
Ecuación 2-9	26
Ecuación 2-10	26
Ecuación 2-11	27
Ecuación 3-1	35
Ecuación 3-2	35
Ecuación 3-3	35
Ecuación 3-4	35
Ecuación 3-5	36

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto

1.1.1 La aviación

Hoy en día, la aeronave es un medio de transporte que forma parte de nuestra vida cotidiana. No obstante, su vida es relativamente corta, con poco más de 100 años; fue en 1903, en un pueblo de Ohio (Estados Unidos), cuando una pareja de hermanos (los hermanos Wright) diseñaron una máquina que consiguió realizar el primer vuelo tripulado de la historia (Figura 1-1) [1]. Este hito marcó el inicio de la aviación que, desde entonces, ha continuado su desarrollo, evolucionando y mejorando sus capacidades, hasta alcanzar la producción en serie de las aeronaves modernas [2]. Si en sus orígenes, las aeronaves eran construidas de madera y tenían una capacidad para un pasajero, hoy se emplean los materiales con la tecnología más puntera y pueden transportar a más de quinientos pasajeros.

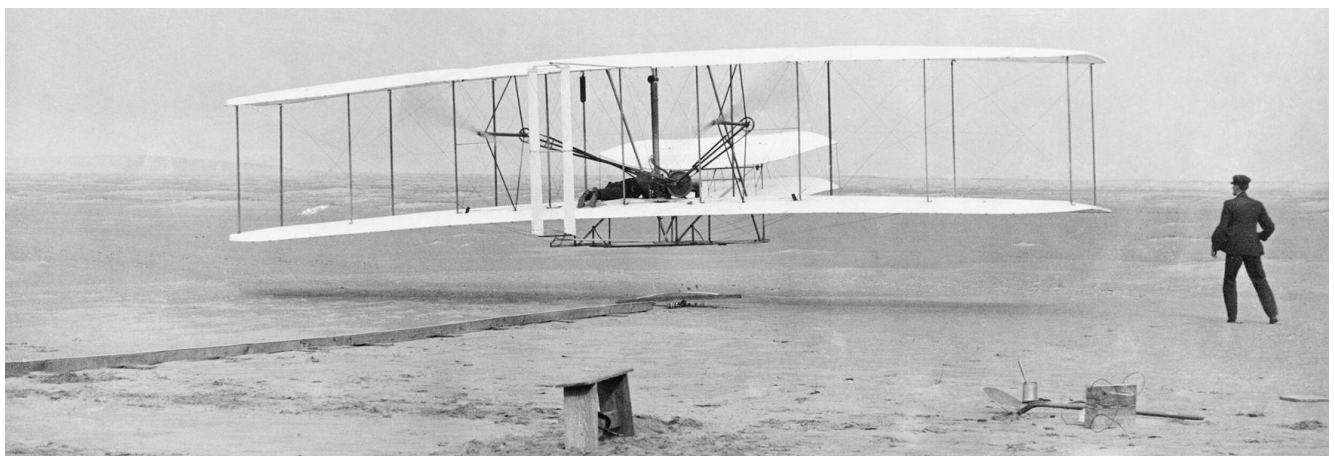


Figura 1-1: Vuelo de los hermanos Wright [3]

Con el nacimiento del motor a reacción, el transporte aéreo se revolucionó por completo. Los avances tecnológicos aplicados a la aviación posibilitaron alcanzar velocidades más altas, altitudes mayores y, sobre todo, mayor seguridad. Es por eso que en las últimas décadas, la aviación ha experimentado una rápida expansión; así, desde 1960 y hasta finales de siglo, el tráfico de pasajeros ha

aumentado a un ritmo anual de 9% y el tráfico de carga ha crecido hasta un 12%; este incremento ha disminuido a finales del siglo llegando a reducirse alrededor de un 5% en el siglo XXI [4]. A pesar de esto, el avión es el tercer medio de transporte más utilizado por detrás del coche y del autobús, y el medio de transporte más seguro según un estudio realizado en 2019[5].

En el año 2020, la tendencia apuntaba a que el número de pasajeros anuales se triplicaría para el año 2050, pero la pandemia de Covid-19 ha desbaratado las previsiones. En 2020, el número de vuelos se desplomó hasta un 68% respecto al año anterior (Figura 1-2), habiendo meses como junio que se llegó a desplomar hasta un 97%, y no se estima que la industria vuelva a los niveles de actividad de 2019 hasta 2024 [6]. Este parón ha provocado unas pérdidas de aproximadamente 71.000 millones de euros para la industria. Sin embargo, más allá del quebranto económico, esta crisis en el sector ha tenido un impacto positivo en el medio ambiente. Este hecho viene a confirmar el gran impacto de las aeronaves sobre el calentamiento global y el cambio climático, especialmente por la emisión de gases de efecto invernadero, así como la influencia de las aeronaves en vuelo en la formación de nubosidad de nivel alto [7].

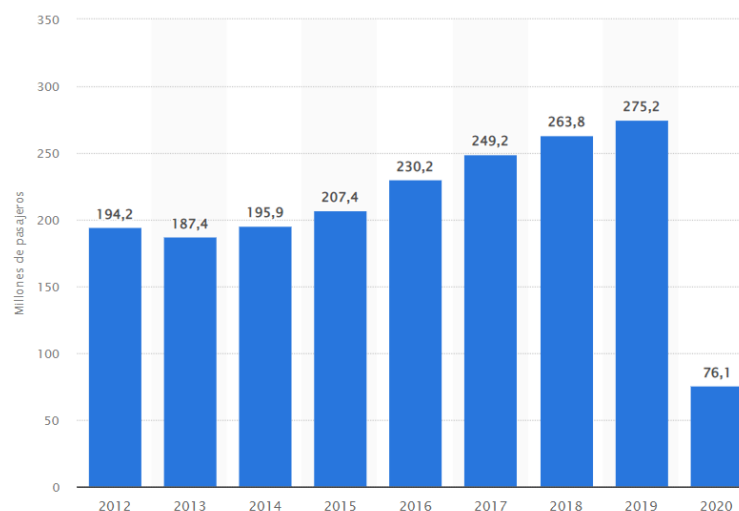


Figura 1-2: Evolución pasajeros 2012-2020 [8]

Parece razonable pensar que, en el futuro cercano, una de las tareas prioritarias de la industria deberá girar en torno a la reducción de emisiones. Habida cuenta del compromiso adquirido de conseguir cero emisiones a mediados de siglo, queda un largo camino por recorrer, aunque es incuestionable que ya se van notando los progresos; así, gracias a los avances tecnológicos, los aviones a reacción son un 80% más eficientes que los primeros aviones de la década de 1960 [9]. También debe destacarse que desde 2019 se está trabajando en el desarrollo de un avión 100% eléctrico que previsiblemente podrá volar con emisión cero, y que se espera esté certificado dentro de 3 años [10].



Figura 1-3: Modelo avión eléctrico [11]

1.1.2 Efectos de la aviación en el medio ambiente

En la actualidad, la preocupación medioambiental es un denominador común en el sector del transporte. Y es en el transporte aéreo, un sector con unas enormes previsiones de crecimiento, donde el impacto ambiental se está convirtiendo en el principal factor limitador.

Además, a diferencia de otros modos de transporte, el impacto ambiental relacionado con el transporte aéreo tiene características específicas, que son las siguientes:

- Extenso alcance geográfico tanto en las capas altas de la atmósfera como en la superficie terrestre.
- Efectos negativos concentrados en los aeropuertos.
- En ocasiones, la legislación aeronáutica puede superponerse a otras regulaciones ambientales de carácter general.
- Su impacto es pequeño en relación con otras actividades humanas pero recibe gran atención por parte de la opinión pública [12].

Una vez señaladas las características, conviene distinguir ahora los dos tipos de efectos que el transporte aéreo provoca en el entorno:

- Efecto local: son los producidos en las zonas alrededor de los aeropuertos, como la contaminación acústica ocasionada por el ruido de los motores de los aviones; la contaminación por residuos y vertidos que afectan al paisaje; y la contaminación por emisión de gases, debido a las actividades que se realizan en el aeropuerto.
- Efecto global: son los que se producen durante el vuelo. En primer lugar está el consumo de materias primas no renovables, ya que la aviación consume alrededor del 12% del combustible fósil utilizado en el transporte, principalmente el queroseno. En segundo lugar se encuentra el uso del espacio, tanto espacio físico aéreo para los vuelos como espacio del espectro radioeléctrico para el uso de comunicaciones. Por último y más relevante, la contribución al calentamiento terrestre por emisión de gases de efecto invernadero. Se estima que la aviación comercial ya representa el 5% aproximadamente del forzamiento global del clima [13].



Figura 1-4: Avión despegando [14]

De los efectos antes mencionados, el impacto fundamental de la aviación en el medio ambiente se produce al quemar combustible. De acuerdo con el Protocolo de Kioto de 1997, el único gas producido por la aviación que contribuye al efecto invernadero es el dióxido de carbono (CO_2), producto de la combustión del queroseno [15]. En 2019, la aviación fue la causante de la emisión de 915 millones de toneladas de carbono, lo que supone únicamente el 2% del total de emisiones globales provenientes de la actividad humana (emisiones antropogénicas) [16]; sin embargo, las aeronaves emiten estos gases y partículas en la troposfera superior así como en la tropopausa y en la estratósfera inferior, donde producen alteraciones notables en la composición de la atmósfera.

Las principales emisiones de las aeronaves incluyen NO_x , vapor de agua, sulfuros y partículas de carbón, las cuales pueden aumentar un 50% el efecto del calentamiento del CO_2 y elevar hasta un 3-3,5% la influencia de la aviación en el calentamiento de la atmósfera. Además, estos gases alteran la concentración de gases atmosféricos como el dióxido de carbono (CO_2), el ozono (O_3) y el metano (CH_4). Alguno de los aerosoles emitidos también actúan como núcleos de condensación, desencadenando la formación de estelas de condensación y favoreciendo la formación de nubes altas de tipo cirrus, que tienen un impacto complejo en el calentamiento global [17].



Figura 1-5: Formación estela de condensación [18]

1.1.3 Efectos del cambio climático sobre la aviación

Existen numerosos estudios e investigaciones sobre el impacto que tiene la aviación en el medio ambiente y sus efectos. En cambio, la necesidad de que la aviación se adapte a las consecuencias del cambio climático no ha sido tan investigada ni se ha tenido prácticamente en cuenta [19].

Como una primera aproximación temporal, los efectos del cambio climático que tendrán impacto en la industria aeronáutica se podrían observar, en el corto plazo, asociados a fenómenos meteorológicos extremos, como tormentas, inundaciones o temperaturas extremas. A más largo plazo, las consecuencias serían más graduales, persistentes y graves, como pueden ser el cambio de la temperatura o el aumento del nivel del mar [20]. Todos estos efectos afectarían al rendimiento operacional, la planificación de vuelos, la optimización de la trayectoria y, sobre todo, a la seguridad; pudiendo además causar impactos directos en las infraestructuras, tanto en los aeropuertos como en la propia estructura del avión.

Más concretamente, la comunidad científica muestra un alto grado de acuerdo en determinar que los principales causas del cambio climático sobre la aviación serían las siguientes:

- **Subida del nivel del mar:** provocará la necesidad de reforzar o reubicar las infraestructuras aeroportuarias costeras, lo que supondrá un reto especial para los pequeños estados insulares que están más expuestos a la subida del mar. Se estima que, en el próximo siglo, podrían inundarse un total de 360 aeropuertos en el mundo [21]. Además del aumento del nivel del mar, las tormentas vinculadas a ciclones extratropicales también se verán afectadas y sus efectos se agravarán. Ejemplo de esto fue la tormenta tropical Nargis en Myanmar en 2008 que provocó inundaciones extremas dejando inhabilitado un aeropuerto [21].
- **Cambios en la temperatura:** las temperaturas máximas más elevadas a nivel del suelo provocan una disminución significativa de la densidad del aire, lo que reduce la fuerza de sustentación de las alas pudiendo llegar a romperse en el despegue; este efecto sería más pronunciado en zonas de altitudes elevadas, como por ejemplo aeropuertos en Oriente Medio y Sur de América [22]. Además, el aumento de la temperatura provocará la descongelación del permafrost o daños en la superficie de los aeródromos, que supondrá costes de refuerzo o reconstrucción de pistas. Por ejemplo, muchas pistas de aterrizaje de Alaska están construidas sobre permafrost (suelos perennemente congelados), por lo que si se descongela

provocaría que el suelo se asentase, pudiendo dañar los cimientos y la estructura de las infraestructuras [23].

- **Cambio en el régimen de precipitaciones y tormentas:** el aumento de los eventos de precipitación extrema puede provocar tanto inundaciones como sequías y daños en las pistas y en las infraestructuras. Estas inundaciones pueden afectar a las operaciones, reduciendo la capacidad y aumentando retrasos y cancelaciones de vuelos. El aumento de la intensidad de tormentas también supondrá daños en las infraestructuras o incluso cierre de aeropuertos, como ocurrió en la costa del Golfo durante el huracán Katrina y en todo el noreste americano durante el huracán Sandy [23].
- Además de estas consecuencias existen muchas otras como el cambio en el viento, descongelación en muchas zonas del planeta o la desertificación [24].

La investigación científica sobre el cambio climático en la aviación se enfrenta al inevitable problema de que muchos fenómenos meteorológicos de gran impacto están vinculados a escalas espaciales y temporales muy inferiores a las que resuelven los modelos informáticos actuales. Estos estudios comenzaron tras el Cuarto [25] y Quinto [26] informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Estos estudios se centran en los fenómenos a pequeña escala y a microescala -utilizando avanzados métodos de modelos conceptuales para alcanzar resultados fiables- tales como la oscilación de Madden-Julian o ‘El Niño’ cuyas alteraciones también presentarán un previsible impacto en la aviación [27].

1.2 Motivación

Como se ha discutido, el impacto del cambio climático sobre la aviación es un tema de especial relevancia por todas las consecuencias que acarrea. A pesar de ello, existen pocas investigaciones al respecto.

Por lo tanto, queda justificada la realización de este trabajo para la ampliación de información y para el análisis de las turbulencias en zonas de actual interés nacional así como servir de libro de consulta para futuras investigaciones.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es analizar el incremento de turbulencias tanto a nivel global como particular en zonas de interés –militar, económico y geopolítico– para España, apoyándonos en lo ya producido por el conocimiento en dicho campo, intentar explicar con claridad los resultados obtenidos, y finalmente tratar de ampliar dichos conocimientos con nuevas aportaciones.

Este objetivo se puede desglosar, a su vez, en los siguientes objetivos secundarios implícitos:

- Evaluación inicial de los diferentes índices de caracterización de turbulencias.
- Con la elección del índice adecuado, obtención de la información necesaria para su cálculo de los modelos climáticos del CMIP6.
- Análisis del índice en dos periodos de tiempo, uno pasado y otro futuro, considerando tres escenarios de proyección futura.

- Exploración para conocer las zonas de especial interés -militar, geopolítico y económico- para España.
- Creación de mapas y gráficas para realizar un estudio de la tendencia y porcentaje de cambio del índice a nivel global y en las regiones de interés.
- Interpretación objetiva y análisis de los resultados obtenidos.

De manera adicional y complementaria a los objetivos anteriormente expuestos, se han alcanzado una serie de objetivos a raíz del desarrollo del proyecto:

- Generación de una bitácora explicativa del presente proyecto y que pueda servir de referencia a futuros proyectos dentro del mismo ámbito.
- Ampliación de conocimientos de programación con el uso del lenguaje Python.

1.4 Estructura de la memoria

Con el propósito de presentar el trabajo lo más claramente posible, y con el fin de que el estudio sea entendido por el lector, la estructura de la memoria busca la claridad, la sencillez y la exactitud. La presente memoria busca definir los términos utilizados sin ambigüedad, así como mantener una estructura de oración simple y directa. De la misma manera, se busca representar los resultados con precisión y sin información no relevante. Para conseguir estos aspectos, la estructura de la memoria está dividida en los siguientes apartados:

Una primera parte que es el cuerpo del trabajo de investigación donde se incluye la introducción, aquí se sitúa a nivel teórico y conceptual el tema del trabajo, los antecedentes y una breve presentación del problema. Además, en esta parte aparece también la motivación por lo que se hace el estudio, los objetivos que se desean alcanzar y una breve explicación de la estructura del propio trabajo.

El siguiente apartado es el estado del arte, donde se explica de una manera detallada el CMIP6 y su organización, los tipos de turbulencias que existen, cómo se forman y los efectos que tienen, y por último, se explican más en detalle las turbulencias de aire claro que serán el factor más importante para el estudio de las mismas. Además, se dan a conocer las zonas de especial relevancia para España y el motivo por el que hay que realizar un análisis más exhaustivo en estas regiones.

Posteriormente, aparece el desarrollo del estudio donde se explica el índice T1, que es el que se utiliza para el cálculo de las turbulencias, los datos que se necesitan para poder calcularlo, y la metodología. Además, en esta parte se incluye la explicación del test estadístico que se ha utilizado para el cálculo de la tendencia del índice.

La siguiente parte es el análisis de resultados, donde se analiza el valor medio del índice, el porcentaje de cambio que tendrá en los tres escenarios posibles y, por último, se analiza la tendencia del índice que ha tenido en el periodo histórico y la tendencia que seguirá en el futuro, considerando los tres escenarios y centrando el análisis en las zonas de interés para España.

Por último, las conclusiones y líneas futuras, donde se pretende condensar y recopilar las ideas fuerza del trabajo. Asimismo, establece también las posibles vías de desarrollo futuro que puedan continuar con la línea de este trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project)

2.1.1 Definición e historia

El CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) fue un proyecto creado en 1995 por el Grupo de Trabajo de Modelización Acoplada (WGCM) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC). El objetivo principal del CMIP es avanzar en la comprensión científica del sistema terrestre, permitiendo comprender en mejor manera el cambio en el clima y su variabilidad tanto en el pasado, como en el presente y en el futuro en un marco multimodelo. Para ello, el CMIP coordina experimentos con modelos climáticos donde participan equipos internacionales de modelización de todo el mundo que se dividen en tres grupos: modelizadores, que realizan las simulaciones de la CMIP6, los gestores de datos, que son los responsables de las operaciones de los nodos de datos y por último, los usuarios de datos que analizan los resultados de los modelos de la CMIP6. Estas simulaciones de modelos se evalúan periódicamente mediante informes de evaluación del clima del IPCC y en varias evaluaciones nacionales [28].

El CMIP comenzó su andadura hace más veinte años debido a la creciente necesidad de analizar los diferentes modelos climáticos; en su primera fase (1995), el CMIP1, participaron 18 modelos globales en la aportación de datos; con el CMIP2 (1996) se añadió un incremento del 1% en CO₂ por año durante los siguientes 80 años para obtener, además de las inter-comparaciones, datos sobre el futuro; en 2005 con el CMIP3, se incrementaron a 20 los modelos de clima, y además las simulaciones empezaron a ser coordinadas y almacenadas por PCMDI, quien mantiene toda la documentación y los resultados obtenidos; en 2010 comenzó la fase 5, creándose un esquema complejo que describía exhaustivamente los resultados obtenidos para dar un mejor entendimiento general del clima, solucionar las cuestiones más complejas surgidas en las fases anteriores y proporcionar estimaciones de cambio del clima futuro. Por último y para cumplir los nuevos objetivos, el CMIP6 (2013) ha desarrollado protocolos de experimentación de modelos climáticos bien definidos, formatos, normas y mecanismos de distribución para garantizar la disponibilidad de los resultados de los modelos a una amplia comunidad de investigadores; esta fase 6, que todavía no ha sido completada, será el modelo que se utilice (CMIP6) [29].

2.1.2 Organización

El CMIP6 se organiza en dos entes: el Panel CMIP, que se encarga de la coordinación directa y de la supervisión del proceso del CMIP, y el Panel de Infraestructura del WGCM, que establece las normas y políticas para compartir los resultados de los modelos climáticos que se hacen públicos en un formato estandarizado. Entrando en más detalle, la estructura del CMIP6 se ha ampliado con respecto a CMIP5 para poder responder a cuestiones que necesitan un mayor análisis y simulaciones más específicas y consta de 3 elementos principales:

- El DECK (Diagnóstico, Evaluación y Caracterización del Klima) y las simulaciones históricas del CMIP6. Ambos proporcionan la oportunidad de una sofisticada caracterización del conjunto CMIP6 y la continuidad entre las fases.
- Un conjunto de 23 Proyectos de Intercomparación de Modelos (MIP) avalados por el CMIP6 que se basan en el DECK y en las simulaciones históricas. Permitirán mejorar la comprensión de los procesos en muchos ámbitos y cubrirán las lagunas científicas de las fases anteriores.
- Infraestructura mejorada y documentación coordinada por el Panel de Infraestructura del WGCM. Permitirá tener pruebas estadísticas más sólidas de los resultados de los modelos y obtener mayor información sobre el papel de la variabilidad climática [30].

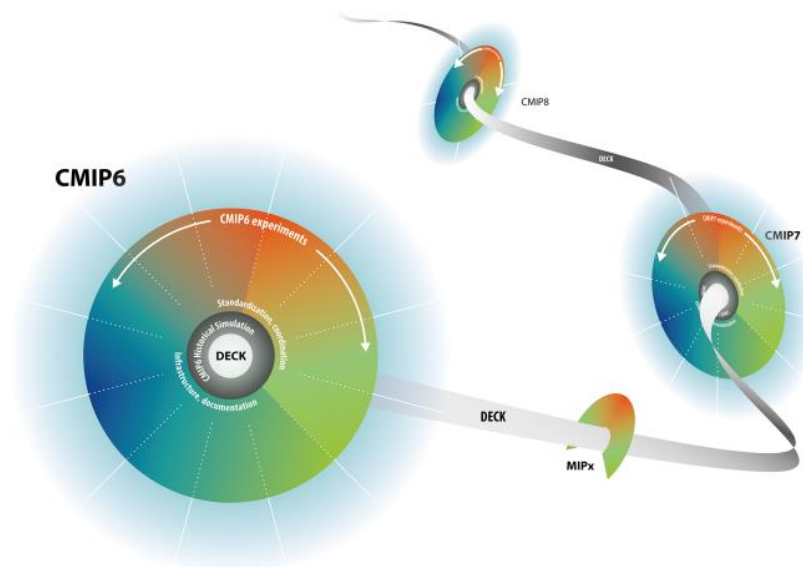


Figura 2-1 Evolución CMIP [30]

2.1.3 ScenarioMIP

De los 21 MIP que existen, el trabajo se centrará en el Proyecto de Intercomparación de Escenarios (ScenarioMIP). Su diseño es uno de los componentes de un proceso de escenarios más amplio que pretende facilitar una amplia gama de estudios integrados en la ciencia del clima, y proporciona la base para investigar una serie de cuestiones científicas y políticas específicas, que son especialmente relevantes para el análisis basado en escenarios. Para servir a esta amplia gama de comunidades científicas y abordar estas cuestiones, se ha identificado un diseño que consiste en ocho escenarios alternativos del siglo XXI, más un gran conjunto de condiciones iniciales y de extensiones a largo plazo, divididos en dos niveles definidos por la prioridad relativa.

Las funciones del ScenairoMIP son:

- Facilitar la investigación integrada sobre el impacto de escenarios futuros plausibles sobre los sistemas físicos y humanos y sobre las opciones de mitigación y adaptación.
- Abordar estudios específicos sobre los efectos de determinados forzamientos particulares en colaboración con otros MIP.
- Ayudar a cuantificar las incertidumbres de las proyecciones basándose en conjuntos multimodelos y en restricciones emergentes

Las proyecciones del cambio climático futuro desempeñan un papel fundamental para mejorar la comprensión del sistema climático, así como para conocer y explicar los riesgos que puedan aparecer en el futuro y saber cómo responder ante ellos. Es por ello que el ScenairoMIP es la actividad principal dentro de la Fase 6 del CMIP6 que proporcionará proyecciones climáticas multimodelo basadas en escenarios alternativos de emisiones futuras y cambios en el uso del suelo producidos con modelos de evaluación integrados [31].

2.2 Turbulencias

2.2.1 Definición y efectos

Los encuentros de las aeronaves comerciales, de taxi aéreo y de aviación general (GA) con las turbulencias siguen siendo una fuente de lesiones para los ocupantes y un riesgo para la infraestructura del avión. Aunque el número de víctimas mortales relacionadas con los encuentros con turbulencias de las aerolíneas comerciales ha sido muy bajo (sólo tres en los últimos 10 años), los encuentros con turbulencias suponen un porcentaje significativo (alrededor del 65%) de todos los incidentes de aeronaves comerciales relacionados con la meteorología [32]. Recientemente, las turbulencias hicieron que un avión de United Airlines se precipitara 300 metros, matando a un pasajero e hiriendo a más de 100 personas en un vuelo de Japón a Hawaii [33]. En otros incidentes, las turbulencias han arrancado los motores de los aviones, han partido las alas en dos, han lanzado carros de comida al techo y han llegado a causar lesiones graves a pasajeros y asistentes de vuelo [32]. Se calcula que, cada año, los costes sociales derivados de los incidentes relacionados con las turbulencias ascienden a más de 10 millones de dólares por lesiones humanas, daños a las aeronaves e investigaciones gubernamentales [34].

Las turbulencias forman parte de la caótica composición de la atmósfera; y es precisamente su naturaleza caótica la que les confiere un peligro permanente a la aviación lo que, en consecuencia, plantea un gran reto a la ciencia para entenderlas y predecirlas, y poder así mitigar sus efectos. La Junta Nacional de Seguridad del Transporte (NTSB) de Estados Unidos registra un promedio de 58 lesiones relacionadas con la aviación al año [35]. Sin embargo, *Sharman et al., (2006)* [32] sugieren que el número real es probablemente mucho mayor, ya que no se notifican todas las lesiones que se producen. Afirman que en el periodo 1980-2008 se produjeron 234 accidentes por turbulencia, con el resultado de 298 lesiones graves y tres víctimas mortales en compañías aéreas de Estados Unidos. 184 de las lesiones graves involucraron a los asistentes de vuelo y 114 a los pasajeros [35]. Estas lesiones por turbulencias tienen un coste para las aerolíneas de dos maneras: 1 a través de las indemnizaciones pagadas, que ascienden a más de 10 millones de dólares al año, y 2 a través de los días de trabajo perdidos por parte de los tripulantes de cabina lesionados, lo que supone más de 7000 días por año [36]. Además las turbulencias también suponen otro gasto adicional debido al gasto de combustible extra al tener que

volar por alturas y rutas no óptimas ya que se calcula que el 5% de los vuelos se ven obligados a volar por rutas diferentes a la óptima [37].

Según la mecánica de fluidos, una turbulencia se produce cuando la velocidad de las partículas de un fluido presenta fluctuaciones irregulares y aleatorias, caracterizándose por una difusión baja de momento, alta convección y cambios rápidos de presión y velocidad. Desde el punto de vista de la aeronáutica, se podría definir como el cambio aleatorio de dirección y/o velocidad del viento en distancias extremadamente cortas, dando lugar a la formación de torbellinos y remolinos debido a que unas partículas ascienden y otras descienden [38].

Las turbulencias aéreas son fenómenos habituales que afectan al comportamiento de los aviones, provocando un descenso de velocidad que normalmente va acompañada por una alteración en la dirección de vuelo, manifestándose por cabeceos y/o balances de diversa intensidad. Para contrarrestar estos efectos, los aviones disponen de elementos que le permiten volver a su posición inicial por sí solos, están contruidos con lo que se conoce ‘estabilidad positiva’; otra solución efectiva sería reducir la velocidad del avión ya que la intensidad de la sacudida será directamente proporcional a la velocidad que lleve el avión [39]. Sin embargo es importante controlar la velocidad, ya que puede ser peligroso llegar a la velocidad de entrada en pérdida (velocidad mínima de un avión para contrarrestar su peso y mantenerse en el aire) y además, hay que tener en cuenta que los efectos de las turbulencias dependen mucho de las dimensiones y el peso del avión, una avioneta ligera se verá mucho más afectada por una turbulencia que un avión comercial, que ni siquiera se vea afectado [40].

2.2.2 Tipos de turbulencias

Existen muchas clases de turbulencias que se clasifican de diferentes maneras; atendiendo a su origen, las turbulencias pueden ser:

- Turbulencia mecánica: es debida al terreno, y se produce cuando el aire choca contra las irregularidades existentes en él, sobre todo en las capas inferiores.
- Turbulencia térmica: debida a la inestabilidad térmica del aire, predomina en altitudes medias y altas.

Los efectos y daños provocados por las turbulencias dependerán, obviamente, de su intensidad; en este sentido, y con el objeto de estandarizar y explicar mejor las turbulencias, existen tres tipos de turbulencias claramente identificables atendiendo a su intensidad:

- Turbulencia leve, es necesaria una ligera actuación sobre los mandos para contrarrestar un ligero balanceo, pero se podrá estar de pie en el avión sin moverlos.
- Turbulencia moderada, en la que ya no permite estar de pie en el avión por el riesgo a sufrir una caída; es necesario actuar con fuerza sobre los mandos para estabilizar el avión que, además de separarse de la línea de vuelo, sufre movimientos verticales bruscos.
- Turbulencia severa, que es la más peligrosa de las tres y da la sensación de ‘volar’ porque separa al pasajero del asiento; el avión balancea y cabecea bruscamente, se separa con frecuencia de la línea de vuelo, y además obedece con dificultad a los mandos.

Atendiendo a la estadística, la turbulencia más común es la ligera seguida de la moderada y la más rara es la severa. Por ejemplo, en un vuelo sobre el Atlántico Norte, alrededor de un 10% del tiempo de vuelo transcurre con turbulencia aérea ligera, un 1% con moderada y tan solo un 0,01% con turbulencia aérea severa [41].

La mayoría de las turbulencias están asociadas a distintos tipos de nubosidad: los cúmulos, que indican turbulencia térmica, las nubes lenticulares, que indican onda de montaña o los cumulonimbos, que indican cizalladura. Es por ello que existe otra clasificación habitual según su naturaleza que será importante conocer para desarrollar mejores diagnósticos de turbulencia:

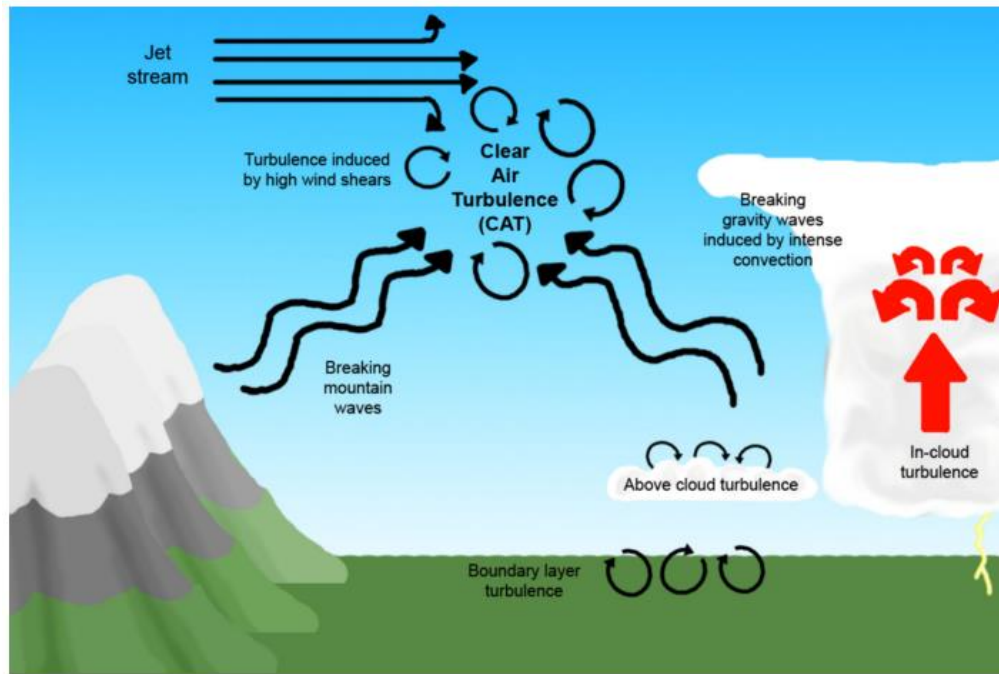


Figura 2-2 Principales fuentes de turbulencia [42]

- Turbulencia de Cizalladura (Windshear): Es debida a variaciones del viento a baja altura, como son las brisas marinas, tormentas, vientos fuertes...; de entre todas ellas, la microrráfaga (columna de aire descendente) es la condición que produce las cizalladuras más fuertes, surgiendo habitualmente con nubes bajas y visibilidad reducida, pero no suelen tardar más de 30 minutos en desaparecer. Estas turbulencias son de vital importancia ya que se producen a muy poca altura respecto al suelo, por lo que dejan muy poco tiempo y espacio para maniobrar y controlar el avión. Resultan muy peligrosas ya que se producen normalmente en las fases de despegue y aterrizaje; una solución para poder controlar la turbulencia es aumentar la velocidad por lo que es aún más peligrosa en la fase de aterrizaje al tener que aumentar velocidad antes de tocar suelo [43].
- Turbulencia convectiva: Entender la relación entre la flotabilidad y el cizallamiento es muy importante para explicar dónde y por qué se forma la turbulencia. La experiencia de este tipo de turbulencias se da cuando un avión pasa por una nube de tormenta (nubes cumuliformes), siendo de máxima intensidad debajo de un cumulonimbus. Se originan como resultado de inestabilidad hidrostática que tienen lugar cuando masas de aire pasan por una zona irregularmente caliente, produciéndose un incremento desigual de sus temperaturas, lo que origina corrientes ascendentes y descendentes caóticas que pueden provocar sacudidas en la aeronave [44].

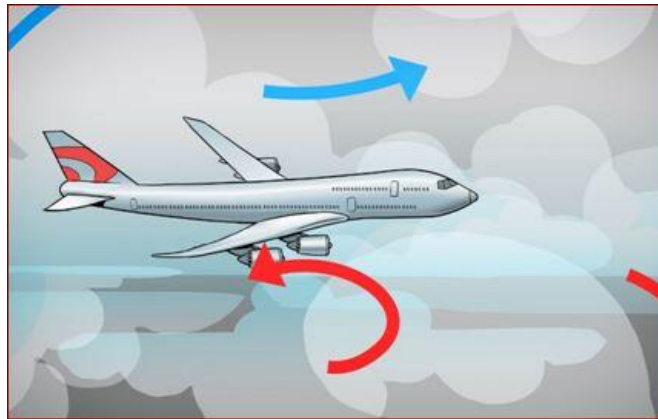


Figura 2-3 Turbulencia convectiva [45]

- **Turbulencia de ondas de montaña:** es similar a la turbulencia por convección ya que las ondas de gravedad producidas por el terreno (en lugar de la temperatura) se propagan y se rompen cuando alcanzan un valor crítico de vertical. [42] muestran que las turbulencias de montaña se producen típicamente donde las alturas topográficas son superiores a 1.5 kilómetros y concluyeron que la dirección del viento debe estar dentro de los 30° de la perpendicular a la orientación de la cordillera. Es por eso que las zonas con altas cordilleras son las más propensas a tener turbulencias de montaña [46].
- **Turbulencia de estela:** es generada por los propios aviones, con una intensidad que va a depender de ciertos factores como son el tamaño, la velocidad o la configuración del propio avión. Para explicar este fenómeno se utiliza el principio de Bernoulli (la presión de un fluido disminuye cuando su velocidad aumenta); las alas de un avión irrumpen con la estabilidad de las partículas del aire de la atmósfera cuando se desplaza en vuelo generando menor presión por encima del ala y mayor presión por debajo, lo que se conoce por sustentación. Las partículas que se encuentran por debajo, que tienen mayor presión, tienden a subir a la zona de menor presión, generando unas corrientes de aire que se desplazan en forma circular y horizontal; el efecto de estas corrientes es equivalente a un tornado acostado y su efecto dura solamente unos minutos. Para evitar estas turbulencias actualmente se hace un complejo plan de vuelo para asegurar una separación temporal entre la llegada y la salida de los aviones en los aeropuertos y rutas de vuelo [47].
- **Turbulencia en aire claro (CAT, clear-air turbulence):** Se produce en la atmósfera libre de fricción (por encima de unos 3000 pies), y no está asociada a nubes convectivas. Se forma cuando las capas de aire adyacentes van a diferentes velocidades, produciendo una fuerte cizalladura que da lugar a remolinos turbulentos que van desde centenares de kilómetros hasta centímetros [48]. Esta turbulencia también está relacionada con las variaciones de dirección y velocidad del viento en las proximidades de la corriente en chorro, que es una corriente de fuertes vientos a una altura de 8-12 km sobre la superficie, que sopla de oeste a este, con velocidades de al menos 60 nudos. Las zonas más favorables donde se producen las turbulencias de aire claro es en la zona fría del chorro [49].

2.3 Turbulencia de aire claro

2.3.1 Formación y efectos

Como ya se ha reflejado, el 65% de los incidentes de aeronaves comerciales son debido a turbulencias relacionadas con la meteorología; entre ellas, el 14% se producen en la proximidad de una tormenta convectiva, mientras que el 86% restante son debidas a turbulencias de aire claro, de estela, de onda de montaña o de cizalladura. Como las turbulencias pueden provocar daños severos, hay un considerable esfuerzo de investigación actualmente dedicado a la predicción de las turbulencias. Si bien es cierto, los datos que las aeronaves proporcionan son una buena fuente de información para la comprensión de las turbulencias, su naturaleza aleatoria complica sobremanera su comprensión y, en consecuencia, todavía no se sabe con certeza cómo actuar ante ellas [50].

Dentro del 86% se encuentran las turbulencias de aire claro (CAT). Estas turbulencias a día de hoy son las más peligrosas ya que son invisibles y no se pueden predecir con los radares convencionales, y se producen en cielos azules aparentemente en calma. Recientemente, el 20 de agosto de 2019, en un vuelo entre Isla Mauricio y Madrid, un avión de la compañía Evelop sufrió una turbulencia severa de aire claro durante 15 segundos que fue indetectable por el radar del avión y que provocó que el avión descendiera 100 metros. Aunque se cree que la seguridad de la aeronave no estuvo en riesgo, este suceso provocó que 14 pasajeros fueran trasladados a hospitales de la capital española [51].

La turbulencia de aire claro (CAT) se define como la formación de baches en las aeronaves a gran altura en regiones carentes de nubosidad significativa y alejadas de la actividad de las tormentas eléctricas [52]. La CAT es más frecuente en la región de la tropopausa (transición entre la troposfera y la estratosfera) cerca de las corrientes de chorro [53] y los frentes internos asociados a los ciclones extratropicales, y se verá reforzada por el cambio climático [54]. Aproximadamente, dos tercios de los casos de CAT se encuentran cerca de las corrientes en chorro, donde el entorno es óptimo para la producción de capas estables donde se produce cizalladura; el otro tercio se encuentra en regiones de flujos anticiclónicos fuertes y en regiones de convección profunda [55]. Científicamente, la CAT continúa siendo un problema no resuelto de la dinámica de fluidos ambientales con gran relevancia práctica y teórica tal y como discute *Ellrod et al.*, (2003) [56]

Dado que la CAT es invisible y no puede ser prevista por los pilotos ni por los radares de a bordo, la aviación trata de predecirlas en base a las previsiones de turbulencia operativa que se elaboran mediante modelos numéricos. En términos de magnitud, las turbulencias en la atmósfera van desde tamaño planetario hasta de 1 cm, aunque ciñéndonos a los remolinos turbulentos que causan la turbulencia en la aviación, la escala se reduce significativamente, yendo desde los 100 m hasta 1 km, siendo los más peligrosos los parecidos al tamaño del avión.

Las capacidades actuales de los modelos meteorológicos no les permite resolver por el momento las regiones turbulentas a esta escala [57]. Aunque los modelos meteorológicos más potentes cuentan con parametrizaciones de turbulencia, éstas se centran en resolverla cerca de la capa límite, y a escalas muy superiores a las que suponen un mayor riesgo para las aeronaves. Por lo tanto, los índices de diagnóstico de los modelos numéricos de predicción meteorológica se utilizan únicamente para identificar y pronosticar las regiones con probabilidad de contener CAT. Utilizando la suficiente precisión en los pronósticos a gran escala, el problema de la predicción de turbulencias se podrá reducir a encontrar un parámetro que relacione las variables que causan la aparición de turbulencias a la dimensión de los vehículos, ya que los diagnósticos asumen que las turbulencias de menor escala se forman como resultado del flujo a gran escala. Los índices más utilizados son la variante 1 del índice de turbulencia de *Ellrod y Knapp* (TI1), que ha demostrado predecir hasta el 75% de los CAT [55], el número de Richardson (Ri), el índice de *Colson-Panofsky* [58], el índice de *Brown* [50].

2.3.2 Índices de diagnóstico

En primer lugar, el factor que se considera responsable de la CAT es la inestabilidad Kelvin-Helmholtz (KHI). La KHI se produce cuando la cizalladura vertical del viento dentro de una capa estable supera un valor crítico [55]. La presencia de estas regiones suele estar marcada por la formación de olas ‘billow’ (nubes en forma de onda) [59] que a veces se observan en imágenes satélite [60] o de radar [61]. Esta hipótesis coincide con la evidencia de que la corriente en chorro contiene aproximadamente tres veces más turbulencia en el aire claro que el resto de la atmósfera [62]. La hipótesis también coincide con la evidencia de que los vuelos transatlánticos en dirección este, al estar más cerca de los vientos de cola en el núcleo de la corriente en chorro, encuentran más turbulencia de aire claro que los vuelos dirección oeste [63].



Figura 2-4 Nubes en forma de onda [59]

Para conocer más en detalle y determinar con mayor precisión las zonas donde será más probable la formación de turbulencias se detallan a continuación algunos de los índices de predicción más importantes:

- Número de *Richardson* (Ri , Ecuación 2-1) : se ha utilizado a menudo como una medida de las posibles condiciones turbulentas, ya que Ri está relacionado tanto con la cizalladura como con la inestabilidad. El número de Richardson es un número adimensional con el numerador representando la estratificación (frecuencia estabilizadora de Brunt-Väisälä) y el denominador representando la cizalladura vertical del viento [63].

$$Ri = \frac{N^2}{S_v^2}$$

Ecuación 2-1

siendo:

$$N^2 = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

θ = Temperatura potencial [K]

g = aceleración de la gravedad [$m s^{-2}$]

$$S_v = \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| = \left[\left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|^2 + \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right|^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$z = \text{nivel vertical}$

$v = \text{vector del viento horizontal con componentes } u \text{ y } v$

Cuando Ri se acerca a 0,25, a menudo se produce KHI (inestabilidad Kelvin-Helmholtz) [65]. Puede producirse siempre que haya una baja estabilidad estática y una alta cizalladura vertical del viento, por ejemplo, en las proximidades de chorros o zonas frontales donde se espera que la cizalladura vertical sea mayor. En estos términos, KHI sería el factor principal responsable de la CAT [55].

Sin embargo, es posible que se produzcan turbulencias cuando el número de Richardson ambiental es mucho mayor que el valor crítico teórico. Por ejemplo, las ondas de gravedad pueden causar CAT al reducir el número de Richardson (Ri) localmente en un entorno que normalmente no produciría turbulencia.

- Índice de *Colson-Panofsky* (Ecuación 2-2, [58]): usa argumentos dimensionales en atmósfera estable para estimar la intensidad de CAT.

$$CP = \lambda^2 S_v^2 \left(1 - \frac{Ri}{Ri_{crit}} \right)$$

Ecuación 2-2

siendo:

$\lambda = \text{escala de longitud [m]}$

$Ri_{crit} = \text{constante empírica } (\approx 0,5)$

- Tendencia del número de Richardson $\left(\frac{dRi}{dt} \right)$ (Ecuación 2-3): se basa en los intentos de varios investigadores de predecir la turbulencia utilizando una ecuación de tendencia temporal para el número de Richardson. Se basa en una formulación de esta ecuación en coordenadas isoentrópicas denominada Riesgo CAT específico (SCATR) [66]:

$$SCATR = \frac{1}{24} \phi S_v^2$$

Ecuación 2-3

donde:

$$\phi = \frac{2}{S_v^2} F_\theta - \Delta_H$$

$$\Delta_H = \text{divergencia horizontal} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$$

- Índice de *Brown* (1974) [67]: realizó las primeras observaciones experimentales de estructuras transicionales en un flujo turbulento. Además estudió la difusión de salto entre dos corrientes paralelas. Es una simplificación de la ecuación de tendencia de Richardson derivada [68]. Las simplificaciones implican el uso de la relación del viento térmico, el viento de gradiente como una aproximación al viento horizontal y algo de empirismo.

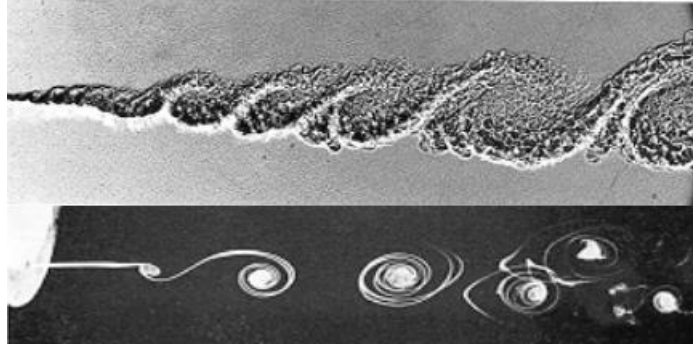


Figura 2-5 Turbulencias entre dos corrientes paralelas. La imagen superior es a mayor velocidad. El flujo va de izquierda a derecha [69].

- Función frontogénica (Ecuación 2-4) [70]: Se centra en que los frentes contienen regiones de baja Ri y, por tanto, pueden favorecer la turbulencia. Además estos frentes también pueden ser una fuente de ondas gravitacionales que suelen ser inestables y provocar turbulencias [71].

$$F = \frac{D}{Dt} |\nabla \theta|$$

Ecuación 2-4

donde:

$$\frac{D}{Dt} = \text{derivada temporal euleriana}$$

- Índice empírico de Dutton *Dutton (1980)* [71] (Ecuación 2-5): se basa en el análisis de regresión lineal de los informes de turbulencia sobre el Atlántico Norte y el noroeste de Europa durante 1976, también analizó varios índices de turbulencia a escala sinóptica:

$$E = 1.25S_H + 0.25S_V^2 + 10.5$$

Ecuación 2-5

donde:

$$S_H = \left(\frac{u}{s}\right) \frac{\partial s}{\partial y} - \left(\frac{v}{s}\right) \frac{\partial s}{\partial x}$$

Las constantes fueron determinadas empíricamente por Dutton.

- Los índices de Ellrod *Ellrod & Knapp (1992)* [55]: los índices se derivan de simplificaciones de la función frontogénica. Como tal, depende principalmente de las magnitudes de los gradientes horizontales de θ (proporcional a S_V a través de la relación del viento térmico) y de la deformación total. Las dos variantes desarrolladas fueron TI1 y TI2. El índice TI1 es el utilizado en este estudio, y se describirá en detalle en secciones posteriores.
- Existen otros índices que pueden ser utilizados para localizar regiones turbulentas: el flujo desequilibrado, que fue desarrollada por *Koch and Caracena (2002)* [73] y *McCann (2001)*

[74] y se deriva del residuo de la ecuación de equilibrio no lineal; la vorticidad potencial, también llamado gradiente horizontal [75]; el algoritmo CAT de Clark, que ha sido utilizado por los pronosticadores de la Marina de Estados Unidos durante al menos dos décadas [76]; el gradiente de temperatura horizontal, que es utilizada habitualmente por los pronosticadores aéreos [77]; índices relacionados con el viento, donde cobra especial importancia la velocidad del viento [78], entre otros.

2.4 Índice T1

Tras varios análisis, se encontró que las turbulencias de aire claro eran más habituales en zonas de convergencia, de deformación horizontal, de vientos cortantes verticales y horizontales y de fuertes gradientes térmicos horizontales, todo lo cual tiende a ocurrir cerca de las zonas frontales de nivel superior inclinadas [55]. Aunque la CAT suele producirse cerca de la corriente de chorro, la velocidad del viento por segundo no resultó ser un ingrediente especialmente importante [72]. Por ello, a principios de la década de 1980, los estudios de imágenes por satélite y los informes de pilotos de aeronaves (PIREP) revelaron que una parte importante del CAT significativa que se producía, ocurría cuando el viento de cizalladura vertical y la deformación total eran relativamente grandes, de entre 10^{-4} y 10^{-2} s^{-1} .

Los primeros esfuerzos para desarrollar un índice de turbulencia se llevaron a cabo en el sistema del Centro de Utilización de Datos del SVA, en Maryland [79]. En primer lugar, con la ayuda de un software se generó un análisis de la deformación por estiramiento (DST, Ecuación 2-6), derivada de las previsiones de la componente de viento u y v:

$$DST = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$$

Ecuación 2-6

Los campos DST se relacionan bastante bien con el CAT observado, pero producían áreas de amenaza excesivamente grandes y eran difíciles de interpretar debido a la presencia de máximos positivos y negativos. La deformación por tanto se calculó combinando la deformación por estiramiento con la deformación por cizallamiento (DSH, Ecuación 2-7) [80]:

$$DSH = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$$

Ecuación 2-7

Por tanto:

$$DEF = (DST^2 + DSH^2)^{1/2}$$

Ecuación 2-8

La deformación es una propiedad de un fluido que transforma una zona de fluido de forma circular en una forma elíptica; además, la deformación actúa para fortalecer las zonas frontales de nivel superior.

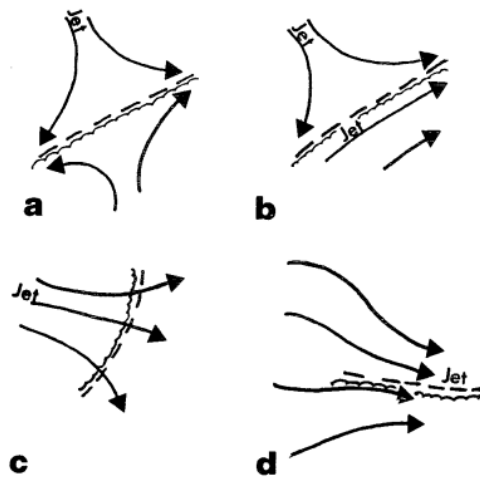


Figura 2-6 Ejemplos de flujos con deformación. Entre ellos están: a) cols b) troughs c) y d) corriente de chorro [55]

El uso de la deformación total redujo un poco las áreas de contorno y eliminó los signos negativos facilitando la interpretación. Sin embargo, como gran parte de la CAT significativa parecía ocurrir en áreas donde tanto la deformación total como el viento de cizalladura vertical tenían valores elevados, ambos parámetros se combinaron formando un producto que dio como resultado el desarrollo de dos índices, incluyendo en el segundo el término de la convergencia, es decir, la compactación de un fluido causada por confluencia de las corrientes y/o desaceleración de las parcelas de aire [54]. Al considerar el aire de la atmósfera incompresible, éste deberá ascender o descender en zonas de convergencia, lo que puede contribuir a la aparición de la frontogénesis y ondas de gravedad perturbando la inversión de la tropopausa. Las ondas de gravedad pueden ser, por tanto, un mecanismo desencadenante del desarrollo del KHI [81]. Los índices desarrollados fueron el TI1 (Ecuación 2-9) y el TI2 (Ecuación 2-10):

$$TI1 = VWS \times DEF$$

Ecuación 2-9

$$TI2 = VWS \times [DEF + CVG]$$

Ecuación 2-10

siendo:

VWS: viento de cizalladura vertical

DEF: deformación total

CVG: convergencia

La cizalladura vertical del viento es un cambio rápido en la velocidad y/o dirección del viento con la altura. Puede provocar la aparición de torbellinos turbulentos y posteriormente su propagación a medida que la energía de un máximo de velocidad de la corriente en chorro se disipa en regiones de menor velocidad del viento en niveles inferiores. La evolución del viento de cizalladura vertical a la turbulencia implica la amplificación de las ondas de cizalladura a lo largo de una capa estable que da lugar a la mezcla y a la disminución de la estabilidad dentro de la capa, pero para ello se debe sobrepasar un valor de cizalladura crítico para que el flujo laminar se descomponga en remolinos turbulentos. Una vez que se forman pueden recorrer una distancia considerable antes de disiparse finalmente. Los meteorólogos operativos estiman que se genera CAT moderado o severo a partir de $9,7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ [82]. Se

utiliza la resultante de la diferencia de capa en los componentes de viento u y v de los datos de previsión del modelo:

$$VWS = \frac{(\Delta u^2 + \Delta v^2)^{1/2}}{\Delta z}$$

Ecuación 2-11

donde:

$$\Delta z = \text{grosor (hPa) (de la capa vertical)}$$

El índice TI1 es una herramienta comúnmente utilizada para diagnosticar eventos de turbulencia a nivel global en unidades del NAS (National Airspace System), como la NOAA/AWC (National Oceanic and Atmospheric Administration's Aviation Weather Center) para observar los valores del índice en el chorro subtropical (STJ) [83], la Agencia Meteorológica de la Fuerza Aérea [84], la Oficina Meteorológica del Reino Unido [85] y el Centro Meteorológico Canadiense [86] donde se verificó que un valor elevado de TI1 se correspondía con zonas de gran turbulencia y que funcionaba mejor que otros parámetros de diagnóstico en zonas de altas presiones.

TI1 es popular por su buen rendimiento, su familiaridad con los pronósticos, su velocidad de cálculo y su fácil aplicación [87]. Este índice se basa en la deformación, la cizalladura vertical del viento y la convergencia derivada de los vientos pronosticados en el aire, relacionándolos de una manera efectiva y sencilla; además, se han verificado las dos versiones del índice y se utilizan de forma operativa en los modelos de análisis y previsión globales. Sin embargo, se ha reconocido que el índice TI1 a menudo no tiene suficientemente en cuenta las situaciones en las que hay cizalladura o curvatura anticiclónica y cuando la deformación sea frontolítica en lugar de frontogénica. Esto es debido a que en los flujos fuertemente anticiclónicos, se forman ondas gravitacionales que posteriormente se rompen y generan CAT [54]. Para solucionar esto, se ha propuesto una modificación en el índice que consiste en añadir un término sustitutivo de la tendencia a la divergencia para tener en cuenta el CAT en situaciones de divergencia rápidamente cambiante asociadas al flujo anticiclónico y en regiones ciclónicas que no están en equilibrio de gradiente.

Por tanto, el TI1 es uno de los mejores diagnósticos de previsión de turbulencia de cizalladura, y se ha comprobado que pronostica hasta el 75% de todos los casos CAT [52]. Las estadísticas de verificación de un gran número de casos muestran la excelente capacidad objetiva del TI para detectar o pronosticar zonas de turbulencia y la probabilidad de detección indica que entre dos tercios y más de tres cuartos de todos los eventos de CAT serán pronosticados correctamente por el índice. Además, los ratios de falsas alarmas serán muy bajos, únicamente 1 de cada 4 o 5 eventos será incorrecto, basándose en PIREPs relativamente densos en Estados Unidos [55].

Por tanto, para obtener conclusiones sobre el comportamiento de las turbulencias en el futuro se utilizará el índice TI1 teniendo en cuenta su buen funcionamiento.

2.5 Zonas de interés

Con el objetivo de realizar un análisis en profundidad, se ha hecho un estudio para descubrir las zonas de importancia aérea para España y analizar así las consecuencias particulares de cada una de ellas.

Para ello, se ha utilizado un mapa a nivel global para conocer las zonas con más interacción en el mundo así como un mapa a nivel local donde se muestran los puntos con mayor tráfico aéreo en España y los nodos con más conexiones del territorio peninsular.



Figura 2-7: Mapa del tráfico aéreo de España a nivel global [88].

En los mapas se puede observar que la mayoría de vuelos se realizan en Europa y analizándolo en más profundidad, el centro de Europa es la zona más transitada. Además la mayoría de vuelos se realizan en el hemisferio norte ya que gran parte se hacen a EEUU y América central, es decir, pasando por el océano Atlántico. Por último, una minoría vuela por el hemisferio sur, al sur de África y América del Sur, pero también se tendrán en cuenta en el estudio.

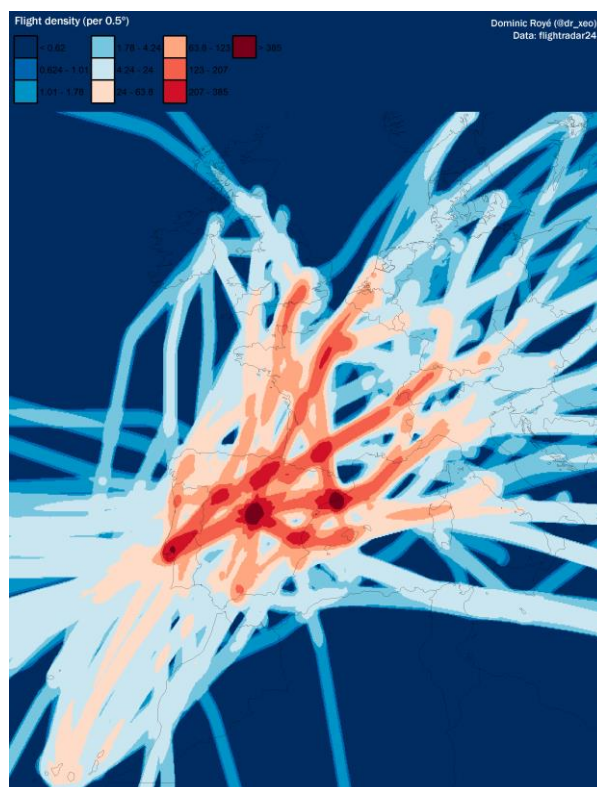


Figura 2-8: Mapa de calor del tráfico aéreo en España [87].

Teniendo en cuenta el mapa de calor así como las bases aéreas, acuartelamientos aéreos, aeródromos militares y aeropuertos dentro del territorio español, la península ibérica será también otra zona de interés que se tendrá en cuenta en el estudio.

Asimismo, el ejército tiene misiones internacionales donde despliega gran cantidad de aeronaves que hay que considerar también. Actualmente, España está en dos misiones internacionales donde presta apoyo aéreo:

- Apoyo a Centroáfrica → Tiene como objetivo el transporte logístico en forma de traslado de carga y personal a lo largo de la JOA (Joint Operation Area) que engloba buena parte de los países de Sahel (países en la zona del golfo de Guinea), parte de África Occidental y parte de África Central. Está formado por un total de 50 personas procedentes de distintas unidades [88].



Figura 2-9: Ala 35 del ejército español [89].

- Barkhane → El DAT (Destacamento Aero Táctico) Marfil, con unos 65 efectivos, contribuye de manera permanente, al aerotransporte en la zona en apoyo a las Fuerzas Armadas francesas y, a través de ellas, a las misiones de Naciones Unidas (MINUSCA y MINUSMA), de la Unión Europea (EUTM-RCA y EUTM-MALI) en la zona de operaciones para el fortalecimiento de la seguridad y la estabilidad de la región.

El origen del destacamento Marfil se remonta a 2013, y como parte de la contribución cuenta con un Ala 35 y dos aviones T-21 con base en Dakar (Senegal). En marzo de 2020, y con el objetivo de mejorar la eficacia en las operaciones de esa zona de África, los esfuerzos de los dos destacamentos, Marfil en Dakar (Senegal) y Mamba en Libreville (Gabón), se han concentrado en la base aérea de Dakar-Ouakam. Aunque en noviembre de 2021 dejó esta base y se desplazó al Aeropuerto Internacional Blaise Diagne la cual fue inaugurada el 13 de noviembre del año pasado por una comitiva del CMOPS.



Figura 2-10: T21 del ejército español [91]

- Báltico→ Existe otra misión que actualmente no tiene desplegada ninguna unidad española, la Baltic Air Policing. Esta misión comenzó en 2004 tras la incorporación a la OTAN de Estonia, Letonia y Lituania. Desde entonces 4 aviones de combate de un país de la OTAN permanecen desplegados durante periodos de 4 meses en la base de Siauliai (Lituania). Tras el estallido de la crisis de Ucrania en 2014 se aumentó el número de aeronaves desplegadas a 12 de tres países y otras dos bases de despliegue, una en Estonia y otra en Polonia. Actualmente con la guerra en Ucrania esta misión tomará especial relevancia para la defensa de la UE y el control de la zona por lo que tendrá gran importancia a la hora de analizarlo [92].

En resumen, se han tomado 8 zonas de interés además del estudio de la tendencia a nivel global para utilizarlo de referencia y analizar el resto. Estas zonas de referencia son tanto de interés militar, como la zona del Báltico, el oeste de África, Europa Occidental y Europa del Este, como de interés civil.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Datos para el cálculo del índice TI1

Los modelos climáticos globales son modelos numéricos capaces de simular la evolución temporal de la atmósfera global o del océano; además, los nuevos modelos del CMIP6 incluyen otros componentes del sistema climático como el hielo marino, la vegetación, la química atmosférica o los aerosoles con el objetivo de alcanzar una representación del sistema climático lo más completa posible. Estos modelos se leen a partir de conjuntos de datos que se guardan en archivos netCDF con multitud de variables almacenadas por archivo y están escritos según los estándares CMIP, lo que facilita el análisis e interpretación de datos de todos los modelos de la misma manera [93]. Sin embargo, debido al gran número de procesos que interactúan de forma no lineal, los modelos climáticos son propensos a muchas fuentes de error e incertidumbres. Por esta razón la selección cuidadosa del modelo es importante para la proyección fiable del clima y la reducción de las incertidumbres y errores [94].

A la hora de elegir un modelo, se han empleado 13 GCMs (ACCESS-ESM1, CNRM-CM6-1, HadGEM2-ES, EC-Earth3, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM6A-LR, MIROC-ES2L, MPI-ESM1-2-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2, NorESM2-LM, NorESM2-MM, NESM3) del CMIP6, evaluándose su capacidad para calcular el índice TI1 y los efectos de la variabilidad interna del modelo en el rendimiento. La evaluación reconoció tres modelos adecuados para la representación de la atmósfera a escala: el MRI-ESM2, el NorESM2-MM y el HadGEM2-ES. Entre ellos, el modelo MRI-ESM2 era el que más datos de proyecciones futuras nos proporcionaba para nuestro estudio, además de ser un modelo robusto a los valores atípicos y contar con un gran número de capas verticales de la atmósfera, proporcionando una gran resolución; por estas razones, el modelo MRI-ESM2 es el utilizado en nuestro estudio [95].

El nuevo Modelo del Sistema Terrestre del Instituto de Investigación Meteorológica 2.0 (MRI-ESM2) se ha desarrollado a partir de dos modelos: el MRI-CGCM3 y el MRI-ESM1, que participaron en la quinta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5). Estos modelos fueron objeto de numerosas mejoras destinadas a lograr una reproducibilidad climática muy precisa. El nuevo modelo tiene resoluciones horizontales nominales de 100 km para los componentes atmosféricos y oceánicos, similares a las de los modelos anteriores; la resolución vertical atmosférica es de 80 capas, lo que supone una mejora respecto a las 48 capas de su predecesor; la acumulación de diversas mejoras relativas a las nubes, como un nuevo esquema de nubes estratocúmulos, ha permitido reducir notablemente los errores de radiación de onda corta, onda larga y radiación neta en la parte superior de la atmósfera. El modelo MRI-ESM2.0 ha sido mejorado en muchos aspectos con respecto a los modelos

anteriores, MRI-CGCM3/MRI-ESM1, y se espera que tenga un rendimiento superior en muchos experimentos previstos para CMIP6 [96].

La CMIP6 también proporciona proyecciones para nuevos escenarios denominados vías socioeconómicas compartidas (SSP) [97]. Estos nuevos escenarios tienen en cuenta las tendencias socioeconómicas, los avances tecnológicos y otros cambios medioambientales como el uso del suelo para proyectar el clima futuro [98]. Además, estas proyecciones son relacionadas con los escenarios RCP que tienen en cuenta el volumen de gases de efecto invernadero (GEI) emitido en los próximos años.

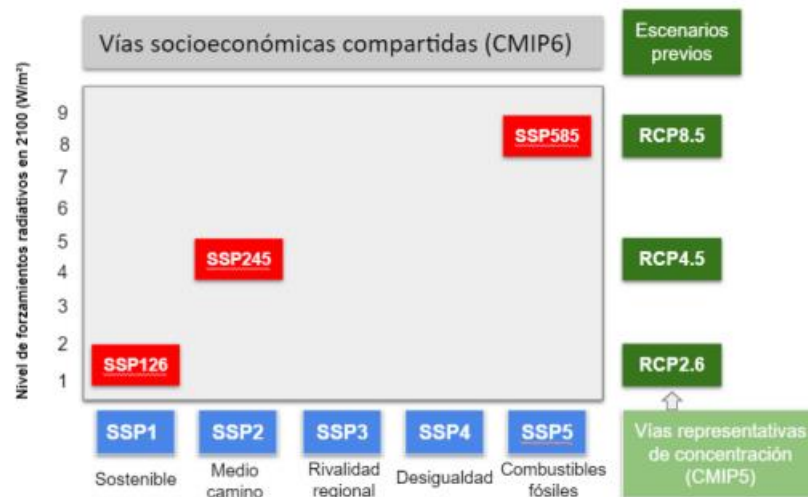


Figura 3-1: Características de los escenarios empleados en el estudio

Hay 9 escenarios de trayectorias de emisiones futuras de fuentes antropogénicas, los RCP, escenarios que abarcan una amplia gama de valores de forzamiento radiativo de fin de siglo, lo que hace que este conjunto de escenarios sea ideal para explorar una variedad de trayectorias de calentamiento. El conjunto de escenarios está limitado por un escenario de $1,9 \text{ W/m}^2$, ideal para analizar un mundo con temperaturas de fin de siglo muy por debajo de los 2°C y en el extremo superior por un escenario de $8,5 \text{ W/m}^2$, que da lugar a un aumento del calentamiento de casi 5°C con respecto a los niveles preindustriales. Entre estos dos extremos, los escenarios se proporcionan de manera que las diferencias entre los datos proporcionan resultados de temperatura estadísticamente significativos. Por otro lado, existen 5 SSP diferentes, con cuantificaciones de modelos que abarcan futuros potenciales de crecimiento verde o alimentado por combustibles fósiles (SSP1 [99] y SSP5 respectivamente [100]), alta desigualdad entre o dentro de los países (SSP3 [101] y SSP4 [102] y un escenario ‘intermedio’ (SSP2 O [103]). Para cada SSP, pueden alcanzarse distintos objetivos de RCP en función de las políticas aplicadas, ya sea a nivel local o global, a lo largo del siglo [104]. Para el estudio se utilizarán 3 escenarios diferentes: el SSP126, el SSP245 y el SSP585 ($2,6$, $4,5$ y $8,5 \text{ W/m}^2$ respectivamente).

3.2 Cálculo del índice TI1

El cálculo del índice TI1 se realizó a partir de las variables del viento zonal y meridional obtenidos, del modelo del Sistema Terrestre del Instituto de Investigación Meteorológica versión 2.0 (MRI-ESM 2.0). Además de las variables de viento zonal (u) y el viento meridional (v) también se utiliza la temperatura atmosférica (T). Estas tres variables se toman de diferentes niveles verticales: 1000, 850, 700, 500, 250, 100, 50 y 10 hPa. Los diferentes niveles de presión permiten calcular la cizalladura

vertical del viento utilizando diferencias centradas de segundo orden a 250 hPa, que corresponde a altitudes de crucero típicas.

Los datos del índice obtenidos tienen una resolución de 100 km, por lo tanto se contará con 160 puntos de latitudes y 320 puntos de longitudes. El periodo temporal considerado comprende desde 1950 a 2100, con pasos de tiempo de 24 horas (diarios).

Como se ha visto anteriormente, el cálculo del índice se calcula multiplicando la deformación total por la cizalladura vertical del viento (Ecuación 2-9)

$$TI1 = VWS \times DEF = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2\right]} \times \sqrt{\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2\right]}$$

Ecuación 3-1

Como los modelos de referencia trabajan con niveles verticales de presión, pero el índice TI1 está ideado para niveles verticales de altura, es necesario aproximar haciendo uso de la ecuación hipsométrica, asumiendo que el aire es aire seco.

$$h = k_2 - k_1 = \frac{Rd \times T}{g} \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

Ecuación 3-2

Donde,

$k = \text{nivel vertical considerado}$

$Rd = \text{constante de aire seco } (287.05 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1})$

Para la discretización del índice se ha hecho uso de un método de diferencias finitas de ‘diferencias centrales’(la discretización es lo que permite el cálculo del índice en cada punto de la malla, considerando los valores de en los puntos circundantes). De esta forma, el esquema para calcular el TI1 sobre cada punto de nuestra malla Arakawa en el nivel de presión de referencia 250hPa vendrá determinado por:

$$TI1_{(i,j,250)} = VWS_{(i,j,250)} \times DEF_{(i,j,250)}$$

Ecuación 3-3

$$VWS_{(i,j,250)}^2 = \left[\left(\frac{u_{i,j,100} - u_{i,j,500}}{\frac{Rd \times T_{250}}{g} \ln\left(\frac{P_{500}}{P_{100}}\right)} \right)^2 + \left(\frac{v_{i,j,100} - v_{i,j,500}}{\frac{Rd \times T_{250}}{g} \ln\left(\frac{P_{500}}{P_{100}}\right)} \right)^2 \right]$$

Ecuación 3-4

$$CH_{(i,j,250)}^2 = \left[\left(\frac{u_{i+1,j,250} - u_{i-1,j,250}}{d[(i+1,j), (i-1,j)]} - \frac{v_{i,j+1,250} - v_{i,j-1,250}}{d[(i,j+1), (i,j-1)]} \right)^2 + \left(\frac{v_{i+1,j,250} - v_{i-1,j,250}}{d[(i+1,j), (i-1,j)]} + \frac{u_{i,j+1,250} - u_{i,j-1,250}}{d[(i,j+1), (i,j-1)]} \right)^2 \right]$$

Ecuación 3-5

Siendo:

$i = \text{índice longitudinal}$

$j = \text{índice latitudinal}$

$$\ln\left(\frac{P_{500}}{P_{100}}\right) = \ln(5) \approx 1,6$$

Así, aplicando el esquema de diferencias finitas presentado en cada punto (i,j,250 hPa) se obtendrá un campo de índice TI1 para cada uno de los pasos de tiempo de 24 horas contemplados en todo el periodo.

3.3 Integración espacial (tendencia)

Los test utilizados en climatología son por lo general test no paramétricos; estos test utilizan métodos para conocer cómo se distribuye un fenómeno para, más tarde, utilizar técnicas de estadística paramétrica. Los test paramétricos, en cambio, utilizan cálculos y procedimientos asumiendo que conoce cómo se distribuye la variable aleatoria a estudiar [105].

Para determinar la existencia de tendencias en el índice T1 se ha considerado el t-test. Este tipo de test es una prueba paramétrica, lo que significa que asume que sus datos son independientes, tienen una distribución normal y tienen una cantidad similar de varianza dentro de cada grupo que se compara [105].

Como ya se ha discutido, en climatología se evita el uso de test estadísticos paramétricos; ya que a priori suele desconocerse la distribución de las mediciones realizadas; que además por lo general no es gaussiana. Sin embargo, en casos como el tratado en este estudio; dado que el número de elementos – valores de la serie temporal para cada punto de dominio – es elevado; queda bien justificado su uso por la conocida como ‘ley de los grandes números’ [107].

Esta ley de los grandes números es un teorema fundamental que establece que, dentro de una sucesión de variables aleatorias independientes y distribuidas con varianza finita, el promedio de las n primeras observaciones se acerca a la media teórica cuando el número n de repeticiones tiende hacia infinito [108], es decir, que si se repite muchas veces (tendiendo a infinito) un mismo experimento, la frecuencia de que ocurra un cierto evento tiende a ser una constante.

Es por ello que en el estudio, donde hay gran cantidad de datos, basándonos en esta teoría se ha realizado un test paramétrico suponiendo que los datos se asemejan a una distribución normal debido a que los datos tienden a estabilizarse por el gran número de datos con los que se trabaja.

4 RESULTADOS

4.1 Climatología del índice TI1

En primer lugar se procede a presentar medio del índice TI1 para un periodo histórico (1950-2015). Además, este periodo se tomará de referencia para el análisis de cambios futuros. Cabe destacar que el índice es no negativo por definición y los valores más altos indican más turbulencia. Como el índice varía de manera diferente dependiendo de la estación del año y de cada hemisferio se divide el estudio en estaciones para ver un mejor comportamiento del índice. La división de las estaciones se ha hecho por meses:

- Diciembre, enero, febrero (DEF)
- Marzo, abril, mayo (MAM)
- Junio, julio, Agosto (JJA)
- Septiembre, octubre, noviembre (SON)

En la Figura4-1 se muestran los mapas estacionales del promedio del índice utilizado:

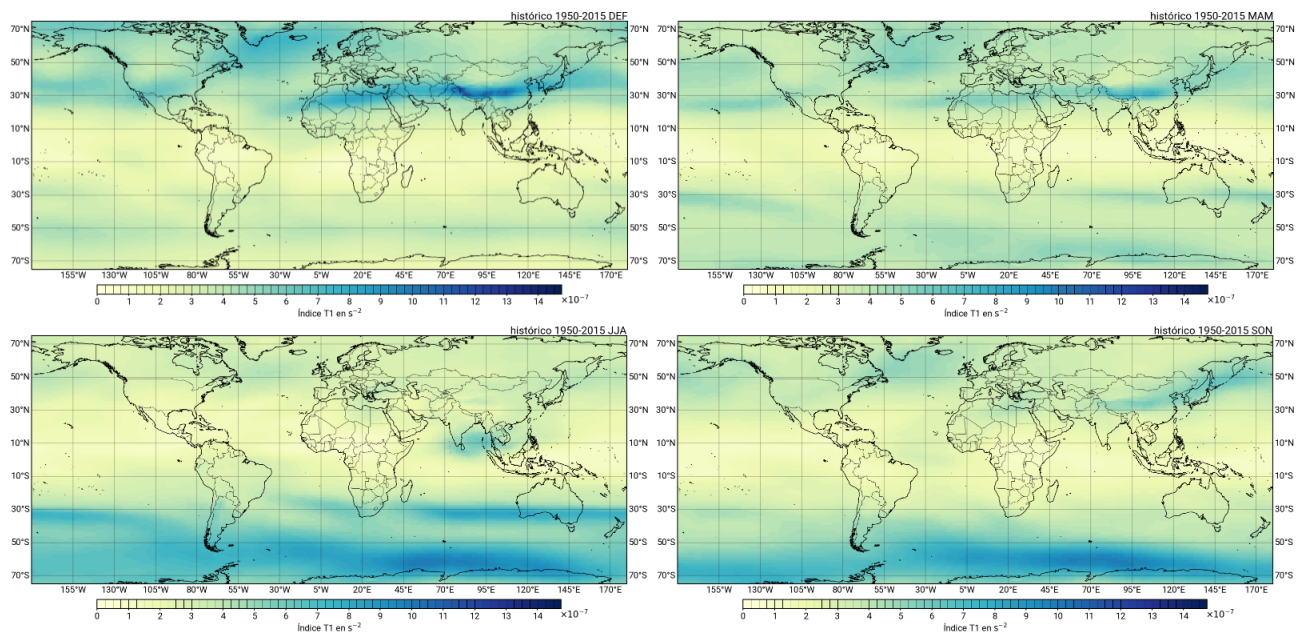


Figura4-1: Valor promedio del índice T11 para los cuatro periodos estacionales (DEF, MAM, JJA, SON) durante el periodo de 1950-2015.

Primeramente, se va a analizar el hemisferio norte durante los meses de diciembre, enero y febrero (el invierno boreal); la mayor intensidad se observa en torno a los 30° de latitud Norte por donde circula la corriente de chorro subtropical, donde es muy común que aparezcan turbulencias en sus proximidades. Este valor se intensifica en la zona de la cordillera del Himalaya y la meseta del Tíbet, con una altura media de 4900 metros y donde existen montañas que alcanzan los 8000 metros, y el índice alcanza su valor más alto. Esta zona sirve para ejemplificar el efecto que tienen las ondas de montaña con el índice utilizado y la aparición de turbulencias de aire claro. Además, también aparecen valores elevados del índice en la zona de influencia del chorro polar ubicado entre las latitudes 30°N y 60°N, sobre todo en el sur de Groenlandia y norte de Canadá. Para los meses de marzo, abril y mayo, las zonas afectadas son similares a las del invierno boreal pero se reduce el valor del índice, aunque sigue siendo elevado en la cordillera del Himalaya. Durante el verano boreal apenas se aprecian fluctuaciones a excepción del sur de la India (en el golfo de Bengala), donde se produce el conocido Monzón, que se genera por el calentamiento asimétrico de la tierra y el mar, produciendo un incremento en vientos de cizalladura [109], confirmandose así las conclusiones de *Thakur (2019)* [110]. Por último, durante los meses de otoño (septiembre, octubre y noviembre), los valores son muy parecidos a los de primavera, y en donde la zona de mayor intensidad se localiza al este del continente asiático, coincidiendo con la trayectoria sinuosa del chorro subtropical, confirmando los estudios sobre turbulencias de *Kim & Chun (2016)* [63].

En el caso del hemisferio sur, los valores del índice más elevados ocurren entre los meses de junio y noviembre, que coincide con el invierno y primavera austral; estos valores se hallan en la trayectoria de la corriente de chorro polar, que se encuentra la mayor parte del año sobre la Antártida y el océano Antártico. Además, durante el invierno austral, el índice se intensifica en la corriente de chorro subtropical del hemisferio sur, extendiéndose por el océano Índico desde Australia hasta el sur de África, apreciándose también un aumento en la cordillera de los Andes, que tiene una altura media entre los 3000 y 4000 metros (se trata de otro ejemplo de la influencia de las ondas de montaña en la aparición de turbulencias). Para los meses desde diciembre a mayo que coinciden con el verano y otoño austral, apenas se perciben variaciones del índice.

Utilizando los tres escenarios climáticos considerados (SSP126, SSP245, SSP585), se va a analizar el comportamiento del índice en el futuro hasta final de siglo. Para ver los resultados de manera más clara y así poder analizar las proyecciones de manera más precisa, se divide el periodo en dos

subperiodos: futuro cercano, que será principios de siglo (2015-2054) y futuro lejano que será finales de siglo (2055-2100). Además, se analizarán los mapas agrupándolos por estaciones para así poder distinguir como afecta el cambio de dióxido de carbono a los valores del índice.

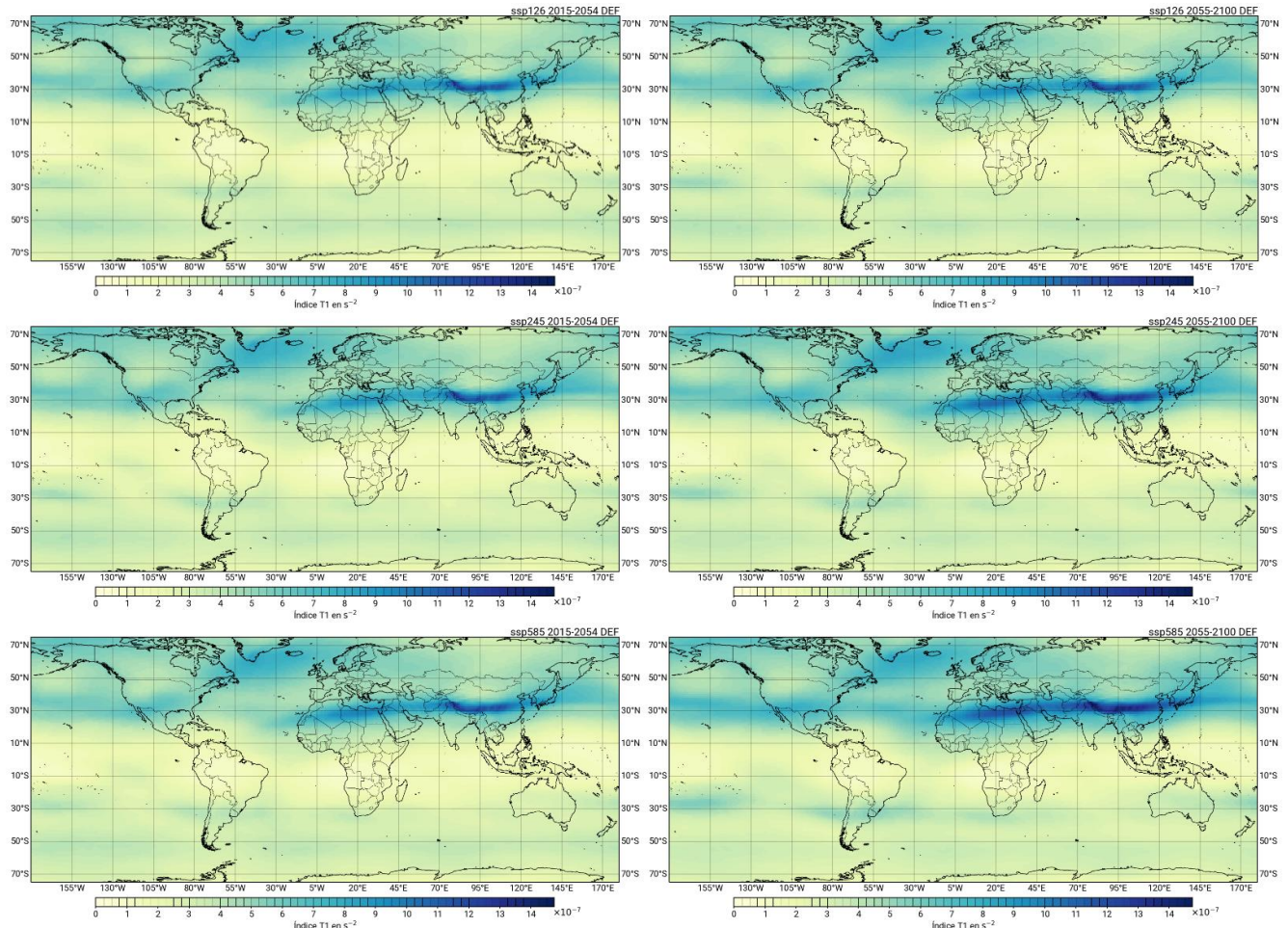


Figura 4-2: Valor promedio del índice T1 durante los periodos de 2015-2054 y 2055-2100 en los tres escenarios futuros (SSP126, SSP245, SSP585) durante los meses de DEF.

Para los meses de diciembre, enero y febrero, que coincide con el invierno boreal y a su vez con el verano austral, se aprecia una intensificación del índice entre los 40° y 50° N de latitud, que coincide, como se ha explicado, con la corriente en chorro subtropical del hemisferio norte. Cabe destacar que el valor de índice se intensifica en gran medida conforme van empeorando los escenarios; para el peor de los casos, el SSP585, el índice es especialmente intenso en el norte de África y centro de Asia. En cuanto a las corrientes de chorro polares, apenas se aprecian cambios significativos. Por último, en el hemisferio sur los cambios son mucho menores, llegando a tener cambios notables únicamente en el peor de los escenarios a la altura de 40° y 50° S por donde circula la corriente en chorro subtropical.

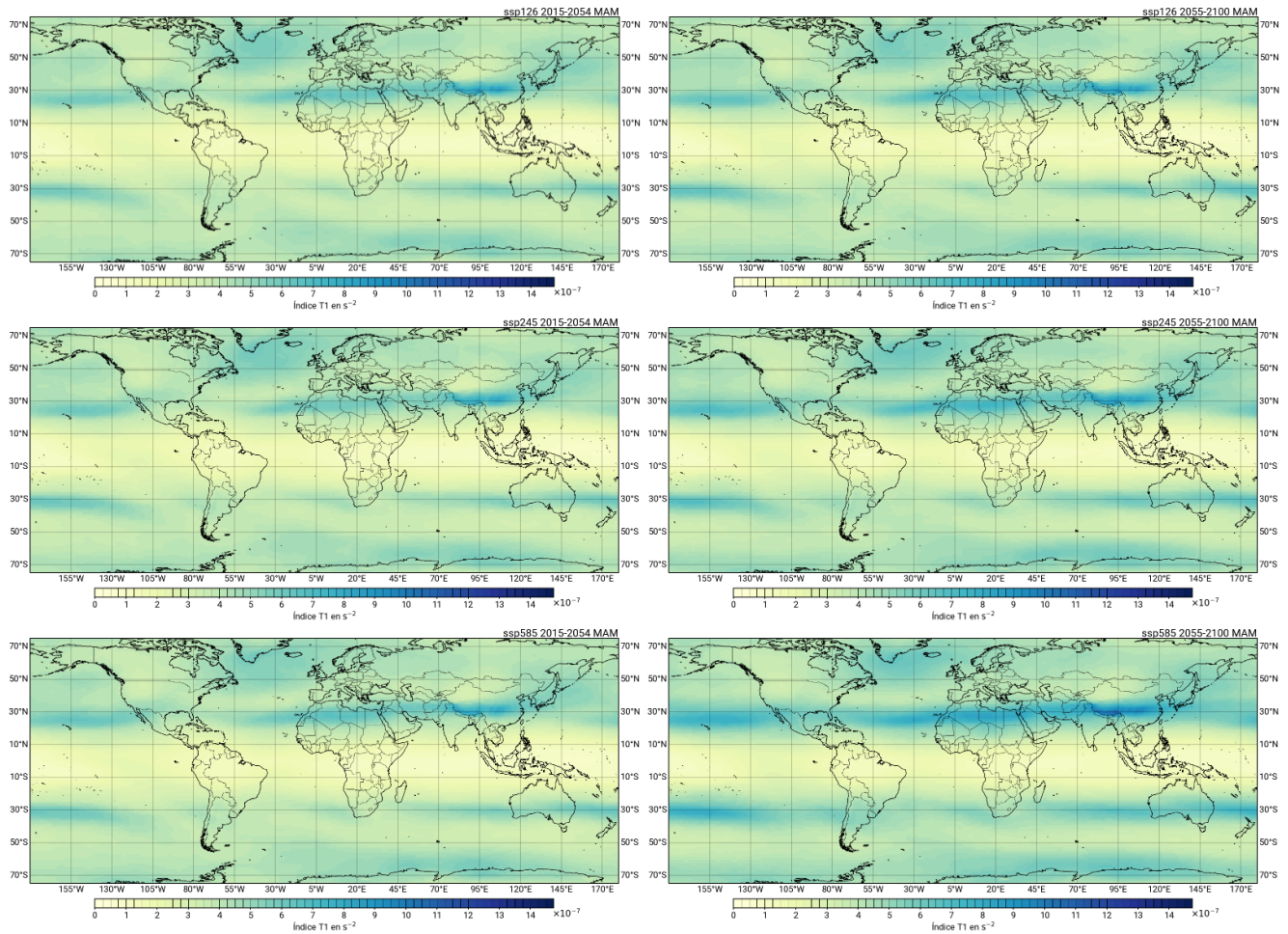


Figura 4-3 Valor promedio del índice T1 durante los periodos de 2015-2054 y 2055-2100 en los tres escenarios futuros (SSP126, SSP245, SSP585) durante los meses de MAM.

Para los meses de marzo, abril y mayo, que coincide con la primavera boreal en el hemisferio norte, los cambios en el índice en todos los escenarios son muy parecidos referidos a las zonas donde ocurren, pero se intensifica en mucho menor medida que durante el invierno boreal (diciembre, enero y febrero). Los valores más altos del índice tienen lugar en la corriente en chorro subtropical del hemisferio norte entre las latitudes de 30° y 50°, aunque estos valores son visiblemente más suaves que en la Figura 4-2. El máximo valor aparece a finales de siglo en el escenario SSP585 en la zona de la cordillera del Himalaya y alrededores. Para el hemisferio sur, los cambios entre los escenarios SSP126 y SSP245 son casi inapreciables y todos los cambios de interés son a finales de siglo, es decir de 2055 a 2100. El único incremento apreciable se produce entre las latitudes 20° y 40° S por donde circula la corriente en chorro subtropical. Se podría afirmar que en este periodo del año es cuando se produce el menor aumento en general, tanto en el hemisferio sur como en el hemisferio norte.

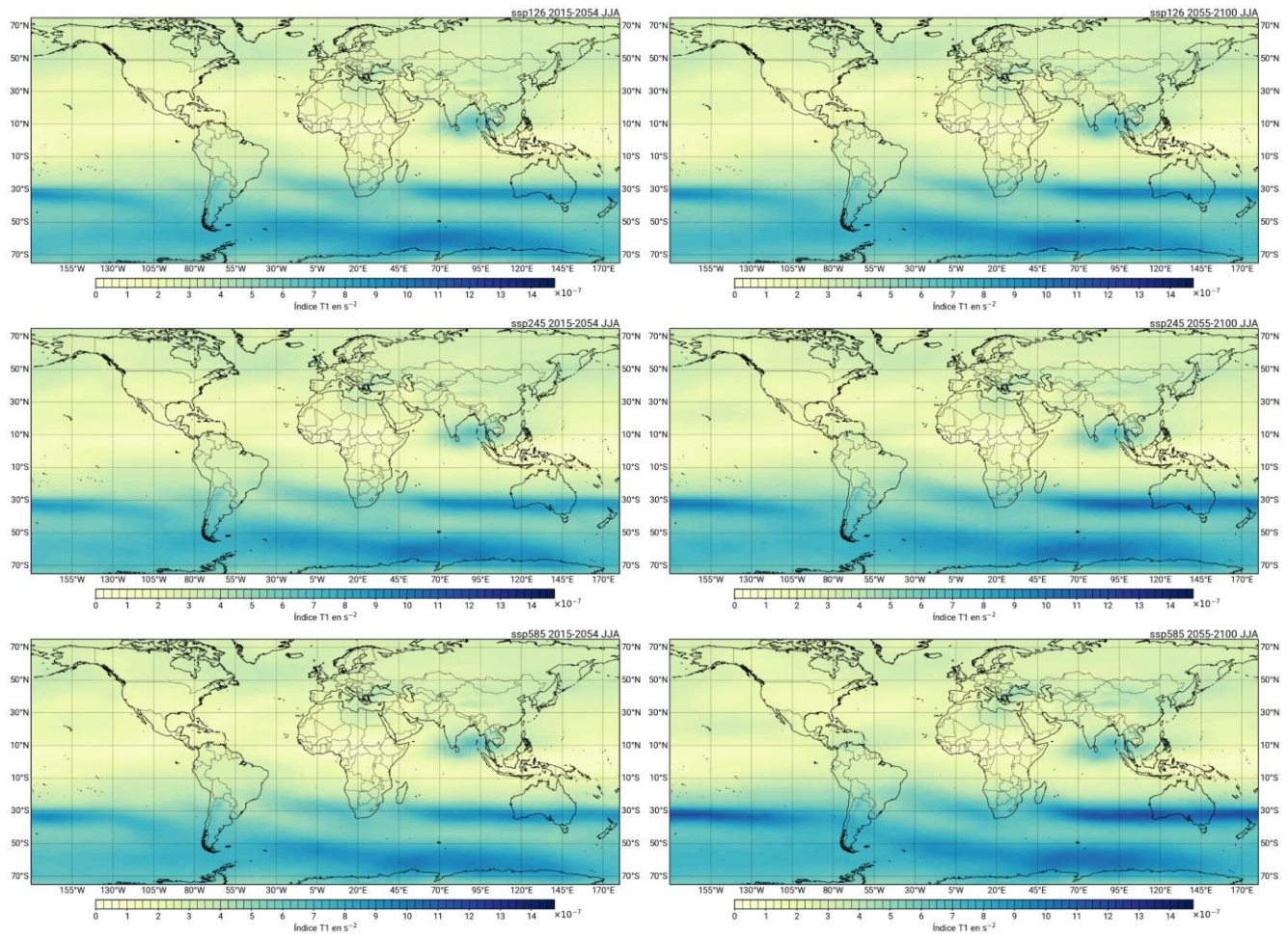


Figura 4-4: Valor promedio del índice TI1 durante los periodos de 2015-2054 y 2055-2100 en los tres escenarios futuros (SSP126, SSP245, SSP585) durante los meses de MAM.

Para los meses de junio, julio y agosto, las zonas de intensificación del índice (como se puede observar en la Figura 4-4) aparecen en el hemisferio sur, ya que coincide con el invierno austral. Este aumento generalizado del índice TI1 ocurre especialmente entre las latitudes 20°-40°S, tomando valores muy elevados a finales de siglo, tanto en el escenario SSP245 como en el SSP585, especialmente en el sur de Australia. Se puede observar también una intensificación del índice en la zona de la Antártida, muy apreciable a finales de siglo en el escenario SSP585, debido en gran parte al calentamiento global, que produce un aumento en la cizalladura vertical del viento y un aumento de la magnitud del gradiente de temperatura, además de que por esta región circula el chorro polar. Esto provocará una mayor probabilidad de turbulencias de aire claro, sobre todo en la parte más fría del chorro. En cuanto al hemisferio norte, no existen grandes diferencias entre los escenarios SSP126 y SSP245 ni tampoco se observan cambios de interés con respecto al periodo de referencia (1950-2015). Solamente se podría destacar la zona del Golfo de Bengala, donde se aprecian un pequeño incremento.

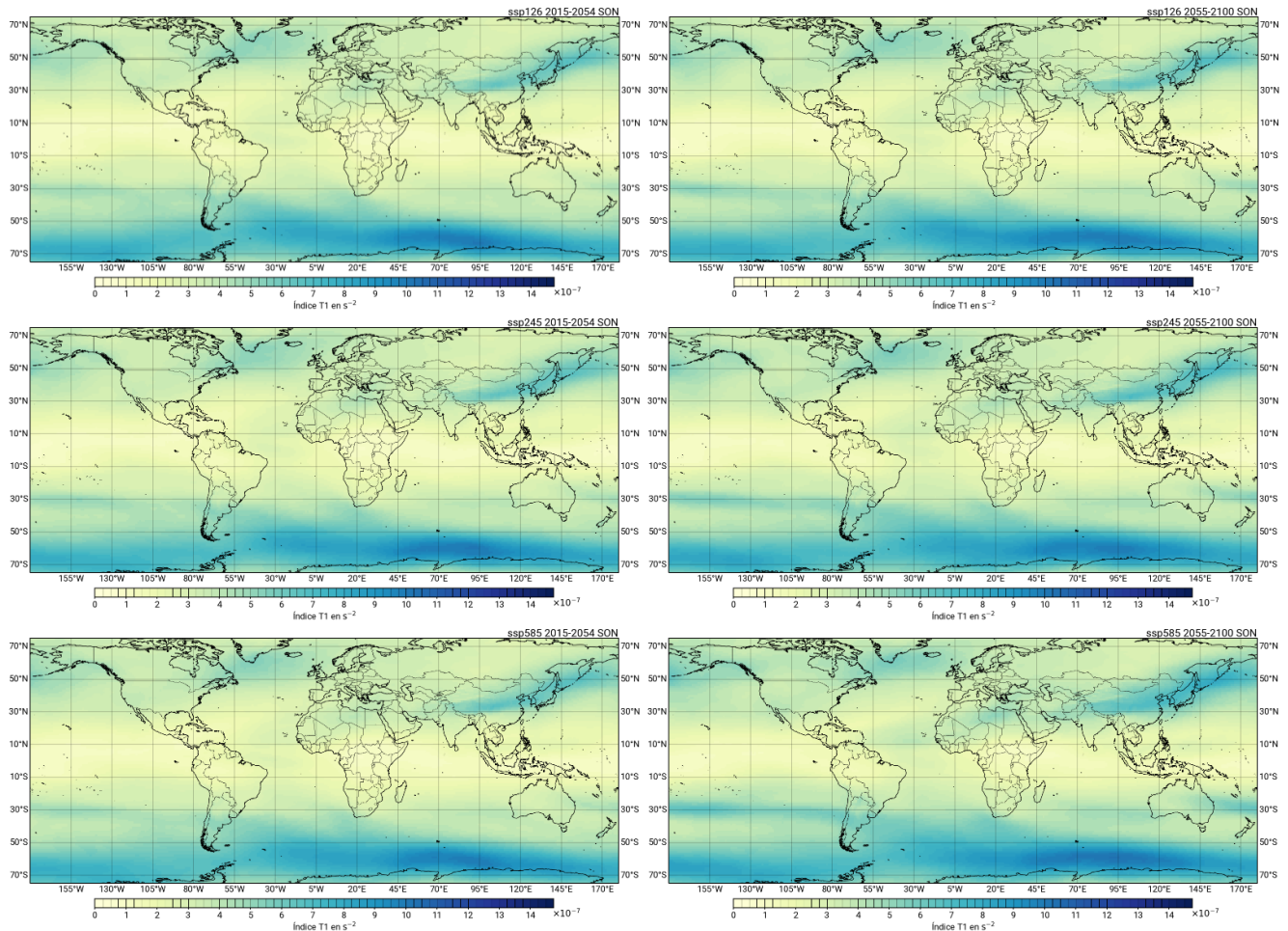


Figura 4-5: Valor promedio del índice TI1 durante los periodos de 2015-2054 y 2055-2100 en los tres escenarios futuros (SSP126, SSP245, SSP585) durante los meses de SON.

Por último, para los meses de septiembre, octubre y noviembre (el otoño boreal) ocurre como en primavera, donde los cambios son mucho menores que en los periodos de invierno. En el hemisferio norte, no existe mucha diferencia entre los dos primeros escenarios, que además coinciden en las zonas más turbulentas: la zona del chorro polar durante el periodo del año que se analiza, previo al invierno, y también se aprecia un aumento del índice en el este de Asia, que coincide con la corriente en chorro subtropical y las zonas montañosas del Himalaya y el Tíbet. Para el hemisferio sur ocurre lo mismo, la intensificación es menor y se localiza en la zona de la Antártida por donde pasa el chorro polar entre los 50°-70° S; el valor va aumentando con los diferentes escenarios, alcanzando su valor máximo a finales de siglo en el escenario SSP585. Además, también se aprecia un ligero incremento en este escenario entorno a los 30° S en el océano Pacífico y este de Australia

4.2 Porcentaje de cambio del índice TI1

Hay algunos casos en los que las diferencias entre un periodo y otro o incluso entre un escenario y otro son difíciles de apreciar; es por ello que se ha realizado una comparación entre los datos de los diferentes escenarios para los periodos de proyección futura (2015-2054 y 2055-2100) y los datos del índice en el periodo de referencia, 1950-2015.

Para realizar este estudio, al valor medio de la integración del índice de cada uno de los tres escenarios, se le restó el valor medio de la integración de control de 1950-2015 en los dos periodos

futuros, la primera mitad de 2015-2054 y la segunda mitad, 2055-2100. Sin embargo, en la primera mitad de siglo los cambios no son muy significativos, por lo que se va a centrar el estudio en el segundo periodo del siglo, de 2055 a 2100.

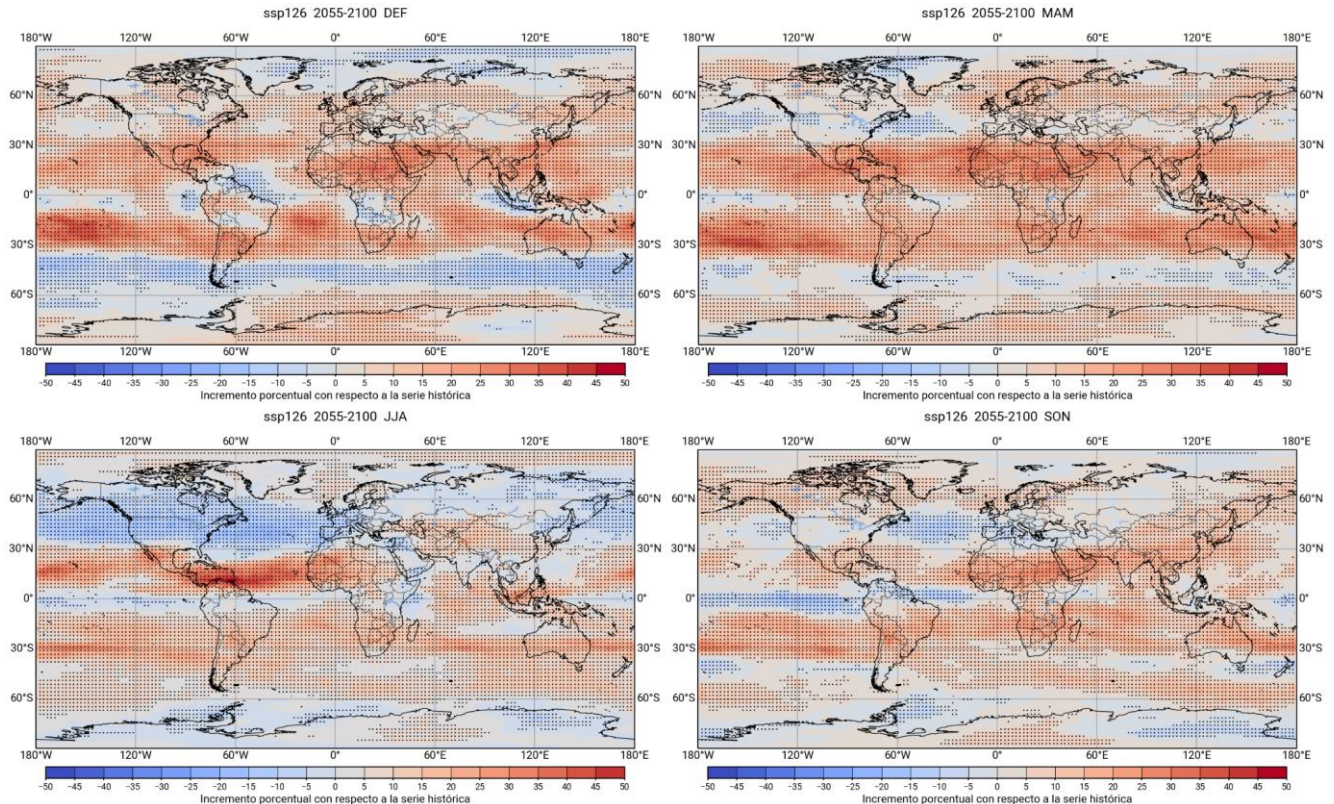


Figura 4-6: Variación del índice T1 en la segunda mitad de siglo utilizando el escenario SSP126.

En el escenario más favorable, el mayor incremento en el índice T1 ocurre en los meses de junio, julio y agosto sobre el Atlántico y Centroamérica entre los 10° y 30° N, donde se pueden observar incrementos de hasta un 40%. Este incremento confirma el estudio de *Storer et al., (2017)* [42] que demuestra la intensificación de la corriente de chorro ecuatorial. Esto supondrá un gran problema para las rutas que conectan la Península Ibérica con Centroamérica y Sudamérica. También se puede observar un incremento general durante todo el año en el conjunto de latitudes entre 10° y 30° N y S del orden de un 20%. Aunque este aumento sea menor podría suponer un problema mayor debido a la gran densidad de tráfico aéreo que circula por esta zona. A pesar del aumento por lo general del índice durante todo el año, existe una parte donde el índice disminuye aunque no en gran medida (en torno a un 10-15%). Se trata de la zona de Norteamérica y gran parte del océano Atlántico entre las latitudes de 30° y 60° N.

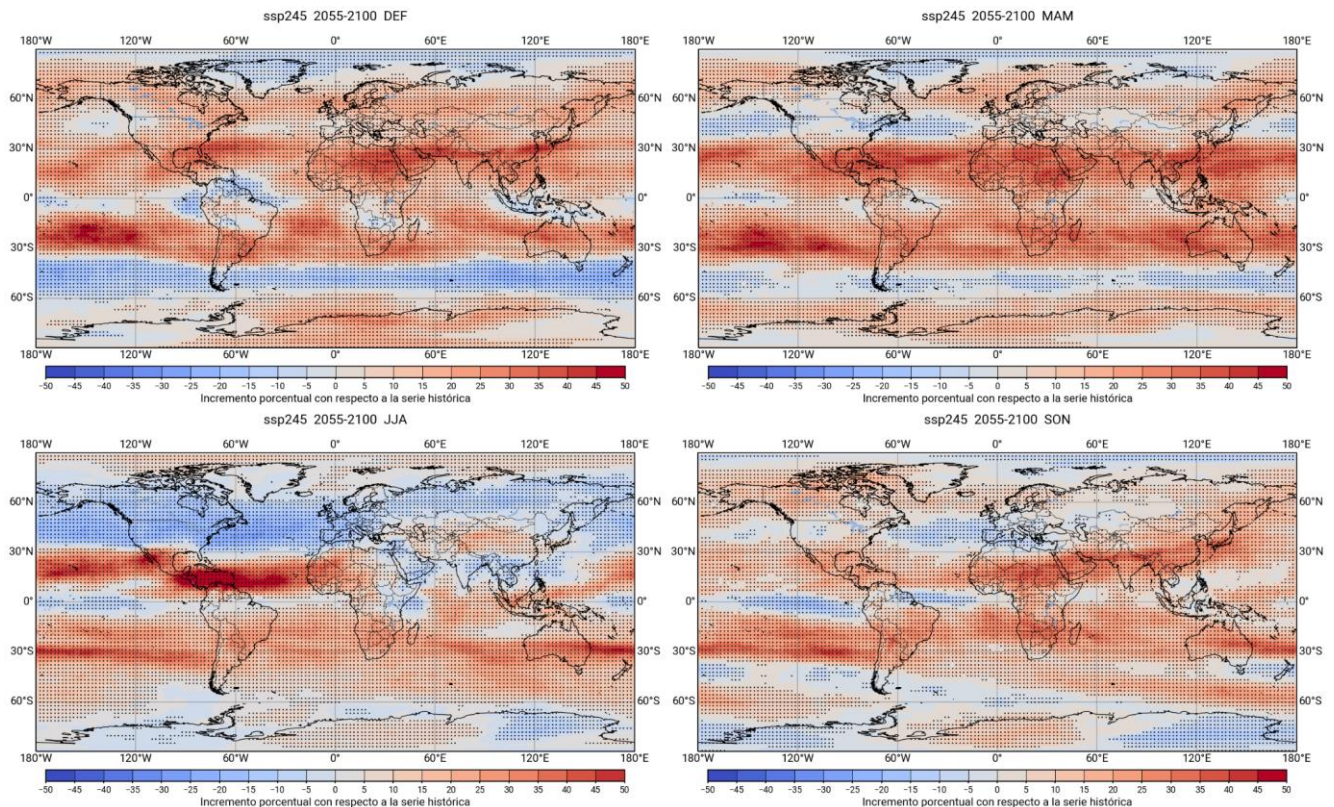


Figura 4-7: Variación del índice T1 en la segunda mitad de siglo utilizando el escenario SSP245.

En el estudio del escenario ‘intermedio’, a diferencia del escenario SSP126, la aparición de más eventos de turbulencia de aire claro se ven a finales de siglo en los meses de marzo, abril y mayo entre 10° y 40° norte y sur, que coincide con las corrientes de chorro subtropicales. El incremento se produce prácticamente en toda la región que comprenden estas latitudes, apareciendo algunas zonas donde el aumento llega al 40%. De las regiones más afectadas se encuentran el norte de África, donde se mantiene el incremento durante todo el año, al igual que le sucede al centro del continente asiático y Centroamérica. Por otra parte, este escenario de cambio climático muestra un aumento de casi el 50% en la zona de Centroamérica durante los meses de junio, julio y agosto, siendo este su valor máximo. A diferencia del escenario anterior, la zona donde el índice disminuía durante las 4 estaciones, Norteamérica y océano Atlántico, ahora únicamente se aprecia este decremento del índice durante los meses junio, julio y agosto y septiembre, octubre y noviembre; este decremento es debido a la corriente de chorro polar del hemisferio norte. Además, en este escenario también se puede observar durante los meses de diciembre, enero y febrero (verano austral) un decremento entre las latitudes de 30° y 60° sur que afectaría al sur de Sudamérica y sur de Australia.

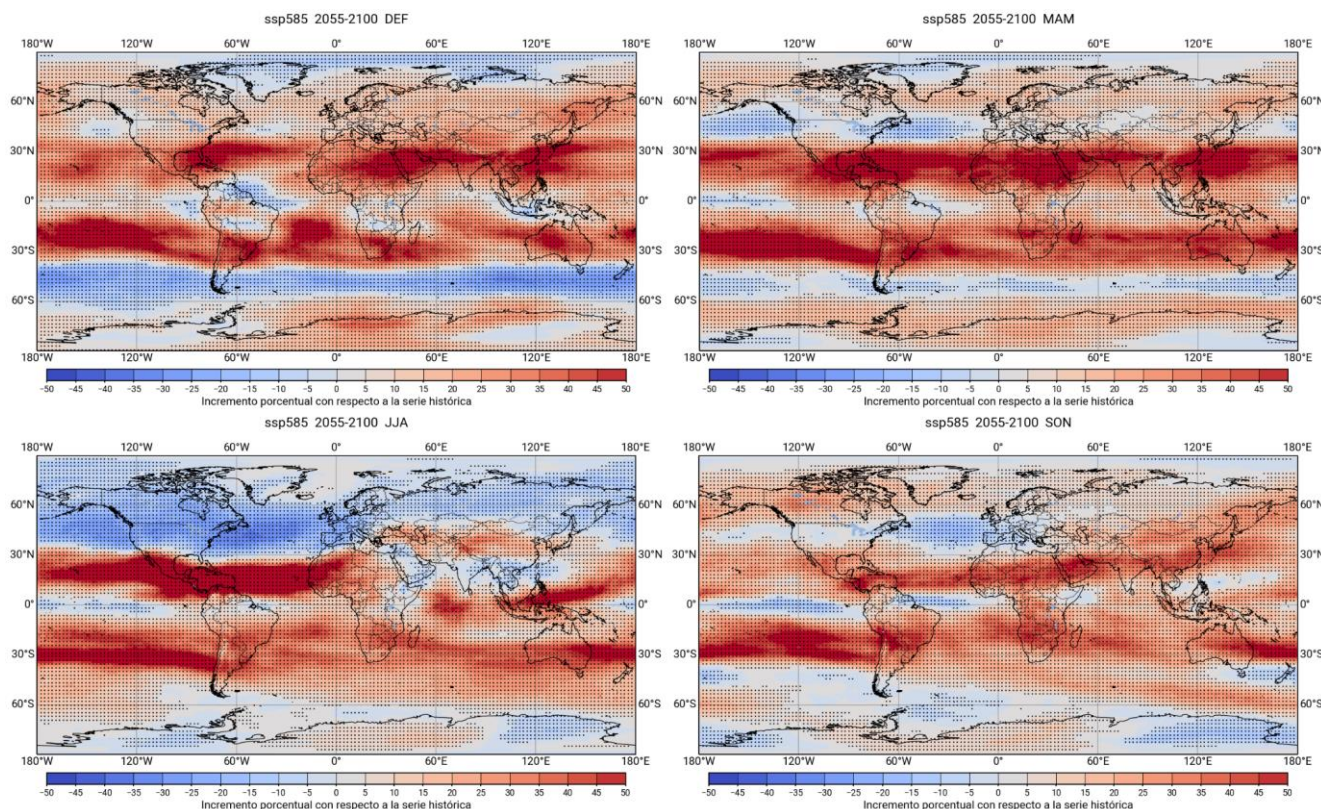


Figura 4-8: Variación del índice T1 en la segunda mitad de siglo utilizando el escenario SSP585.

Por último, para el escenario más desfavorable y como se puede observar en Figura 4-8 los cambios son más destacados en toda la superficie del globo, siendo más intensos tanto los incrementos como los decrementos. Las zonas afectadas corresponden con las mencionadas del escenario SSP245, pero el porcentaje de cambio es mucho mayor. Para los meses de diciembre a mayo el porcentaje de cambio entre las latitudes 30°N y 30°S es prácticamente del 50% en toda la zona, pudiendo intensificarse y superar dicho porcentaje. A diferencia de los otros escenarios, los incrementos del 50% afectan a zonas con mucha densidad de tráfico aéreo como son el sur de EEUU y toda Sudamérica. Además, existen otras zonas como el norte de África, Australia, Centroamérica y la zona del continente asiático que se encuentra entre las latitudes 10°-40° N donde el incremento del 50% se mantiene durante todo el año. Al igual que con los incrementos, las zonas donde disminuye el índice también se han intensificado e incluso han aumentado; en este escenario existen zonas aisladas y únicamente aparecen durante periodos de 3 meses, donde se aprecia un decremento mayor en comparación con los otros escenarios, como ocurre en el océano Atlántico durante los meses de marzo, abril y mayo que coinciden con la primavera boreal. Las zonas donde se aprecia un decremento mayor coinciden con las comentadas en el escenario SSP245, pero en este caso, la zona de América del norte y océano Atlántico aumenta extendiéndose a lo largo del norte del continente asiático. Finalmente, la zona comprendida entre las latitudes 30°-60° S durante los meses de diciembre, enero y febrero también sufre un decremento del índice T1 más intenso que en el escenario anterior (en torno a un 20%).

4.3 Tendencia en las zonas de interés.

Después de realizar un estudio sobre el porcentaje de cambio a nivel global, hay que focalizar el estudio en las zonas de interés para España, es decir, en los espacios aéreos más influyentes para el tráfico aéreo militar y civil español.

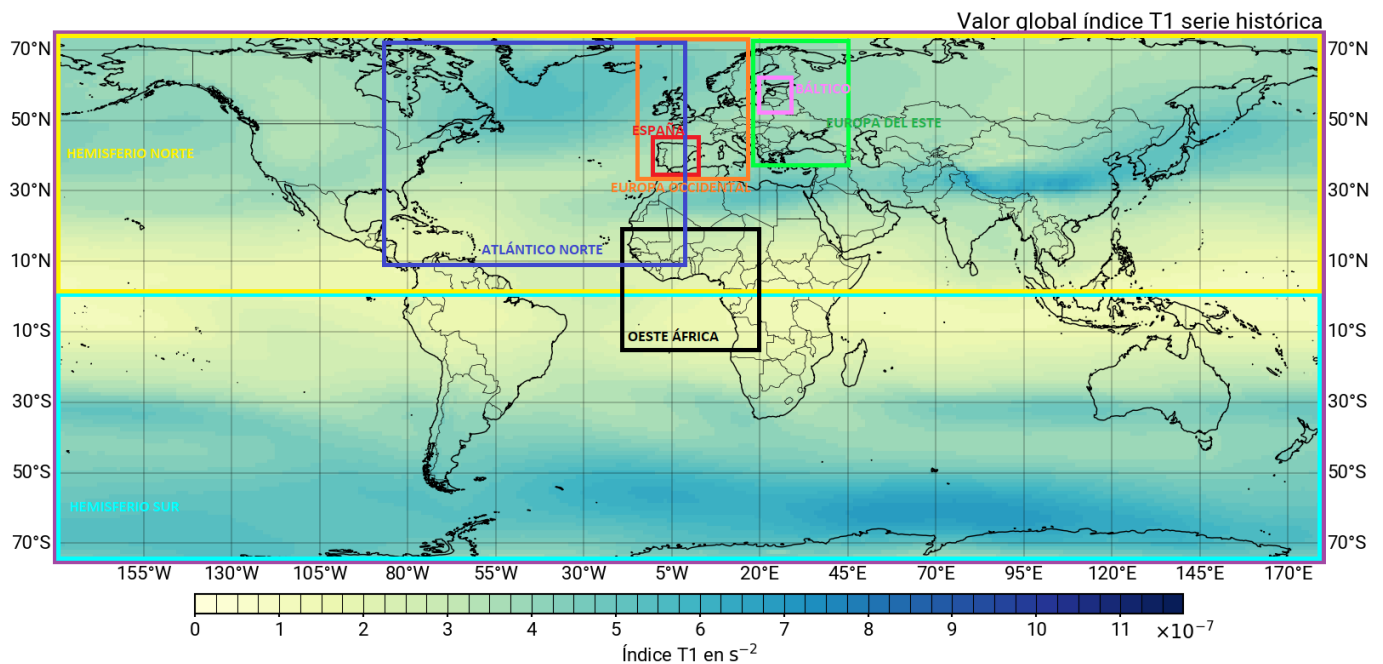


Figura 4-9: Mapa global con la tendencia del índice T1 de 1950-2015 con las zonas de interés representadas

Para poder observar de manera más clara las regiones donde se va a calcular la tendencia, se ha desarrollado un mapa (Figura 4-9) donde se representa la tendencia del índice a lo largo de la serie histórica, de 1950 a 2015, en todo el mundo. Además, se ha remarcado cada zona de interés y se puede comprobar el cambio del índice en cada una de ellas. Las zonas de interés seleccionadas son: por un lado y de forma más general, a nivel global, hemisferio norte y hemisferio sur; por otro lado, de interés general, como son el océano Atlántico Norte, Europa Occidental y la propia Península Ibérica; y por último, las zonas de especial interés militar, que son el oeste de África, la zona del Báltico y Europa del Este, debido al conflicto que está ocurriendo actualmente.

Con el fin de analizar la existencia de tendencias en el comportamiento del índice T1 dentro del contexto de cambio climático, se realizó un análisis en el que se calculó la tendencia del índice para el periodo futuro de 2015 a 2100 considerando los tres escenarios SSP126, SSP245 y SSP585. Estos cálculos se han representado en una gráfica como indica la Figura 4-10. En ella aparecen 4 gráficas diferentes, una para la tendencia del índice en la serie histórica de 1950 a 2015 y las tres restantes representan la tendencia del índice para cada uno de los escenarios de proyección futura.

ANÁLISIS DE LA TENDENCIA DE FORMACIÓN DE TURBULENCIAS HACIENDO USO DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS DE PROYECCIÓN CLIMÁTICA DEL CMIP6

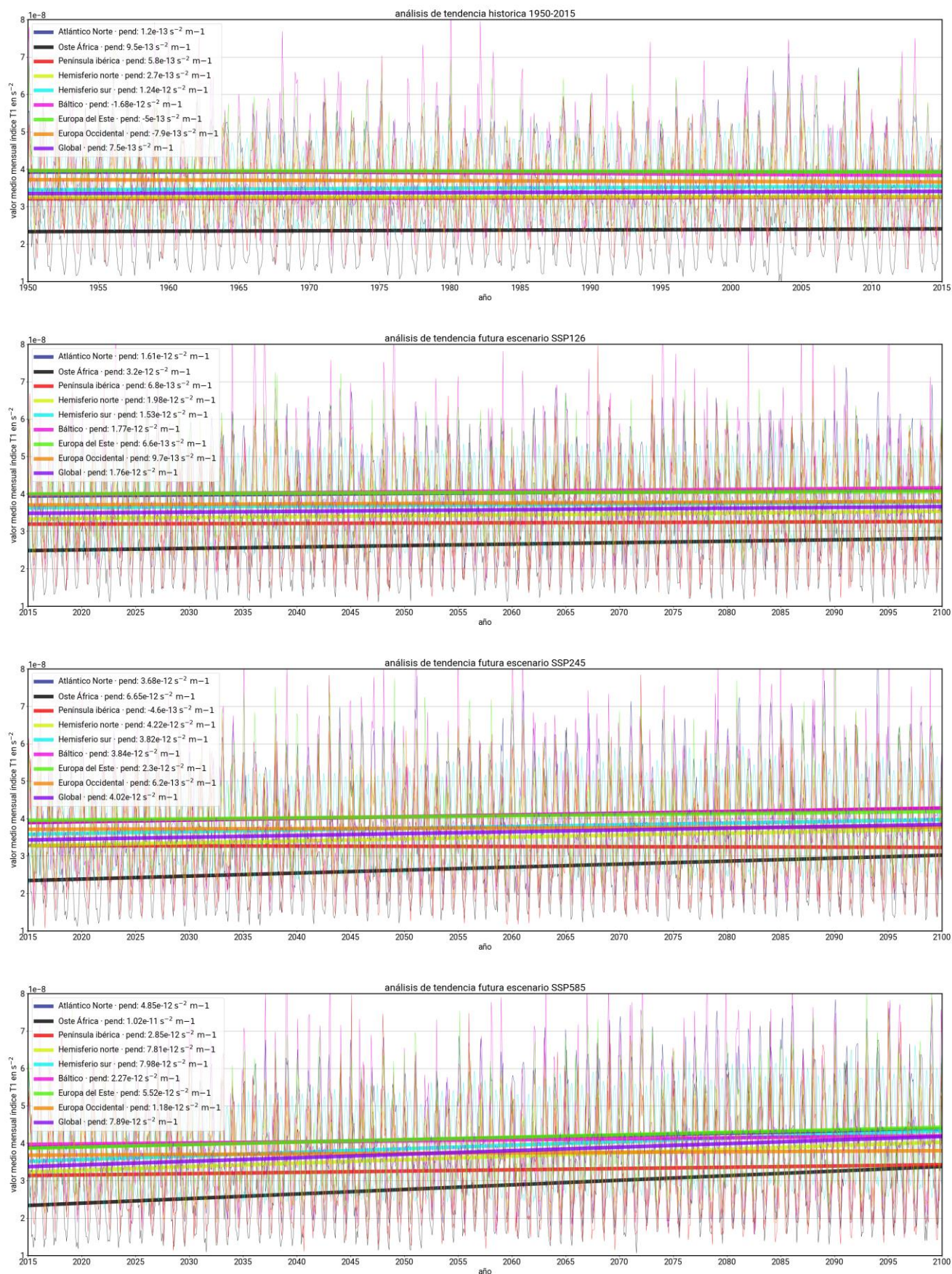


Figura 4-10: Análisis de tendencia histórica y futura considerando los tres escenarios de proyección futura a nivel global y en cada zona de interés.

En la primera gráfica, que representa el periodo de 1950 a 2015, muestra las líneas de tendencia de las 9 zonas de interés que se han seleccionado anteriormente. Por lo general, la tendencia global es positiva aunque no tiene un valor significativo. Separando el globo en hemisferios y analizando cada hemisferio por separado se puede observar que la tendencia en el hemisferio sur es mucho mayor que en el hemisferio norte que coincide con Figura 4-10 donde la tendencia en el hemisferio sur es mayor. En el caso del Atlántico Norte la tendencia es positiva pero su valor es muy próximo a cero, lo mismo ocurre con la Península Ibérica aunque su valor es ligeramente superior. En la zona del oeste de África la tendencia es también positiva debido a que parte de esta zona coincide con el paso de las corrientes de chorro subtropicales. Por último, existe una tendencia negativa generalizada en Europa donde la tendencia es menor en la zona occidental que en el este del continente. Es por ello que en la zona del Báltico a la hora de analizar la tendencia en los escenarios de proyección futura se puede observar que la tendencia del índice a nivel global aumenta significativamente, multiplicando por diez su valor para el escenario más desfavorable. Lo mismo ocurre analizando la tendencia en ambos hemisferios; para el hemisferio sur la tendencia aumenta de manera gradual con los diferentes escenarios pero en el hemisferio norte el incremento es mucho más notable en el primer escenario, luego el incremento se vuelve gradual. Sin embargo, a final de siglo el valor de la tendencia para las tres zonas es aproximadamente el mismo.

En el caso del Atlántico norte y Europa del este el incremento es gradual conforme se utilizan los diferentes escenarios de análisis. Lo mismo ocurre con el oeste de África aunque su incremento es mucho mayor, la tendencia en esta zona alcanza su valor máximo.

Para las zonas de la Península Ibérica, el Báltico y Europa Occidental no ocurre este incremento gradual. En la zona del Báltico, la tendencia aumenta para los dos primeros escenarios pero disminuye en el SSP585 con respecto al escenario anterior, esto es debido a que esta zona se encuentra cerca del chorro polar donde el valor del índice disminuye a final de siglo. En las zonas de Europa Occidental y Península Ibérica la tendencia aumenta para el primer escenario pero disminuye en el segundo, tanto es así que en la Península Ibérica la tendencia se vuelve negativa en el escenario SSP245, esto ocurre porque en este escenario el decremento del índice que ocurría durante parte del año en la zona del Atlántico influye en gran medida a la Península Ibérica; sin embargo, en el escenario SSP585 la tendencia en esta zona aumenta de modo relevante. En Europa Occidental también disminuye la tendencia en el escenario SSP245 por la misma razón pero no sufre un decremento tan grande ya que la zona es más grande y hay partes más alejadas del océano Atlántico que apenas se ven afectadas; al igual que en la Península en el escenario SSP585 la tendencia aumenta pero el incremento es mucho menor ya que hay regiones dentro de esta zona que están afectadas por la corriente de chorro polar donde el índice disminuye.

Tendencias del índice T1 en las zonas de interés · 2015-2100

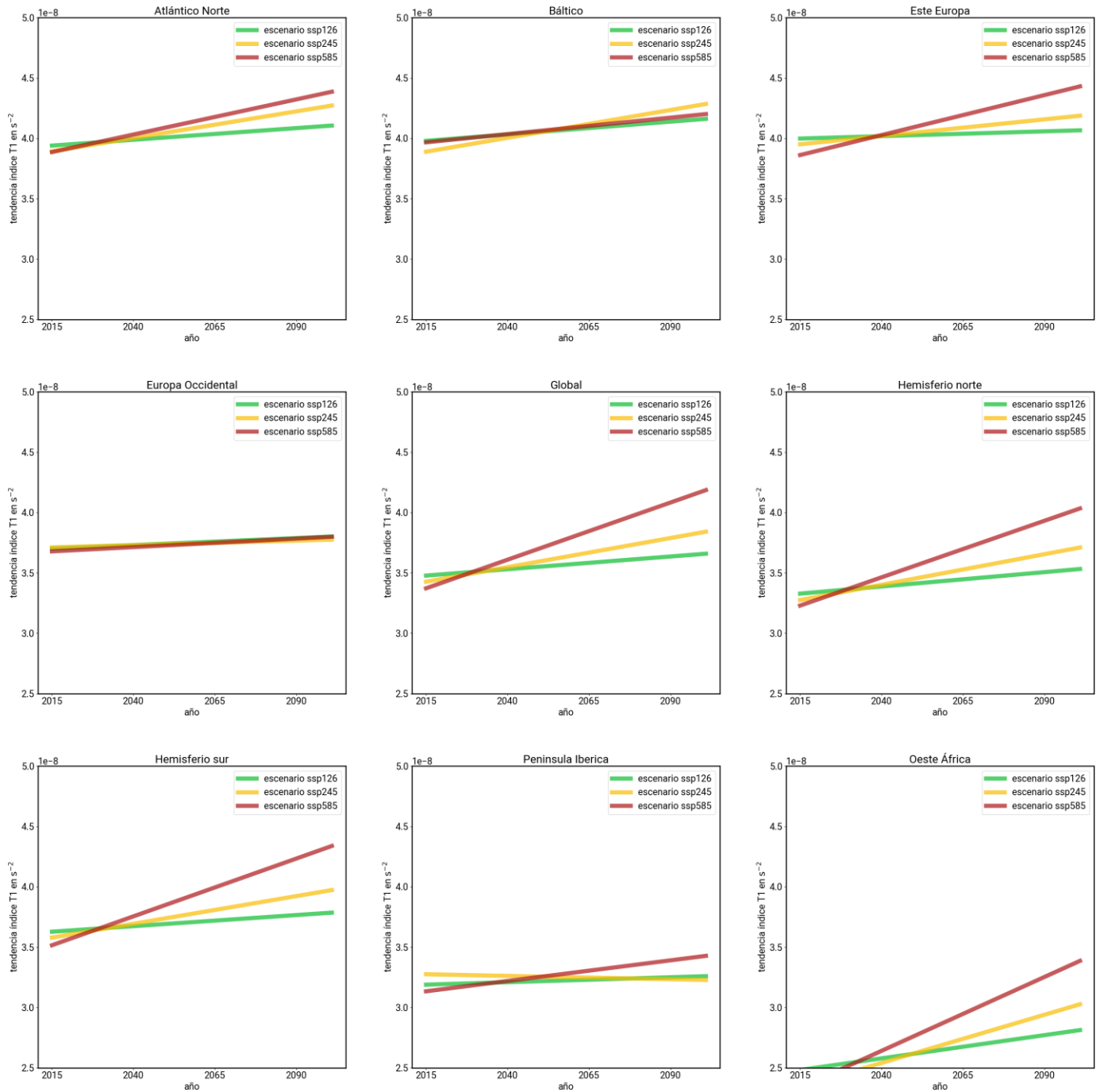


Figura 4-11: Tendencia del índice T1 en las zonas de interés.

Para poder analizar las zonas de interés de forma más clara en la Figura 4-11 se presentan gráficas individuales para cada zona con la tendencia del índice para cada uno de los escenarios de proyección futura. En estas gráficas se puede observar que hay en algunas zonas donde el valor medio del índice actualmente es mucho menor que en otras; este es el caso del oeste de África donde el valor medio es menor de $2.5 \times 10^{-9} s^{-2}$ mientras que en todas las demás el valor es mayor de $3 \times 10^{-9} s^{-2}$. Se puede observar también que existen tres zonas donde el valor medio del índice actualmente es mayor que el

resto, se trata del Atlántico norte, el Báltico y Europa del Este donde su valor alcanza los $4 \times 10^{-9} s^{-2}$, es decir, que en estas zonas se producen más turbulencias.

Sin embargo, las zonas donde el valor del índice actual es mayor no coinciden con las que tienen mayor tendencia; es más, el Báltico tiene la segunda tendencia más baja. En cambio el oeste de África que tiene el valor medio más bajo tiene la tendencia más alta, esto significa que el número de turbulencias en esta zona aumentará más que en el resto de regiones. Además en el escenario SSP585 donde la tendencia en esta zona alcanza valores muy elevados provoca que a final de siglo el valor medio del índice supere a otras regiones como la Península Ibérica donde la tendencia es mucho más baja.

Como se explicó antes, tanto a nivel global como para cada hemisferio analizado individualmente las tendencias se observa que son muy parecidas y aumentan con los diferentes escenarios. Además se puede apreciar como, al igual que en la gráfica anterior en el hemisferio sur el valor del índice es ligeramente superior al inicio del siglo pero acaba siendo aproximadamente igual al del hemisferio norte a final de siglo.

Para las zonas de Europa Occidental y el Báltico se observa que las tres líneas de tendencia de los diferentes escenarios tienen una pendiente muy similar y para el caso de Europa Occidental las tres tendencias parecen una misma recta.

En el caso de la Península Ibérica se puede apreciar como en el primer escenario la tendencia aumenta y en el segundo escenario la tendencia se vuelve negativa llegando a tomar valores del índice menores que en el primer escenario a finales de siglo. Sin embargo y como se puede observar, en el tercer escenario la tendencia aumenta significativamente llegando a valores más altos a final de siglo.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

5.1.1 Índice T1 y Scenario MIP

La primera tarea al comenzar el proyecto fue la elección de un índice adecuado para la caracterización de las turbulencias. De entre todos los índices que se probaron, finalmente se optó por el índice T1. Esta decisión se toma debido a su alto rendimiento, su alto porcentaje de pronóstico y su bajo índice de error.

El segundo paso en el proyecto fue la elección del modelo climático. Hay que resaltar que la selección deber ser muy cuidadosa, ya que es el modelo climático el que proporciona los datos para calcular el índice. De todos los modelos climáticos del CMIP6, se escogieron inicialmente tres por su buen rendimiento y su capacidad para, posteriormente, desechar dos y seleccionar el que mejor se adaptaba a nuestro trabajo. Finalmente el modelo MRI-ESM2 fue el elegido por que era el modelo que más datos de proyección futura aportaba para nuestro estudio y por su gran resolución.

Por último, para desarrollar un estudio más detallado y poder proporcionar datos más realistas sobre el futuro se escogieron tres escenarios de proyección futura diferentes. De todos los escenarios que existen, se escogieron el SSP126, el SSP245 y el SSP585. Estos tres escenarios exponen un futuro completamente distinto en función de la concentración de CO₂ y en función de las políticas medioambientales.

Con la selección del índice, del modelo y de los escenarios futuros se pudo completar un estudio detallado que nos permitió analizar las turbulencias a nivel global.

5.1.2 Programación y código

Con el fin de que lo calculado en la fase previa pudiese cumplir con los objetivos del proyecto se empleó el lenguaje de programación Python, que nos ha permitido realizar una serie de mapas y gráficas muy detallados y visualmente atractivos, muy útiles para obtener una visión global del proyecto y permitir detectar errores en su desarrollo.

Sin los contenidos elaborados con este programa no habría sido posible lograr con todos los objetivos establecidos al inicio del proyecto.

5.1.3 Incremento de turbulencias

El siguiente paso fue realizar una interpretación y análisis de los resultados obtenidos de manera clara. Para ello, se dividió el tiempo entre el periodo pasado y el periodo futuro, y con la ayuda de los mapas elaborados se realizó el análisis de resultados.

Este estudio y análisis de resultados han servido para explicar y evidenciar las zonas donde se espera un incremento de turbulencias, que se ven ampliamente influenciadas por la corriente en chorro y las ondas de montaña. Además, también ha demostrado el importante influjo del cambio climático sobre la formación de turbulencias, ya que es en el escenario más desfavorable donde se aprecia una mayor variación del índice, con un incremento tanto en intensidad como en superficie terrestre donde el índice ha aumentado.

Analizando los resultados del proyecto y comparando los diferentes escenarios podemos afirmar que:

- En primer lugar, existen grandes diferencias entre los diferentes escenarios de proyección futura que hemos utilizado. En el escenario SSP126, el mayor incremento del índice se produce a final de siglo 2055-2100, en los meses de junio, julio y agosto sobre el Atlántico entre los 10° y 30° N donde se observan incrementos de hasta un 40%, lo que demuestra una intensificación de la corriente de chorro ecuatorial. Esto podría afectar notablemente a las rutas que conectan el norte de Sudamérica con la Península Ibérica y las rutas entre la zona del Caribe con América del norte. Además se aprecia un incremento en el Pacífico entre latitudes 10° y 30° tanto en el hemisferio sur como en el hemisferio norte que se hace más notable durante los meses de marzo, abril y mayo (en torno al 20%).
- Para el escenario SSP245, los mayores incrementos aparecen al igual que en el escenario anterior a finales de siglo 2055-2100 durante los meses de marzo, abril y mayo entre los 10° y 40° norte y sur, es decir, coincidente con las zonas de paso de las corrientes de chorro subtropicales. El patrón de incremento es muy similar al escenario SSP126 pero con valores más elevados. Además el incremento alcanza su valor más elevado durante los meses de junio, julio y agosto a finales de siglo donde llega a alcanzar hasta un 50% de incremento.
- Por último, para el escenario más desfavorable, el SSP585 los cambios son mucho más destacados en toda la superficie del globo. Durante los meses de diciembre, enero, febrero, marzo, abril y mayo, los incrementos alcanzan el 50% en prácticamente toda la superficie comprendida entre los 30° N y 30° S. El patrón como en el escenario anterior es similar pero las zonas donde se alcanzan valores del 50% se han extendido, este es el caso del sur de EEUU durante los meses de marzo, abril y mayo; y el norte de África donde también alcanza valores superiores al 50% durante los meses de primavera e invierno. Como cabía de esperar, el escenario de cambio climático que más cambios negativos proyecta es el SSP585 donde gran parte del globo presenta valores mayores al 50%, por tanto el número de turbulencias asociadas al índice aumentará significativamente. Es importante recalcar que el incremento del índice entre los diferentes escenarios es gradual y sigue el mismo patrón en cuanto a regiones afectadas.

También existe una gran diferencia a la hora de comparar las diferentes estaciones pudiendo afirmar que:

- Para los meses de diciembre, enero y febrero, se aprecia un incremento gradual que alcanza su valor máximo a finales de siglo 2055-2100 entre 30°N y 30°S donde hay zonas que llegan a alcanzar valores de 50% en el escenario SSP585 como en la zona del Caribe, sur de América entre los 30° y 10° S y en la zona del norte de África y parte de Asia en la zona de la India coincidente con la corriente de chorro subtropical. Cabe destacar que existe una zona de decremento que solo sucede durante estos meses, es entre los 40° y

60° que coincide con el paso de la corriente de chorro polar del hemisferio sur (hasta un 30%)

- Durante los meses de marzo, abril y mayo, se produce el incremento más significativo. El patrón es parecido a los meses anteriores pero las zonas donde el valor alcanza el 50% son mucho más extensas, llegando a ocupar la mayor parte comprendida entre los 40°S y 30°N siendo las zonas más afectadas las coincidentes con las corrientes de chorro subtropicales. Durante estos meses se aprecian ligeros decrementos casi despreciables (en torno al 10%)
- Para los meses de junio, julio y agosto el incremento se produce en la zona del Caribe principalmente que llega a alcanzar un incremento del 50% a finales de siglo considerando el escenario SSP585 llegando a extenderse al sur de EEUU y oeste de África. Además en el sur de Asia y la zona de Australia también aparece un incremento significativo a finales de siglo (alcanzando valores de 50%). Sin embargo durante estos meses se produce un gran decremento del índice en gran parte del hemisferio norte. En prácticamente toda la superficie comprendida entre los 30° y 80°N, a excepción de la zona del Himalaya, se produce un decremento del índice, pronunciándose más en la zona del América del Norte y Atlántico Norte donde llega a tomar valores del 35%.
- Por último, durante los meses de septiembre, octubre y noviembre el incremento del índice es menos pronunciado. Aun así aparecen zonas a finales de siglo y considerando el escenario SSP585 donde el incremento llega a alcanzar valor del 50% como el centro de África o el oeste del sur de América que coincide con la cordillera de los Andes. También aparece un ligero decremento en el Atlántico norte que llega al 10%.

5.1.4 Zonas de interés

Una vez realizado el análisis del índice a nivel global para los diferentes periodos de tiempo y considerando los tres escenarios de proyección futura, se amplió el proyecto centrando el análisis en las zonas de interés económico, político y militar para España.

Utilizando el análisis realizado en las zonas de interés se puede concluir que:

- Cada zona que se ha estudiado tiene en la actualidad un valor del índice diferente, es decir que en las zonas donde el índice es más alto, es más probable que aparezcan turbulencias. Estas zonas son el Báltico, el Atlántico norte y Europa del este.
- Las tendencias, calculadas considerando los tres escenarios de proyección futura, aumentan de manera general pero existen algunas zonas donde esta tendencia alcanza valores mayores. Este es el caso del hemisferio sur y el oeste de África, en esta última se aprecia una tendencia muy elevada, lo que significa un gran aumento del índice para finales de siglo.
- Por último, existen dos zonas donde la tendencia es muy pequeña llegando a ser negativa en el escenario SSP245, lo que significa que el índice aumentará ligeramente y en consecuencia, las turbulencias, este es el caso de Europa Occidental y la Península Ibérica.

Con este estudio se ha podido demostrar las zonas donde se espera que la formación de turbulencias aumente. Para ello, se ha realizado una serie de gráficas donde se analiza de manera individual la tendencia en cada una de las zonas. Se puede concluir que, en todas las zonas de interés, la tendencia aumenta y se han destacado las zonas donde este aumento podría suponer un riesgo alto para los intereses nacionales.

5.1.5 Conclusión final

De manera general, y considerando todo lo mencionado anteriormente, se puede afirmar que los objetivos establecidos al comienzo del proyecto se han alcanzado de manera satisfactoria. Esto quiere decir que se ha llevado a cabo el análisis de datos para analizar la tendencia de la formación de turbulencias y se ha podido llegar a una serie de conclusiones y resultados en aquellas zonas de interés nacional.

Además, se han cumplido los objetivos implícitos al objetivo principal del proyecto, así como los objetivos adicionales que surgieron durante su desarrollo. De este modo, se ha logrado redactar un proyecto que podrá ser utilizado en estudios e investigaciones dentro del mismo ámbito.

5.2 Líneas futuras

Utilizando simulaciones de modelos climáticos, este trabajo ha encontrado notables incrementos relativos al índice estudiado, para el periodo futuro, y bajo los tres escenarios utilizados. Asimismo, los resultados obtenidos refuerzan la necesidad cada vez más urgente de mejorar la destreza de las previsiones operativas de las turbulencias. No obstante, a pesar de contener información útil y de mejorar de forma demostrable la seguridad y la comodidad de los viajes aéreos, estas previsiones incluyen una fracción sustancial de falsos positivos y eventos perdidos. Este trabajo puede tener implicaciones para las operaciones de la aviación en las próximas décadas

La investigación futura deberá ampliar nuestros resultados, cuantificando las incertidumbres restantes y examinando otras regiones geográficas. Sin embargo, hay que tener en cuenta dos fuentes clave de incertidumbre que son muy difícil de cuantificar; en primer lugar, las futuras emisiones de gases de efecto invernadero, que dependen de factores socioeconómicos y políticos y que nos obliga a utilizar otros escenarios de forzamiento además de los tres utilizados en nuestro estudio; en segundo lugar, las corrientes en chorro de la troposfera superior y la estratosfera inferior, en distintos modelos climáticos, pueden responder de forma diferente a una anomalía de forzamiento determinada por lo que se debería utilizar otros modelos climáticos que tengan mayores resoluciones espaciales.

Teniendo en cuenta que los métodos actuales de previsión de las turbulencias en la aviación son imperfectos y no se pueden predecir todos los eventos de turbulencia; por lo tanto, la investigación continua para mejorar los sistemas de previsión debe ser otra de las prioridades en el futuro. Además, la industria aeronáutica debe asegurarse de que los aviones del futuro estén a la altura del desafío; y no solo para responder al peligro que suponen las turbulencias, sino también para afrontar otras amenazas derivadas del cambio climático (altas temperaturas que restringen el peso en el despegue, formación de hielo en los aviones,...). Además, la necesidad de elegir la ruta más eficaz en términos de tiempo para reducir el consumo de combustible y los costes puede obligar a algunos pilotos a volar en más regiones con turbulencias. Teniendo en cuenta todos estos aspectos, se pueden desarrollar nuevos y mejores procesos de trabajo para asegurarse de que se reduce tanto el impacto que la aviación tiene en el clima como el que el cambio climático puede tener en la aviación. Dado que se espera que el volumen de los viajes aéreos aumente con el tiempo, lo que dará lugar a cielos más congestionados, la investigación realizada ahora es vital para garantizar que la industria esté preparada para el futuro.

Finalmente, es importante evaluar si los cambios esperados se traducen en aumentos de frecuencia y/o intensidad para elaborar adecuadamente los planes de adaptación y mitigación de los impactos del cambio climático en la aviación.

5.3 Propuestas finales

Como se ha demostrado, las turbulencias suponen un problema importante para el sector de la aeronáutica, es por eso que es necesaria la concienciación de toda la comunidad con el fin de reducir lo máximo posible el encuentro con turbulencias y reducir sus efectos. En este sentido, y en consonancia con el estudio realizado, se proponen a continuación una serie de posibles soluciones.

En primer lugar, para mejorar la capacidad de predicción del índice se hace necesario aumentar la precisión y el volumen de la información que alimenta los modelos predictivos; por ejemplo con la adición de valiosos datos de viento en zonas con escasez de datos mediante la transmisión de los vientos por satélite o por radio de muy alta frecuencia (VHF), así como con la transmisión de las temperatura de los aviones comerciales a través del Sistema de Direccionamiento e Información de Comunicaciones (ACARS); además, los sensores remotos, como las sondas satélites mejoradas, los perfiladores y los radares Doppler, también proporcionarán importantes mejoras a estas previsiones. Estos métodos mejorarán el análisis inicial en las rutas aéreas más frecuentadas.

Asimismo, algunos aviones modernos están equipados con un acelerómetro en su cono de nariz. Si el acelerómetro registra un cambio repentino de altitud, lo suficientemente grande como para indicar la existencia de turbulencias, los alerones se ajustan rápidamente para intentar amortiguar el movimiento vertical y reducir la aceleración.

Por último, otro factor potencialmente relevante es el desarrollo de tecnología de a bordo para detectar las turbulencias en el aire libre. En principio, el aumento del riesgo de encontrarse con turbulencias en el aire claro en el futuro podría mitigarse equipando las aeronaves con sistemas de detección y medición de luz LIDAR (Light Detection and Ranging) de láser ultravioleta. El LIDAR podría advertir a los pilotos de cualquier perturbación de densidad invisible (indicativa de turbulencia) hasta 10-15 km por delante, lo que daría suficiente tiempo para alertar a los pasajeros y a la tripulación o incluso para intentar una maniobra evasiva. A día de hoy, la instalación de la tecnología LIDAR no es rentable económicamente, aunque es previsible que, si continúa su desarrollo, se vuelva menos costosa y permita solventar el problema de las, cada vez más frecuentes, turbulencias aéreas.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Hermanos Wright | PDF | Los hermanos Wright | Aeronáutica», *Scribd*. <https://es.scribd.com/document/458926986/Hermanos-Wright> (accedido 16 de marzo de 2022).
- [2] D. H. Allen, «Structural Analysis, Aerospace», en *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*, R. A. Meyers, Ed. New York: Academic Press, 2003, pp. 155-173. doi: 10.1016/B0-12-227410-5/00910-8.
- [3] «(PDF) The birth of flight control: An engineering analysis of the Wright Brothers' 1902 glider». https://www.researchgate.net/publication/229091509_The_birth_of_flight_control_An_engineering_analysis_of_the_Wright_Brothers'_1902_glider#read (accedido 16 de marzo de 2022).
- [4] «av-sp.pdf». Accedido: 9 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/av-sp.pdf>
- [5] «informe_cov19_pti_salud_global_csic_v2_1.pdf». Accedido: 16 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.csic.es/sites/default/files/informe_cov19_pti_salud_global_csic_v2_1.pdf
- [6] «El impacto del COVID-19 en la industria de la aviación», *Grant Thornton España*. <https://www.grantthornton.es/perspectivas/el-impacto-del-covid-19-en-la-industria-de-la-aviacion/> (accedido 9 de febrero de 2022).
- [7] T. Lanchipa-Ale, K. Moreno-Salazar, B. Luque-Zúñiga, T. Lanchipa-Ale, K. Moreno-Salazar, y B. Luque-Zúñiga, «http://scielo.iics.una.py/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2617-47312020000200155&lng=en&nrm=iso&tlng=es», *Rev. Soc. Científica Parag.*, vol. 25, n.º 2, pp. 155-182, dic. 2020, doi: 10.32480/rscp.2020.25.2.155.
- [8] «• Tráfico aéreo de pasajeros en España 2012-2020 | Statista». <https://es.statista.com/estadisticas/540927/trafico-total-de-pasajeros-de-avion-en-espana/> (accedido 9 de febrero de 2022).
- [9] G. Flechoso, «Libro blanco del I+D+i para la sostenibilidad de la aviación en España», p. 32.
- [10] «Suplemento 1 del BOUCA N° 342», p. 187.
- [11] H. y Eléctricos, «El avión eléctrico Alice pierde el ala en ‘V’ y un motor, y prepara su primer vuelo de pruebas», *Híbridos y Eléctricos*. <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/avion-electrico-alice-pierde-ala-motor-primer-vuelo-pruebas/20210702153958046618.html> (accedido 10 de febrero de 2022).

- [12] G. A. Rodrigo, «EL IMPACTO AMBIENTAL DEL TRANSPORTE AÉREO Y LAS MEDIDAS PARA MITIGARLO», p. 15.
- [13] J. A. Barbero y R. R. Tornquist, «TRANSPORTE Y CAMBIO CLIMÁTICO: HACIA UN DESARROLLO SOSTENIBLE Y DE BAJO CARBONO», p. 21, 2012.
- [14] CESDA, «Impacto de la aviación en el medio ambiente». <https://blog.cesda.com/2012/09/27/impacto-de-la-aviacion-en-el-medio-ambiente> (accedido 10 de febrero de 2022).
- [15] «Protocolo Kioto.pdf». Accedido: 10 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://www.ceida.org/prestige/Documentacion/Protocolo%20Kioto.pdf>
- [16] Hosteltur, «Impacto ambiental del transporte aéreo | Artículo de opinión en Hosteltur», *Hosteltur: Toda la información de turismo*. https://www.hosteltur.com/comunidad/004632_impacto-ambiental-del-transporte-aereo.html (accedido 10 de febrero de 2022).
- [17] J. E. Penner, Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I, Intergovernmental Panel on Climate Change, y Working Group III, *La aviación y la atmósfera global: resumen para responsables de políticas : informe especial de los Grupos de trabajo I y III del IPCC en colaboración con el Grupo de evaluación científica del Protocolo de Montreal sobre las sustancias que agotan la capa de ozono*. Geneva, Switzerland: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 1999.
- [18] G. Portillo, «Estelas de condensación: qué son, características y formación», *Meteorología en Red*, 28 de enero de 2022. <https://www.meteorologiaenred.com/estelas-de-condensacion.html> (accedido 10 de febrero de 2022).
- [19] T. Ryley, S. Baumeister, y L. Coulter, «Climate change influences on aviation: A literature review», *Transp. Policy*, vol. 92, pp. 55-64, jun. 2020, doi: 10.1016/j.tranpol.2020.04.010.
- [20] «Cambio climático y salud - ScienceDirect». <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0014256519300232> (accedido 16 de marzo de 2022).
- [21] «Cyclone Nargis Floods Burma (Myanmar)», 6 de mayo de 2008. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/8723/cyclone-nargis-floods-burma-myanmar> (accedido 10 de febrero de 2022).
- [22] D. H. Puempel y P. D. Williams, «THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON AVIATION: SCIENTIFIC CHALLENGES AND ADAPTATION PATHWAYS», p. 3.
- [23] N. R. Council, C. on C. C. and U. S. Transportation, T. R. Board, y D. on E. and L. Studies, *Potential Impacts of Climate Change on U.S. Transportation: Special Report 290*. Transportation Research Board, 2008.
- [24] «Factsheet Business and Economics Final.pdf». Accedido: 10 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Factsheet%20Business%20and%20Economics%20Final.pdf>
- [25] «AR4 Climate Change 2007: Synthesis Report — IPCC». <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/> (accedido 10 de febrero de 2022).
- [26] L. Meyer, S. Brinkman, L. van Kesteren, N. Leprince-Ringuet, y F. van Boxmeer, «Technical Support Unit for the Synthesis Report», p. 169.
- [27] «Impactos del cambio climático en la aviación. Entrevista con Herbert Puempel», 27 de junio de 2017. <https://public.wmo.int/es/resources/bulletin/impactos-del-cambio->

clima%CC%81tico-en-la-aviacio%CC%81n-entrevista-con-herbert-puempel (accedido 10 de febrero de 2022).

[28] «CMIP6/ESGF contributors», *Google My Maps*. <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1cPCfAqvlJTcYPmuOfWju-WMnRZOC14wx> (accedido 27 de enero de 2022).

[29] M. Buonocore, «A Short Introduction to Climate Models – CMIP & CMIP6», *climateurope*. <https://www.climateurope.eu/a-short-introduction-to-climate-models-cmip-cmip6/> (accedido 27 de enero de 2022).

[30] V. Eyring *et al.*, «Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization», *Geosci. Model Dev.*, vol. 9, n.º 5, pp. 1937-1958, may 2016, doi: 10.5194/gmd-9-1937-2016.

[31] «GMD - The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6». <https://gmd.copernicus.org/articles/9/3461/2016/> (accedido 27 de enero de 2022).

[32] R. Sharman, C. Tebaldi, G. Wiener, y J. Wolff, «An Integrated Approach to Mid- and Upper-Level Turbulence Forecasting», *Weather Forecast.*, vol. 21, n.º 3, pp. 268-287, jun. 2006, doi: 10.1175/WAF924.1.

[33] «CNN - 1 dead, 83 hurt after United jet hits turbulence - December 28, 1997». <http://edition.cnn.com/WORLD/9712/28/japan.turbulence.update/> (accedido 10 de febrero de 2022).

[34] P. Williams, «Will climate change increase transatlantic aviation turbulence?», *Aviat. Turbul.*, p. 17.

[35] «Turbulence: Staying Safe». https://www.faa.gov/travelers/fly_safe/turbulence/ (accedido 1 de febrero de 2022).

[36] R. Sharman y T. Lane, Eds., *Aviation Turbulence*. Cham: Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-23630-8.

[37] «SBIR.gov». <https://www.sbir.gov/> (accedido 1 de febrero de 2022).

[38] «HadechineSanjuan-JavithJose-2021.pdf». Accedido: 16 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/32151/HadechineSanjuan-JavithJose-2021.pdf?sequence=7>

[39] C. Alfredo Santamaría y O. David Astudillo, «Vía aérea superior, ronquido e implicancias clínicas», *Rev. Médica Clínica Las Condes*, vol. 24, n.º 3, pp. 350-357, may 2013, doi: 10.1016/S0716-8640(13)70172-X.

[40] N. Eduardo Rajdl, «Aerotransporte: aspectos básicos y clínicos», *Rev. Médica Clínica Las Condes*, vol. 22, n.º 3, pp. 389-396, may 2011, doi: 10.1016/S0716-8640(11)70439-4.

[41] G. Marrugo-Pardo y M. C. Villalobos-Aguirre, «La confusión entre asma y estenosis subglótica puede causar un evento adverso en la intubación. Reporte de un caso», *Rev. Colomb. Anestesiología*, vol. 45, pp. 82-85, dic. 2017, doi: 10.1016/j.rca.2017.07.010.

[42] «(PDF) Sources of Mesoscale Variability of Gravity Waves. Part I: Topographic Excitation», *ResearchGate*, Accedido: 3 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/253509943_Sources_of_Mesoscale_Variability_of_Gravity_Waves_Part_I_Topographic_Excitation

[43] «Las Turbulencias aéreas», 20 de diciembre de 2010. <https://www.pasionporvolar.com/las-turbulencias-aereas/> (accedido 1 de febrero de 2022).

- [44] J. M. Giraldo Sánchez *et al.*, «Insuflación de gas traqueal como estrategia de rescate en hipoxemia refractaria por edema pulmonar multifactorial en paciente con hemorragia subaracnoidea», *Acta Colomb. Cuid. Intensivo*, vol. 15, n.º 3, pp. 220-226, jul. 2015, doi: 10.1016/j.acci.2015.06.003.
- [45] «¿Qué son las turbulencias y por qué se producen?», *Miedo a los aviones*, 6 de noviembre de 2017. <https://www.miedoalosaviones.com/turbulencias-se-categorizan-las-origina/> (accedido 10 de febrero de 2022).
- [46] «Estudio experimental de la estela de un aerogenerador de tres aspas». <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/116011> (accedido 16 de marzo de 2022).
- [47] «Turbulencia de Estela... un fenómeno mortal», *Noticias de Aviación Transponder 1200*, 25 de julio de 2017. <https://www.transponder1200.com/turbulencia-de-estela-un-fenomeno-mortal/> (accedido 3 de febrero de 2022).
- [48] «Qué son las “turbulencias de aire claro” que causaron 27 heridos en un vuelo de Aeroflot», *BBC News Mundo*. Accedido: 6 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-39774412>
- [49] «Volviendo a lo básico ¿Qué es la corriente en chorro?», *Tiempo.com | Meteored*, 18 de marzo de 2019. <https://www.tiempo.com/ram/volviendo-a-lo-basico-que-es-la-corriente-en-chorro.html> (accedido 6 de febrero de 2022).
- [50] E. Meneguz, H. Wells, y D. Turp, «An Automated System to Quantify Aircraft Encounters with Convectively Induced Turbulence over Europe and the Northeast Atlantic», *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, vol. 55, n.º 5, pp. 1077-1089, may 2016, doi: 10.1175/JAMC-D-15-0194.1.
- [51] «Evelop asegura que la turbulencia sufrida por su avión no afectó a la seguridad del vuelo | Noticias de Aerolíneas, Noticias de turismo | Revista de turismo Preferente.com», *Preferente.com*, 21 de agosto de 2019. <https://www.preferente.com/noticias-de-turismo/unas-turbulencias-dejan-35-heridos-en-un-avion-tras-un-descenso-brusco-292088.html> (accedido 7 de febrero de 2022).
- [52] «Aviation Turbulence: Dynamics, Forecasting, and Response to Climate Change | SpringerLink». <https://link.springer.com/article/10.1007/s00024-018-1822-0> (accedido 11 de febrero de 2022).
- [53] «Clear Air Turbulence: A Mystery May Be Unfolding». <https://www.science.org/doi/10.1126/science.167.3920.937> (accedido 7 de febrero de 2022).
- [54] J. A. Knox, «Possible Mechanisms of Clear-Air Turbulence in Strongly Anticyclonic Flows», *Mon. Weather Rev.*, vol. 125, n.º 6, pp. 1251-1259, jun. 1997, doi: 10.1175/1520-0493(1997)125<1251:PMOCAT>2.0.CO;2.
- [55] «An Objective Clear-Air Turbulence Forecasting Technique: Verification and Operational Use in: Weather and Forecasting Volume 7 Issue 1 (1992)». https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/7/1/1520-0434_1992_007_0150_aocatf_2_0_co_2.xml (accedido 7 de febrero de 2022).
- [56] «Improvements to an Operational Clear-Air Turbulence Diagnostic Index by Addition of a Divergence Trend Term in: Weather and Forecasting Volume 25 Issue 2 (2010)». https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/25/2/2009waf2222290_1.xml (accedido 7 de febrero de 2022).
- [57] «An Integrated Approach to Mid- and Upper-Level Turbulence Forecasting in: Weather and Forecasting Volume 21 Issue 3 (2006)». https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/21/3/waf924_1.xml (accedido 7 de febrero de 2022).

- [58] D. Colson y H. A. Panofsky, «An index of clear air turbulence», *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 91, n.º 390, pp. 507-513, 1965, doi: 10.1002/qj.49709139010.
- [59] L. Vargas, «Impresionantes nubes onduladas (Billow clouds) regala la navidad a pobladores de Jonesport, Maine», *Meteorología por Luis Vargas*, 28 de diciembre de 2012. <https://meteovargas.com/impresionantes-nubes-onduladas-billow-clouds-regala-la-navidad-a-pobladores-de-jonesport-maine/> (accedido 11 de febrero de 2022).
- [60] «Mountain Waves», *SKYbrary Aviation Safety*, 29 de mayo de 2021. <https://skybrary.aero/articles/mountain-waves> (accedido 11 de febrero de 2022).
- [61] R. J. Reed y K. R. Hardy, «A Case Study of Persistent, Intense, Clear Air Turbulence in an Upper Level Frontal Zone», *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, vol. 11, n.º 3, pp. 541-549, abr. 1972, doi: 10.1175/1520-0450(1972)011<0541:ACSOPI>2.0.CO;2.
- [62] J. R. Probert-Jones, «Jet-Stream Meteorology. Elmar R. Reiter. The University of Chicago Press, Chicago and London. 1963. 515 pp. Diagrams. 6 gns.», *Aeronaut. J.*, vol. 68, n.º 637, pp. 68-69, ene. 1964, doi: 10.1017/S0368393100079281.
- [63] S.-H. Kim y H.-Y. Chun, «Aviation turbulence encounters detected from aircraft observations: spatiotemporal characteristics and application to Korean Aviation Turbulence Guidance: Aviation turbulence encounters detected from aircraft observations», *Meteorol. Appl.*, vol. 23, pp. 594-604, oct. 2016, doi: 10.1002/met.1581.
- [64] R. B. Stull, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Springer Science & Business Media, 1988.
- [65] J. Miles y L. Howard, «Note on a heterogeneous shear flow», 1964, doi: 10.1017/S0022112064001252.
- [66] J. L. Keller, «Clear Air Turbulence as a Response to Meso- and Synoptic-Scale Dynamic Processes», *Mon. Weather Rev.*, vol. 118, n.º 10, pp. 2228-2243, oct. 1990, doi: 10.1175/1520-0493(1990)118<2228:CATAAR>2.0.CO;2.
- [67] G. L. Brown y A. Roshko, «On density effects and large structure in turbulent mixing layers», *J. Fluid Mech.*, vol. 64, n.º 4, pp. 775-816, jul. 1974, doi: 10.1017/S002211207400190X.
- [68] W. T. Roach, «On the influence of synoptic development on the production of high level turbulence», *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 96, n.º 409, pp. 413-429, 1970, doi: 10.1002/qj.49709640906.
- [69] «ingresoRAC_jimenez.pdf». Accedido: 14 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: https://torroja.dmt.upm.es/pubs/2011/ingresoRAC_jimenez.pdf
- [70] A. Muschinski y C. Wode, «First In Situ Evidence for Coexisting Submeter Temperature and Humidity Sheets in the Lower Free Troposphere», *J. Atmospheric Sci.*, vol. 55, n.º 18, pp. 2893-2906, sep. 1998, doi: 10.1175/1520-0469(1998)055<2893:FISEFC>2.0.CO;2.
- [71] D. M. Schultz, «A Review of Cold Fronts with Prefrontal Troughs and Wind Shifts», *Mon. Weather Rev.*, vol. 133, n.º 8, pp. 2449-2472, ago. 2005, doi: 10.1175/MWR2987.1.
- [72] D. Mccann, «GRAVITY WAVES, UNBALANCED FLOW, AND AIRCRAFT CLEAR AIR TURBULENCE», feb. 2022.
- [73] S. Koch y F. Caracena, «Predicting Clear-Air Turbulence from Diagnosis of Unbalanced Flow», 2002. <https://www.semanticscholar.org/paper/Predicting-Clear-Air-Turbulence-from-Diagnosis-of-Koch-Caracena/25ae45fe8a93e646ab2cfa4e40eecbf475b8b41f> (accedido 14 de febrero de 2022).

- [74] D. W. Mccann, «2001: Gravity waves, unbalanced flow, and aircraft clear air turbulence», *Natl. Weather Dig.*, p. 314.
- [75] M. A. Shapiro, «Further Evidence of the Mesoscale and Turbulent Structure of Upper Level Jet Stream–Frontal Zone Systems», *Mon. Weather Rev.*, vol. 106, n.º 8, pp. 1100-1111, ago. 1978, doi: 10.1175/1520-0493(1978)106<1100:FEOITMA>2.0.CO;2.
- [76] G. Vogel y C. Sampson, «Clear Air Turbulence Indices Derived from U.S. Navy Numerical Model Data: A Verification Study», p. 34, mar. 1996.
- [77] J.-H. Kim, W. N. Chan, B. Sridhar, y R. D. Sharman, «Combined Winds and Turbulence Prediction System for Automated Air-Traffic Management Applications», *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, vol. 54, n.º 4, pp. 766-784, abr. 2015, doi: 10.1175/JAMC-D-14-0216.1.
- [78] R. M. Endlich, «The Mesoscale Structure of Some Regions of Clear-Air Turbulence», *J. Appl. Meteorol. 1962-1982*, vol. 3, n.º 3, pp. 261-276, 1964.
- [79] G. ELLROD, «Uses of satellite imagery in turbulence detection», en *24th Aerospace Sciences Meeting*, American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi: 10.2514/6.1986-258.
- [80] J. S. Sawyer, «Principles of Meteorological Analysis. Walter J. Saucier. University of Chicago Press, 1955. 438 pp. Illustrated. 75s.», *Aeronaut. J.*, vol. 60, n.º 544, pp. 285-286, abr. 1956, doi: 10.1017/S0368393100135291.
- [81] S. E. Koch y P. B. Dorian, «A Mesoscale Gravity Wave Event Observed during CCOPE. Part III: Wave Environment and Probable Source Mechanisms», *Mon. Weather Rev.*, vol. 116, n.º 12, pp. 2570-2592, dic. 1988, doi: 10.1175/1520-0493(1988)116<2570:AMGWEO>2.0.CO;2.
- [82] D. R. Lee, R. S. Stull, y W. S. Irvine, «Clear Air Turbulence Forecasting Techniques», Defense Technical Information Center, Fort Belvoir, VA, feb. 1984. doi: 10.21236/ADA144854.
- [83] D. N. Behne y D. N. Behne, «NAM-WRF Verification of Subtropical Jet and Turbulence», 2008. <https://www.semanticscholar.org/paper/NAM-WRF-Verification-of-Subtropical-Jet-and-Behne-Behne/908e10e7c859e031ed47551680e24c7f93a0fc4b> (accedido 16 de febrero de 2022).
- [84] Gordon R. Brooks* and Angela D. Oder, «LOW-LEVEL TURBULENCE ALGORITHM TESTING AT-OR-BELOW 10,000 FT».
- [85] «P3.10A Developments in numerical clear air turbulence forecasting at the UK Met Office (2008 - 88Annual_13aram)». https://ams.confex.com/ams/88Annual/techprogram/paper_131782.htm (accedido 17 de febrero de 2022).
- [86] N. N. W. S.-A. W. C. Homepage, «AWC - Aviation Weather Center». <https://www.aviationweather.gov/icing> (accedido 17 de febrero de 2022).
- [87] B. G. Brown, J. L. Mahoney, J. Henderson, T. L. Kane, R. Bullock, y J. E. Hart, «THE TURBULENCE ALGORITHM INTERCOMPARISON EXERCISE: STATISTICAL VERIFICATION RESULTS», p. 6, 2000.
- [88] «El tráfico aéreo de España y Portugal», *Geografía Infinita*, 19 de marzo de 2018. <https://www.geografiainfinita.com/2018/03/el-mapa-del-trafico-aereo-desde-la-peninsula-iberica/> (accedido 23 de febrero de 2022).
- [89] «Ejército del Aire - Misiones - Exterior». <https://ejercitodelaire.defensa.gob.es/EA/ejercitodelaire/es/misiones/exterior/#/> (accedido 1 de marzo de 2022).

- [90] Defensa.com, «Ala 35 y su carácter expedicionario: de Getafe a la misión de Apoyo a Malí-noticia defensa.com - Noticias Defensa España», *Defensa.com*, 1 de noviembre de 2020. <https://www.defensa.com/espana/ala-35-caracter-expedicionario-getafe-mision-apoyo-mali> (accedido 1 de marzo de 2022).
- [91] «La Moncloa. 28/07/2014. El T-21 del Ejército del Aire trasladará de vuelta a Bamako a los especialistas que investigan el accidente [Prensa/Actualidad]». <https://www.lamoncloa.gob.es/serviciosdeprensa/notasprensa/mde/Paginas/2014/280714-regreso-mali.aspx> (accedido 1 de marzo de 2022).
- [92] «Policía Aérea en el Báltico - Ministerio de Defensa de España». https://www.defensa.gob.es/misiones/en_exterior/actuales/listado/policia-aerea-baltico.html (accedido 1 de marzo de 2022).
- [93] «A novel selection method of CMIP6 GCMs for robust climate projection - Hamed - - International Journal of Climatology - Wiley Online Library». <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.7461> (accedido 24 de febrero de 2022).
- [94] S. Watanabe *et al.*, «MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments», *Geosci. Model Dev.*, vol. 4, n.º 4, pp. 845-872, oct. 2011, doi: 10.5194/gmd-4-845-2011.
- [95] S. Brands, «A circulation-based performance atlas of the CMIP5 and 6 models for regional climate studies in the Northern Hemisphere mid-to-high latitudes», *Geosci. Model Dev.*, vol. 15, n.º 4, pp. 1375-1411, feb. 2022, doi: 10.5194/gmd-15-1375-2022.
- [96] Y. Seiji *et al.*, «The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component», *気象集誌 第2輯*, vol. advpub, 2019, doi: 10.2151/jmsj.2019-051.
- [97] M. Schlund, A. Lauer, P. Gentine, S. C. Sherwood, y V. Eyring, «Emergent constraints on equilibrium climate sensitivity in CMIP5: do they hold for CMIP6?», *Earth Syst. Dyn.*, vol. 11, n.º 4, pp. 1233-1258, dic. 2020, doi: 10.5194/esd-11-1233-2020.
- [98] R. H. Moss *et al.*, «The next generation of scenarios for climate change research and assessment», *Nature*, vol. 463, n.º 7282, Art. n.º 7282, feb. 2010, doi: 10.1038/nature08823.
- [99] D. P. van Vuuren *et al.*, «Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm», *Glob. Environ. Change*, vol. 42, pp. 237-250, ene. 2017, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.008.
- [100] E. Kriegler *et al.*, «Fossil-fueled development (SSP5): An energy and resource intensive scenario for the 21st century», *Glob. Environ. Change*, vol. 42, pp. 297-315, ene. 2017, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.015.
- [101] S. Fujimori *et al.*, «SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways», *Glob. Environ. Change*, vol. 42, pp. 268-283, ene. 2017, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.06.009.
- [102] M. J. Gidden *et al.*, «Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century», *Geosci. Model Dev.*, vol. 12, n.º 4, pp. 1443-1475, abr. 2019, doi: 10.5194/gmd-12-1443-2019.
- [103] O. Fricko *et al.*, «The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century», *Glob. Environ. Change*, vol. 42, pp. 251-267, ene. 2017, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.06.004.
- [104] K. Riahi *et al.*, «The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview», *Glob. Environ. Change*, vol. 42, pp. 153-168, ene. 2017, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.

- [105] C. Pardos Martínez, J. Fuertes Fernández-Espinar, I. Nerín de la Puerta, y E. González Pérez-Yarza, «Cuándo se considera positivo el test de broncodilatación», *An. Pediatría*, vol. 57, n.º 1, pp. 5-11, ene. 2002, doi: 10.1016/S1695-4033(02)77885-5.
- [106] «An introduction to t-tests», *Scribbr*, 31 de enero de 2020. <https://www.scribbr.com/statistics/t-test/> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [107] G. U. Bravo, «Leyes de grandes números para la distribución de grados en gráficas aleatorias con ligas preferenciales», p. 13.
- [108] J. C. Amaya *et al.*, «Estudio de infestación de caninos con *Echinococcus granulosus* en la provincia de La Rioja, Argentina», *Rev. Argent. Microbiol.*, vol. 48, n.º 1, pp. 38-42, ene. 2016, doi: 10.1016/j.ram.2015.11.003.
- [109] «Monzones - Información y Características», 9 de septiembre de 2015. <https://www.geoenciclopedia.com/monzones/> (accedido 2 de marzo de 2022).
- [110] R. Thakur, E. L. Shroyer, R. Govindarajan, J. T. Farrar, R. A. Weller, y J. N. Moum, «Seasonality and buoyancy suppression of turbulence in the Bay of Bengal», abr. 2019, doi: 10.1029/2018GL081577.

ANEXO I: PORCENTAJE DE CAMBIO DEL ÍNDICE PARA EL PERIODO DE 2015-2054

Como los cambios en este periodo no son significativos para poder llegar a una conclusión, no se han tomado para el estudio principal. Sin embargo, el análisis en este periodo de tiempo se realizó igualmente siendo estos los resultados:

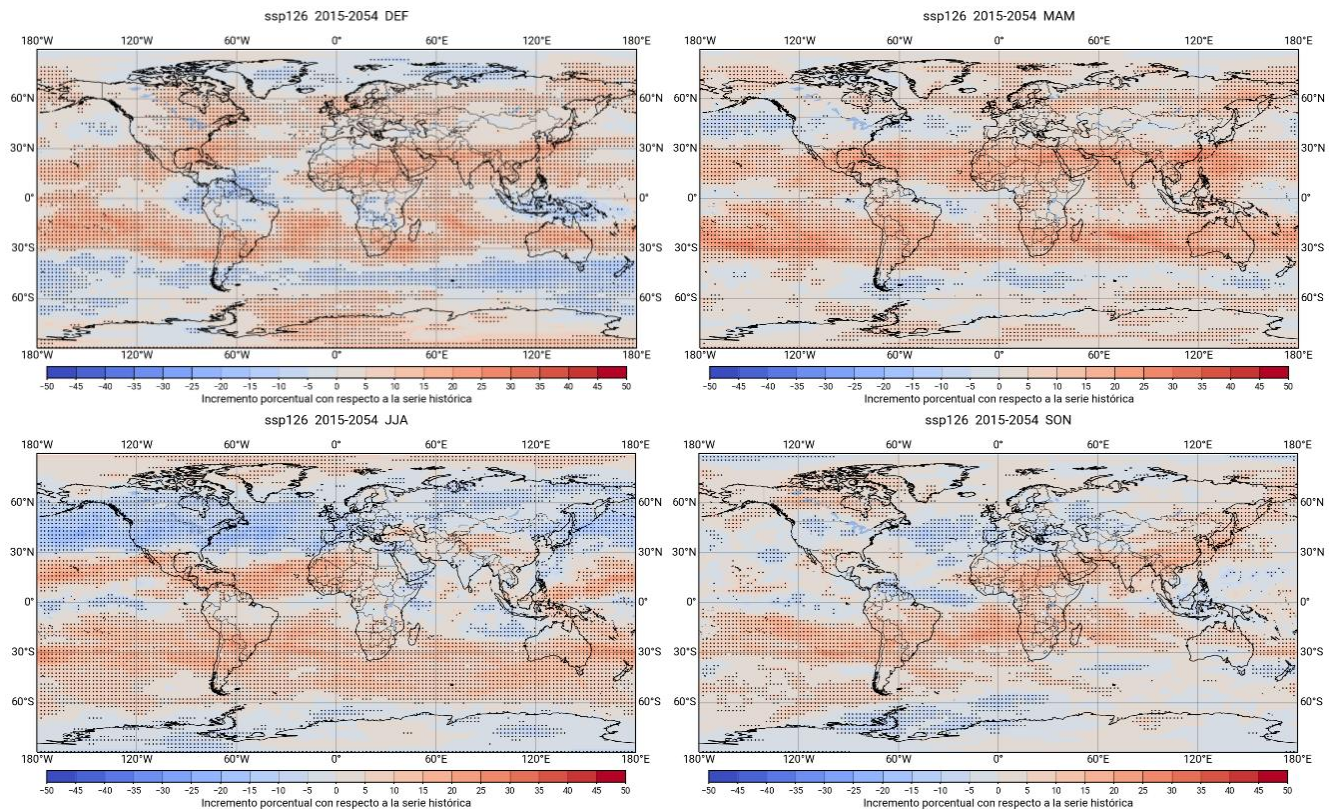


Figura 0-1: Variación del índice T1 en la primera mitad de siglo utilizando el escenario SSP126

ANÁLISIS DE LA TENDENCIA DE FORMACIÓN DE TURBULENCIAS HACIENDO USO DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS DE PROYECCIÓN CLIMÁTICA DEL CMIP6

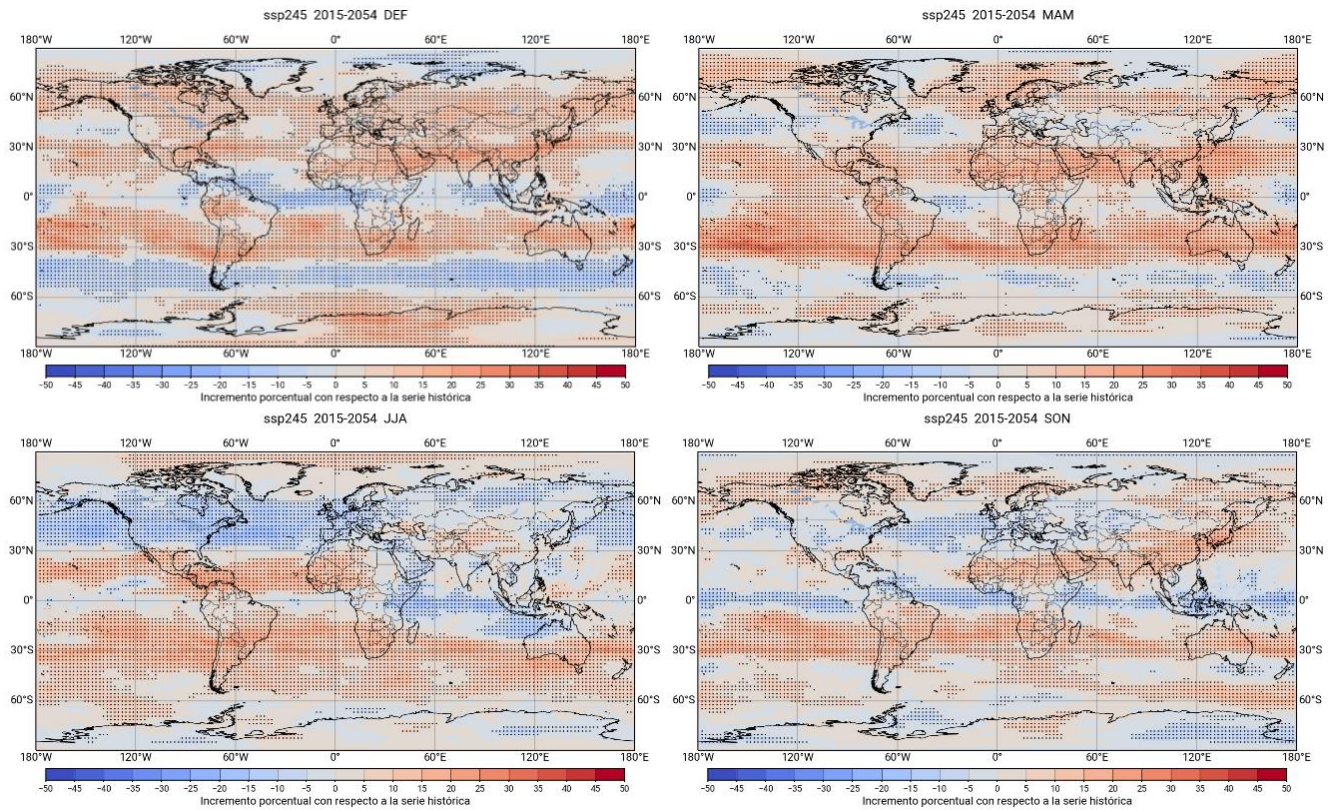


Figura 0-2: Variación del índice T1 en la primera mitad de siglo utilizando el escenario SSP245

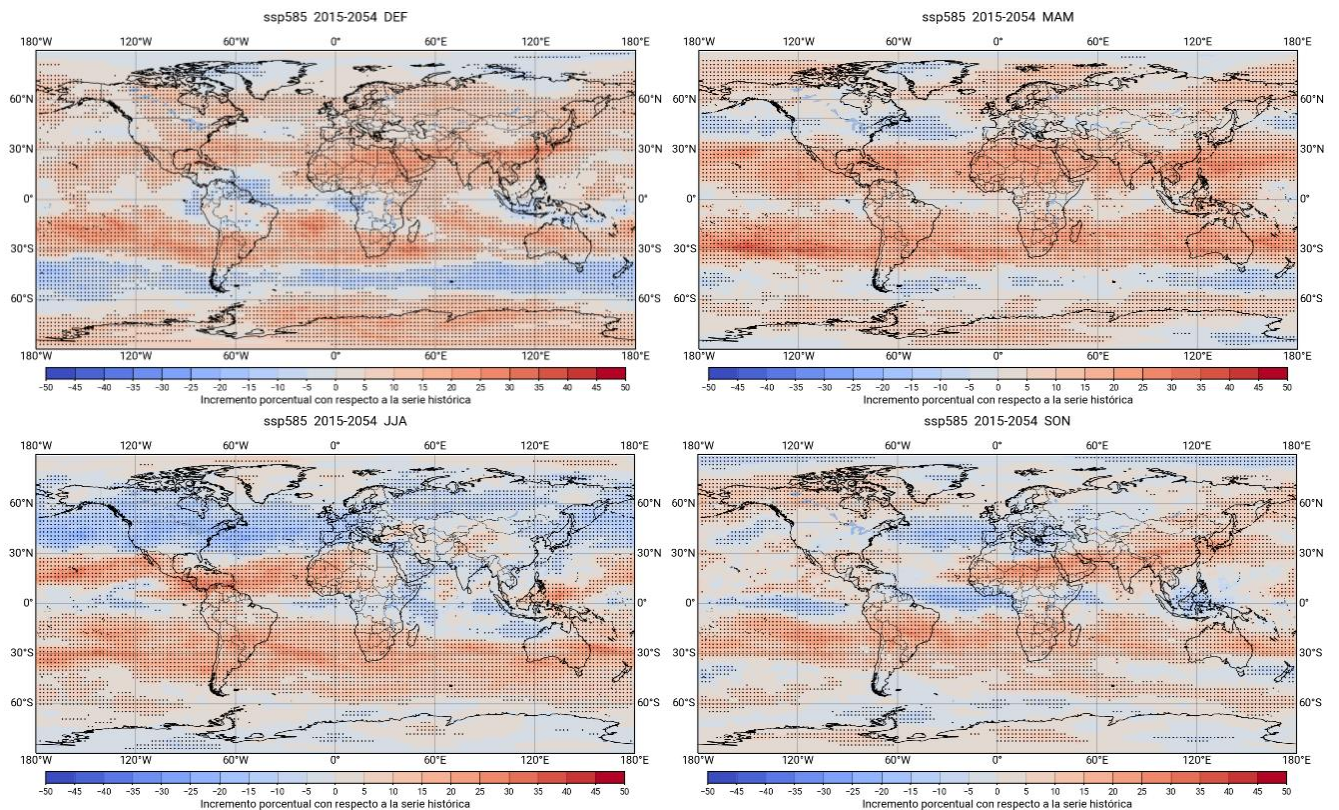


Figura 0-3: Variación del índice T1 en la primera mitad de siglo utilizando el escenario SSP585